



HAL
open science

Éclairage à LED des tunnels routiers : étude de l'influence de la luminance et de la température de couleur sur la visibilité, modélisation de scénarios d'éclairage adaptatif économes en énergie asservis aux conditions environnementales et au trafic

Dorian Talon

► To cite this version:

Dorian Talon. Éclairage à LED des tunnels routiers : étude de l'influence de la luminance et de la température de couleur sur la visibilité, modélisation de scénarios d'éclairage adaptatif économes en énergie asservis aux conditions environnementales et au trafic. Autre. École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE], 2022. Français. NNT : 2022ENTP0009 . tel-04504092

HAL Id: tel-04504092

<https://theses.hal.science/tel-04504092>

Submitted on 14 Mar 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.



N°d'ordre NNT : 2022ENTP0009

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ENTPE
Membre de l'Université de Lyon

École Doctorale N° 162
Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique (MEGA)

Discipline de doctorat :
Énergétique

Soutenue publiquement le 21/12/2022, par :
Dorian TALON

Éclairage à LED des tunnels routiers : étude de l'influence de la luminance et de la température de couleur sur la visibilité, modélisation de scénarios d'éclairage adaptatif économes en énergie asservis aux conditions environnementales et au trafic

Devant le jury composé de :

Hanselaer, Peter	Professeur	Faculty of Engineering Technology	Président
Brémond, Roland	Directeur de Recherches	Université Gustave Eiffel	Rapporteur
Zissis, Georges	Professeur	Université Toulouse	Rapporteur
Dehon, Jérôme	Ingénieur	Schröder-Comatelec	Examineur
Dumortier, Dominique	Chercheur	ENTPE	Directeur de thèse
Besson, Séverine	Ingénieur	CETU	Examineur
Jost, Sophie	Chercheur	ENTPE	Examineur

Thèse réalisée en partenariat avec le Centre d'Études des Tunnels (CETu)

Remerciements

J'adresse mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui m'ont aidé pour la réalisation de ce travail de thèse.

Je remercie Dominique Dumortier, mon directeur de thèse, pour m'avoir guidé et conseillé durant toutes ces années. Il a su, par son écoute, sa disponibilité et son expérience, m'aider à articuler ma pensée et à améliorer mes méthodes de travail.

Je tiens à remercier Séverine Besson, mon encadrante CETU (et maintenant cheffe), pour sa bienveillance et pour avoir toujours pris le temps de s'intéresser à mon travail et de répondre à mes nombreuses interrogations sur le domaine des équipements en tunnel. Merci également pour la confiance qu'elle a su m'accorder en défendant ma candidature pour une prise de poste au CETU.

Je remercie Sophie Jost pour son aide précieuse lors de la conception de l'expérimentation psycho-visuelle, ainsi que pour ses apports théoriques sur les domaines de la colorimétrie et de l'éclairage en général.

Je remercie M. Georges Zissis et M. Roland Brémond d'avoir accepté le rôle de rapporteurs de mon jury de thèse. Je remercie aussi M. Peter Hanselaer et M. Jérôme Dehon d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Je remercie également toute l'équipe EEG du CETU : Benjamin, Julien, Christophe C, Christophe B, Frédéric, Lionel et Eric pour leur sympathie, leur aide et leurs apports sur le domaine de l'éclairage des tunnels, ou tous autres sujets sur lesquels j'ai pu les interroger.

Je remercie aussi tous ceux qui ont pris part à la production de ce travail : Aïman, Pascale, Joachim, Matthieu, ainsi que tous les participants à l'expérimentation pour le temps qu'ils ont su m'accorder et pour avoir rendu l'expérience de visibilité possible.

Je souhaite remercier Mathieu Hébert pour son aide et sa spontanéité lors de ma recherche de formations scientifiques pour l'école doctorale.

Je remercie finalement toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, au bon déroulement de mon travail de thèse et souhaite à chacune d'entre elles toute la réussite possible dans leur carrière respective.

Résumé / Abstract

Ce travail s'intéresse aux possibilités nouvelles offertes par la technologie LED pour l'éclairage des tunnels routiers. Dans un premier chapitre, nous présentons les règles de dimensionnement utilisées actuellement et les recherches dont elles sont issues. Ces règles ont été définies à un moment où les sources majoritairement utilisées étaient les lampes à vapeur de Sodium Haute Pression. En comparaison, les sources LEDs apportent de nombreuses améliorations que nous décrivons. Parmi celles-ci, (1) un large choix de températures de couleur et même la possibilité de créer une distribution spectrale spécifique, (2) une gradation fine de leur flux et un couplage facilité à des systèmes de contrôle intelligent. C'est l'impact de ces deux améliorations sur l'éclairage des tunnels routiers que nous avons retenu et étudié dans ce travail de thèse.

Pour investiguer l'impact de la température de couleur sur la visibilité d'obstacles en section courante de tunnel, nous avons conduit une expérience psycho-visuelle utilisant une maquette. Cette expérience est décrite dans le chapitre 2. 6 distributions spectrales ont été utilisées pour éclairer le tunnel à 45 niveaux de luminance : 3 températures de couleur (2000 K, 3000 K et 5000 K) présentées en 2 versions d'éclairages mélanopiques différents pour étudier l'influence des CGRips. Les observateurs se prononçaient sur la visibilité d'une cible en utilisant une échelle comportant 5 seuils. Les résultats obtenus n'ont pas montré de différence significative entre les 2 versions de chaque température de couleur, sans doute parce que les éclairages mélanopiques n'étaient pas suffisamment élevés pour stimuler les CGRips. La température de couleur a quant à elle un impact significatif, mais seulement pour des luminances de chaussée inférieures à 1 cd/m^2 ; dans ce cas, les températures de couleur les plus faibles offrent une meilleure visibilité en vision centrale. Toutefois, cette constatation ne constitue pas une piste d'économie d'énergie tangible en tunnel, étant donné que les niveaux de luminance recommandés dans ces ouvrages ne sont jamais inférieurs à 1 cd/m^2 . Le choix de la température de couleur peut donc davantage se faire sur la base de l'efficacité lumineuse de la source considérée. Ainsi, une température de couleur de 4000 K semble être un bon compromis entre performances visuelles et économies d'énergie. Les résultats de l'expérience nous ont aussi montré que les valeurs minimales de luminance recommandées actuellement pour la chaussée étaient sans doute trop faibles et qu'à l'opposé les valeurs maximales étaient peut-être trop élevées : la gamme de luminances à recommander serait de 2.5 cd/m^2 à 8 cd/m^2 .

Pour étudier l'impact de la gradation fine du flux, nous avons développé un environnement de simulation dynamique permettant d'estimer les consommations d'énergie annuelles liées à l'asservissement de l'éclairage artificiel d'un tunnel aux conditions climatiques et de trafic du site. L'environnement devait pouvoir modéliser à l'année, l'éclairage naturel disponible en amont d'un tunnel ainsi que son éclairage artificiel. Le développement et la validation de cet environnement font l'objet du chapitre 3. Au cœur de l'environnement se trouve le logiciel de lancer de rayons Ocean. La modélisation de la lumière naturelle repose sur une discrétisation

du ciel en 145 zones et le calcul de l'influence de chacune de ces zones sur la scène constituant l'entrée du tunnel. Le climat lumineux du lieu est décrit toutes les 15 mn par les luminances moyennes des 145 zones calculées à partir du modèle de ciel ASRC-Perez alimenté par des éclairagements lumineux estimés à partir d'images satellitaires (base de données HelioClim). Pour l'éclairage naturel, la validation s'est appuyée sur des mesures de luminance de voile sous 20° effectuées sur le portail d'entrée de la tranchée couverte du Noiret à Cruseilles (Haute Savoie). Pour l'éclairage artificiel, la validation s'est appuyée sur des mesures effectuées dans la maquette.

Le chapitre 4 décrit l'application de l'environnement de simulation au cas de la tranchée couverte d'Antony (Hauts de Seine) futur lieu d'expérimentation du projet DELTA initié par le CETU. Les résultats de simulation pour différents scénarios de contrôle de l'éclairage de la tranchée nous ont montré qu'en comparaison aux pratiques actuelles, des économies d'énergie annuelles de l'ordre de 15% sont atteignables en mettant en place un asservissement plus poussé aux conditions de luminosité extérieure. Elles peuvent même atteindre 58% en ajoutant un asservissement au trafic et à l'état de la chaussée (sèche ou humide).

Mots-clés : Tunnel routier, LED, sécurité, visibilité, température de couleur, luminance, éclairage adaptatif, économies d'énergie.

LED lighting in road tunnels: Study of the influence of luminance and Correlated Colour Temperature on visibility, simulation of energy-efficient adaptive lighting scenarios controlled through environmental and traffic conditions

This PhD studies the new possibilities that the LED technology offers for road tunnel lighting. In the first chapter, we present the dimensioning rules used so far, as well as the research that led to their creation. These rules have been defined when the main light sources used in tunnel were the High-Pressure Sodium sources (HPS). In comparison, the LEDs sources bring a lot of improvements that are described in this PhD dissertation. Among them, (1) a large choice of Correlated Colour Temperature (CCT), and even the possibility to create a specific spectral power distribution, (2) an accurate gradation of their flux and an eased pairing with intelligent control systems. The impact of these two improvements on the lighting of road tunnels have been studied during this PhD.

In order to investigate the impact of the CCT on obstacles visibility in the interior zone of tunnels, we carried out a psycho-visual experiment on a scale-model. This experiment is described in chapter 2. 6 spectral power distributions were used to light the tunnel at 45 different luminance levels: 3 CCT (2000 K, 3000 K and 5000 K) presented in 2 melanopic

illuminance versions, to study the influence of ipRGCs. The observers judged the visibility of a target according to a 5 thresholds visibility scale. The results didn't show any significant difference between the 2 versions of each CCT, probably because the melanopic illuminances weren't high enough to stimulate the ipRGCs. The CCT, on the other hand, has a significant impact, but only for road luminance levels below 1 cd/m^2 . In that case, the lower are the CCT, the better is the visibility of the observers in their central visual field. However, this result is not likely to lead to substantial energy savings, as recommended luminance levels in tunnels are never below 1 cd/m^2 . The choice of the CCT can better rely on the luminous efficacy of the LED source. We finally stated that a CCT of 4000 K seems to be a good compromise between visual performances and energy savings. The results of the experiment also showed that the minimal recommended values for the road luminance levels are too low and that, on the opposite, the maximal values are maybe too high. The recommended luminance levels according to our results would range from 2.5 to 8 cd/m^2 .

To study the impact of the accurate gradation of the flux, we developed a dynamic model which allows us to estimate the yearly energy consumptions of a lighting installation controlled through environmental and traffic conditions. The model had to simulate for one year, the natural lighting of the access zone, as well as the artificial lighting inside the tunnel. The development and the validation of this model are described in chapter 3. The heart of the model is based on the ray tracing software Ocean. The simulation of natural light was carried out by using a segmentation of the sky in 145 zones, and by calculating the influence of each of these zones on the tunnel entrance scene. The natural lighting conditions of the site is described every 15 minutes by the mean luminances of the 145 sky zones. These mean luminances were calculated with the ASRC Perez sky model, using illuminance values estimated from satellite images (Database Helioclim). For the natural lighting, the validation relied on 20° veil luminances measured on the entrance portal of the Noiret cut and cover tunnel in Cruseilles (Haute Savoie). The validation of artificial lighting relied on measurements carried out in the scale-model.

Chapter 4 describes the application of the dynamic model for the case of the Antony cut and cover tunnel (Hauts de Seine), future site of experimentation for the DELTA project. The simulation results obtained for the different scenarios of control of the lighting installation showed that, in comparison to the current practices, annual energy savings around 15% are achievable with a better control of the installation through the natural lighting conditions. These savings can reach 58% if the lighting installation is also controlled through traffic and state of the road conditions (dry or wet).

Keywords: Road tunnel, LED, safety, visibility, Correlated Colour Temperature (CCT), luminance, adaptive lighting, energy savings.

Acronymes

BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CEN	Comité Européen de Normalisation
CETU	Centre d'Etudes des Tunnels
CGRips	Cellules Ganglionnaires Rétiniennes intrinsèquement photosensibles
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
COB	Chips On Board
DELTA	Démonstrateur Eclairage LED du Tunnel d'Antony
DIRIF	Direction des Routes d'Ile-de-France
DMX	Digital Multiplexing
HM	« High Mela » (désigne les spectres de l'expérience psycho-visuelle excitant fortement la mélanopsine)
IES	Illuminating Engineering Society
L	Scénario asservi à la luminance de voile dans le modèle dynamique
LED	Light Emitting Diode
LM	« Low Mela » (désigne les spectres de l'expérience psycho-visuelle excitant peu la mélanopsine)
LT	Scénario asservi à la luminance de voile et au trafic dans le modèle dynamique
LTES	Scénario asservi à la luminance de voile, au trafic et aux conditions d'état du sol dans le modèle dynamique
LTP	Look Through Percentage
MBE	Mean Bias Error
MOVE	Mesopic Optimisation of Visual Efficiency
RCS	Relative Contrast Sensitivity
RMSE	Root Mean Square Error
SBP	Sodium Basse Pression
SHP	Sodium Haute Pression
SYNOP	Données d'observations issues des messages en code synoptique international d'observation en surface
TC	Température de couleur
TRP	Total Revealing Power

Tableau des variables

A_{mesure}	Surface de mesure du détecteur pendant une mesure de BDRF (en m ²)
AF	Facteur correctif lié à l'âge dans l'équation de visibilité d'Adrian.
Age	Age du conducteur (en années).
$a(\alpha, L_f)$	$= \frac{[b(\alpha)^2 + c(L_f)^2]}{2.1}$ dans le facteur correctif lié à la durée d'exposition de l'équation d'Adrian.
α	Taille angulaire de la cible (souvent en minutes d'angle). ou Angle entre le centre de l'image simulée sous OCEAN et le pixel considéré (en degrés)
$b(\alpha)$	$= 0.36 - 0.0972 \times \left(\frac{(\log(\alpha) + 0.523)^2}{(\log(\alpha) + 0.523)^2 - 2.513 \times (\log(\alpha) + 0.523) + 2.7895} \right)$ dans le facteur correctif lié à la durée d'exposition de l'équation d'Adrian.
$BRDF$	Bi-directional Reflectance Distribution Function d'un matériau
β	$= 0.6 \times L_f^{-0.1488}$ dans le facteur correctif lié au contraste de l'équation de visibilité d'Adrian. ou Angle entre la projection de la ligne de vue du conducteur sur la chaussée et la demi-droite issue du point étudié sur la chaussée, s'éloignant de la source de lumière, et dont la direction est donnée par la droite reliant le point sur la chaussée située sous le centre de la source de lumière et le point étudié (en degrés).
c_{base}	Coefficient de clarté de la chaussée valable pour l'installation de base (symétrique), pris égal à 0.18
c_i	Coefficient de proportionnalité entre L_{chi} et ΔL_i .
C_{int}	Contraste intrinsèque entre un objet et son environnement de fond (pas d'influence des facteurs de transmission ou des luminances de voile).
C_m	Contraste perçu minimal requis : Contraste minimal nécessaire pour permettre la détection d'une cible.
c_{nat}	Coefficient de clarté de la chaussée (valable pour la lumière naturelle, pris égal à 0.18)
C_p	Contraste perçu : contraste entre un objet et son environnement de fond tel que perçu par un usager.
C_{red}	Contraste réduit : contraste tenant compte de l'influence de la luminance de voile L_{seq}
c_{renf}	Coefficient de clarté de la chaussée valable pour l'installation de renfort (contre-flux) pris égal à 0.24
C_{z_j}	Coefficient d'influence de la zone de ciel j sur la valeur de L_{20} calculée pour toutes les zones de ciel allumées, pour un tunnel donné
CS	Sensibilité au contraste (= inverse du contraste)
$c(L_{f_{int}})$	$= 0.36 - 0.0972 \times \left(\frac{(\log(L_{f_{int}}) + 6)^2}{(\log(L_{f_{int}}) + 6)^2 - 10.4 \times (\log(L_{f_{int}}) + 6) + 52.28} \right)$ dans le facteur correctif lié à la durée d'exposition de l'équation d'Adrian.
d	Distance (en m).
D_{camera}	Distance entre la caméra utilisée sous OCEAN et le portail d'entrée du tunnel
$D_{capteur}$	Distance entre le centre du capteur (caméra simulée sous OCEAN) et le pixel considéré (en m)
$D_{c,x}$	Distance entre le centre de l'image et la projection du pixel considéré sur l'axe des x (en m)
$D_{c,y}$	Distance entre le centre de l'image et la projection du pixel considéré sur l'axe des y (en m)

DA	Distance d'arrêt (en m)
ΔL	Ecart de luminance nécessaire entre la cible et son environnement de fond pour que cette dernière puisse être détectée par les conducteurs (en cd/m^2). Dans l'équation de visibilité d'Adrian, ΔL dépend notamment de la taille angulaire de la cible, de la luminance de fond, de la durée d'exposition de la cible, de la polarité du contraste, ainsi que de l'âge de l'utilisateur.
ΔL_i	Contribution d'une « tranche » élémentaire de tunnel à la luminance d'adaptation d'un usager (en cd/m^2).
ΔL_{neg}	Différence de luminance nécessaire entre une cible et son environnement de fond pour que cette dernière soit visible si elle est vue en contraste négatif
ΔL_{pos}	Différence de luminance nécessaire entre une cible et son environnement de fond pour que cette dernière soit visible si elle est vue en contraste positif
ΔS	Élément de surface élémentaire (en m^2)
$\Delta \Omega$	Angle solide sous lequel est vu un élément de l'environnement (en stéradians).
E_e	Eclairement énergétique (en W/m^2)
$E_{e,\alpha}$	Irradiance α -opique (en W/m^2)
$E_m(\theta_{in}, \varphi_{in})$	Eclairement mesuré sur le matériau à tester pour la direction d'incidence de source donnée pendant une mesure de BRDF (en lux)
$E_{besoin_{base}}$	Besoin en éclairage sur la chaussée pour l'installation de base (en lux)
E_{besoin_i}	Besoin en éclairage au niveau de la zone de calcul i (en lux)
E_h	Eclairement horizontal (en lux)
E_k	Eclairement calculé pour le pixel k dans une simulation OCEAN (en lux)
$E_{moy_{base}}$	Eclairement moyen produit par l'installation de base sur toutes les zones de calcul du tunnel (en lux)
$E_{nat,ref_{ij}}$	Eclairement de référence calculé sur la zone i lorsque la zone de ciel j est allumée (en lux)
E_{ref}	Eclairement mesuré sur un matériau de référence pendant une mesure de BRDF (en lux)
$E_{ref_{ij}}$	Eclairement de référence calculé sur la zone de calcul i lorsque la rangée de luminaires j de l'installation de renfort est allumée (en lux)
$E_{ref_{base_i}}$	Eclairement moyen produit sur la zone de calcul i par l'installation de base (lx)
E_v	Eclairement vertical (en lux).
$E_{v,oeil}$	Eclairement mesuré au niveau du plan de l'œil de l'observateur (en lux)
En_{base}	Energie consommée par l'installation de base pour un quart d'heure donné (en Wh)
En_{renf}	Consommation énergétique totale de l'installation de renfort pour un quart d'heure donné (en Wh)
En_{renf_j}	Energie consommée par la rangée j de l'installation de renfort pour un quart d'heure donné (en Wh)
ε	Part de l'environnement visible depuis la distance d'arrêt (utilisée dans la méthode L_{20}).
f	Distance focale de la caméra utilisée dans les simulations OCEAN (en m)
$f(v)$	Coefficient de friction de la chaussée comme fonction de la vitesse
$F_{cp}(\alpha, L_{f_{int}})$	Facteur correctif lié au contraste dans l'équation de visibilité d'Adrian.
f_m	Coefficient de friction pour chaussée mouillée
f_s	Coefficient de friction pour chaussée sèche
FLJ_k	Facteur de lumière du jour au niveau du pixel k
g	Accélération de la pesanteur à la surface de la terre (en m/s^2)
γ	Part de ciel visible depuis la distance d'arrêt (utilisé dans la méthode L_{20}) ou

	Angle entre la droite verticale passant par le centre de la source de lumière et la demi-droite reliant le centre de cette même source au point étudié sur la chaussée (en degrés).
$\gamma_{\alpha,v}^{D65}$	« Daylight Efficacy Ratio » α -opique
I_{source}	Intensité de la source de lumière (en cd)
k	Coefficient utilisé dans la méthode L_{20} permettant d'exprimer la luminance nécessaire en zone d'entrée en fonction de la luminance moyenne rencontrée en zone d'accès par un usager. ou Coefficient lié à l'âge utilisé par Adrian dans sa formule de la luminance de voile équivalente.
K	Facteur d'extinction de l'air intérieur (en m^{-1}) ou Coefficient utilisé dans la loi RCS.
K_m	Efficacité lumineuse spectrale maximale (en lm/W)
$K_{\alpha,v}$	Efficacité α -opique (W/lm)
$K_{\alpha,v}^{D65}$	Efficacité α -opique de l'illuminant D65 (W/lm)
K_1, K_2 et K_3	Constantes modélisant l'intensité des voiles pour les voiles de FRY, d'atmosphère et de pare-brise respectivement.
L	$= 0.05946 \times L_f^{0.466}$ dans l'équation de visibilité d'Adrian. ou Luminance d'un point considéré (en cd/m^2).
$L_m(\theta_{out}, \varphi_{out})$	Luminance mesuré sur le matériau à tester dans la direction donnée pendant une mesure de BRDF (en cd/m^2)
L_{adap}	Luminance d'adaptation d'un usager (en cd/m^2).
L_{atm}	Luminance de voile d'atmosphère : Phénomène provoqué par la dispersion de la lumière dans l'atmosphère dans toutes les directions, entraînant la création d'une luminance de voile sur la rétine de l'utilisateur (en cd/m^2).
L_{art_i}	Luminance issue de l'éclairage artificiel calculée au niveau de la zone i (en cd/m^2)
L_{base_i}	Luminance issue de l'installation de base et calculée sur la zone de mesure i (en cd/m^2)
$L_{besoin_{base}}$	Besoin en luminance de chaussée pour l'installation de base (en cd/m^2)
L_c	Luminance moyenne du ciel (utilisé dans la méthode L_{20} , en cd/m^2).
L_{ch_i}	Luminance de chaussée moyenne pour la tranche de tunnel i (en cd/m^2).
$L_{ch_{int}}$	Luminance de chaussée intrinsèque : Luminance de la chaussée mesurée à proximité immédiate de celle-ci (pas d'influence des facteurs de transmission ou des luminances de voile, en cd/m^2).
L_{ch_p}	Luminance de chaussée telle que perçue par un usager (en cd/m^2).
L_{ciel_k}	Luminance moyenne de la zone de ciel k pour la condition climatique considérée (en cd/m^2)
$L_{ciel,ref}$	Luminance moyenne de la zone de ciel k prise en compte dans les simulations (10 000 cd/m^2)
L_{corr_x}	Luminance de chaussée moyenne au niveau de la « tranche » de tunnel x après correction visant à résoudre les problèmes d'adaptation spatiale (en cd/m^2).
L_{db}	Luminance limite pour assurer l'adaptation temporelle (en cd/m^2).
L_e	Luminance énergétique (en $W/m^2/sr$)
L_E	Luminance moyenne de l'environnement (utilisé dans la méthode L_{20} , en cd/m^2).
$L_{f_{int}}$	Luminance de fond intrinsèque : Luminance de l'environnement de fond sur lequel un objet se détache, mesurée à proximité immédiate de celui-ci (pas d'influence des facteurs de transmission ou des luminances de voile, en cd/m^2).

L_{fp}	Luminance de fond perçue : luminance de l'environnement de fond sur lequel un objet se détache, telle que perçue par un usager (en cd/m ²).
L_{FRY}	Luminance de voile de FRY, rendant compte de l'éblouissement dû à l'environnement subi par un usager.
L_i	Luminance moyenne de chaque section d'anneau du diagramme polaire d'Adrian (en cd/m ²).
L_{ij}	Luminance moyenne intrinsèque de chacune des sections du diagramme d'Adrian (pas d'influence de facteurs de transmission ou des luminances de voile, en cd/m ²).
L_{ije}	Luminance moyenne de chacune des sections du diagramme d'Adrian telle que perçue par un usager (en cd/m ²).
L_m	$= \frac{\tau_{ws} \cdot L_{atm} + L_{ws} + L_{seq}}{(\tau_{ws} \cdot \tau_{atm})}$ dans la méthode du contraste perçu de la CIE.
$L_{mes,n}$	Luminance mésopique calculée au rang n de l'itération du modèle CIE
L_{nat_i}	Luminance issue de l'éclairage naturel et calculée sur la zone i (en cd/m ²)
$L_{obj_{int}}$	Luminance intrinsèque de l'objet : Luminance de l'objet mesurée à proximité immédiate de celui-ci (pas d'influence des facteurs de transmission ou des luminances de voile, en cd/m ²).
L_{obj_p}	Luminance de l'objet telle que perçue par un usager (en cd/m ²).
L_{pb}	Luminance de voile de pare-brise : Phénomène provoqué par la dispersion de la lumière dans toutes les directions lorsque celle-ci traverse le pare-brise d'un véhicule, entraînant la création d'une luminance de voile sur la rétine de l'utilisateur (en cd/m ²).
$L_{pixel_{ij}}$	Luminance du pixel situé ligne i et colonne j dans l'image résultant des conditions climatiques prises en compte (en cd/m ²)
$L_{pixel,ref_{kij}}$	Luminance du pixel i,j pour la simulation de référence effectuée avec la zone de ciel k allumée (en cd/m ²)
$L_{pixel,ref_{zsj}}$	Luminance du pixel i,j pour la simulation de référence effectuée avec la zone de ciel contenant le soleil allumée (en cd/m ²)
L_{ref_x}	Luminance de chaussée moyenne au niveau de la « tranche » de tunnel x pour la solution provisoire de référence de la méthode CETU (en cd/m ²).
L_{renf_i}	Luminance fournie par l'installation de renfort au niveau de la zone de calcul i (en cd/m ²)
L_R	Luminance moyenne de la chaussée en zone d'accès (utilisée dans la méthode L ₂₀ , en cd/m ²).
L_{seq}	Luminance de voile équivalente : Luminance de voile due à l'environnement plus ou moins brillant à l'approche d'un tunnel et perçue par le conducteur comme autant de sources éblouissantes (en cd/m ²).
L_{seqdim}	Luminance de voile équivalente retenue pour le dimensionnement de l'éclairage simulé pour la tranchée d'Antony (en cd/m ²)
L_{soleil}	Luminance du soleil (en cd/m ²)
L_{th}	« <i>Threshold Luminance</i> » : Valeur de luminance mise en place par la CIE sur une distance égale à la moitié de la distance d'arrêt à l'entrée d'un tunnel (en cd/m ²).
L_v	Luminance de voile créée par les luminaires dans le champ de vision de l'utilisateur jusqu'à 20° au-dessus de l'horizontale (en cd/m ²). L_v est utilisé dans le calcul du TI.
$L_{v,oeil}$	Luminance photopique équivalente uniforme de fond (=luminance d'adaptation) (en cd/m ²)
L_x	Longueur du capteur selon l'axe des x (en m)
L_y	Longueur du capteur selon l'axe des y (en m)
L_z	Luminance zénithale (en cd/m ²)

L_0	Luminance moyenne dans un cône de 20° d'ouverture totale évaluée 150 m en amont de l'entrée du tunnel (en cd/m ²)
L_{0dim}	Luminance moyenne dans un cône de 20° évaluée 150 m en amont de l'entrée de la tranchée d'Antony pour le dimensionnement de l'éclairage simulé pour cette dernière (en cd/m ²)
L_{20}	Luminance moyenne dans un champ de vision conique de 20° (en cd/m ²). ou Méthode associée à la prise en compte de cette luminance.
L_{20dim}	Luminance moyenne dans un cône de 20° retenue pour le dimensionnement de l'éclairage simulé pour la tranchée d'Antony (en cd/m ²)
L_{20j}	Luminance moyenne dans un cône de 20° calculée lorsque seule la zone de ciel j est allumée pour un tunnel donné (en cd/m ²)
L_{2°	Luminance moyenne dans un cône de 2° représentant le champ de vision central d'un usager (en cd/m ²).
λ	Coefficient de proportionnalité entre $c_i * \Delta L$ et ΔL_{ch_i} . ou Angle entre la droite reliant l'intersection de la ligne de vue d'un usager avec le plan vertical contenant une source d'éblouissement donnée et le centre de la source en question, et la droite verticale contenue dans le plan précédemment cité (en degrés).
m	$= 10^{-10^{-(0.125 \times (\log(L_f + 1))^2 + 0.0245)}}$ dans le facteur correctif lié au contraste de l'équation de visibilité d'Adrian. Ou Coefficient d'adaptation du modèle mésopique de la CIE
M_{qr}	Moyenne de luminance résultante pour le point situé ligne q et colonne r dans la grille d'uniformité (en cd/m ²)
$M_{ref\ jqr}$	Moyenne de luminance obtenue au niveau du point situé ligne q et colonne r dans la grille de mesure, pour la simulation de référence de l'installation de base (en cd.m ²)
$M_{\rho_{380-780}}$	Moyenne des facteurs de réflexion spectraux d'un matériau sur tout le spectre du visible
MBE	Mean Bias Error (voir annexe G : Calculs statistiques)
$M(m)$	Fonction de normalisation permettant à $V_{mes}(\lambda)$ d'atteindre une valeur maximale de 1
n_{lumi}	Nombre de luminaires qui composent l'installation de base (42)
$n_{pixel_{10^\circ}}$	Nombre de pixels de l'image dont l'angle avec le centre de l'image est inférieur ou égal à 10°
$n_{pixel_{20^\circ}}$	Nombre de pixels de l'image dont l'angle avec le centre de l'image est inférieur ou égal à 20°
$n_{pixel_{c,x}}$	Nombre de pixels séparant le centre de l'image et la projection du pixel considéré sur l'axe des x
$n_{pixel_{c,y}}$	Nombre de pixels séparant le centre de l'image et la projection du pixel considéré sur l'axe des y
n_{pixel_x}	Nombre de pixels de l'image selon l'axe des x
n_{pixel_y}	Nombre de pixels de l'image selon l'axe des y
Ω	Caractéristique de diffusion des particules (en lux.m ² /cd)
Ω_{ij}	Angle solide sous lequel est vu le pixel i,j depuis la position d'observation (en sr)
Ω_{ij_p}	Angle solide sous lequel est vu le pixel i,j depuis la distance d'arrêt (en sr)
$P_{automobile}$	Pourcentage de la surface d'une automobile type pouvant être vue en contraste sur la sortie du tunnel (méthode LTP)

$P_{piéton}$	Pourcentage de la surface d'un piéton type pouvant être vue en contraste sur la sortie du tunnel (méthode LTP)
$P_{refbase}$	Puissance de référence d'un luminaire de l'installation de base (en W)
P_{refj}	Puissance de référence d'un seul luminaire de la rangée j (W)
ϕ	Angle entre la droite reliant l'intersection de la ligne de vue d'un usager avec le plan vertical contenant une source d'éblouissement donnée et le centre de la source en question, et la droite horizontale contenue dans le plan précédemment cité (en radians ou en degrés en fonction de la formule utilisée).
Φ	$= \log(4.1925 \times L_f^{0.1556}) + 0.1684 \times L_f^{0.5867}$ dans l'équation de visibilité d'Adrian
ϕ_{base}	Flux de la totalité de l'installation de base (en lm)
ϕ_{in}	Angle azimutal pour la source de lumière dans une mesure de BRDF (en degrés)
ϕ_j	Flux de la rangée j pour un quart d'heure donné (en lm)
ϕ_{out}	Angle azimutal pour le capteur de mesure dans une mesure de BRDF (en degrés)
$\phi_{refbase}$	Flux de référence utilisé pour la totalité de l'installation de base dans la simulation OCEAN (en lm)
ϕ_{refj}	Flux de référence (flux maximal) d'un seul luminaire utilisé sur la rangée j (en lm)
q_c	Paramètre de qualité de contraste : utilisé pour caractériser la capacité d'une installation à accentuer le contraste des obstacles éventuels.
Q_0	Coefficient de luminance moyenne rendant compte des propriétés de réflexion diffuses d'un revêtement de chaussée (en cd/m ² /lx).
$q(\gamma, \beta)$	Coefficient de luminance utilisé dans les tables-R (en cd/m ² /lux).
R_1, R_2, R_3 et R_4	Revêtements de chaussée standards définis par les tables-R et utilisés par la CIE.
ρ	Facteur de réflexion ou Part de route visible depuis la distance d'arrêt (utilisé dans la méthode L_{20}).
ρ_{ch}	Facteur de réflexion de la chaussée.
$\rho_m(\lambda)$	Facteur de réflexion spectral d'un matériau pour la longueur d'onde λ
ρ_{moy}	Facteur de réflexion photopique moyen d'un matériau
ρ_{obj}	Facteur de réflexion de l'objet cible.
ρ_{ref}	Facteur de réflexion spectral du blanc de référence (0.98)
ρ_t	Facteur de réflexion de la cible standard (généralement pris égal à 0.2)
R	Distance entre la source de lumière et le matériau à tester (m)
R_a	Indice de rendu des couleurs
R_f	Indice de fidélité des couleurs
$r(\gamma, \beta)$	Coefficient réduit de luminance utilisé dans les tables R (en cd/m ² /lux).
$RCS(L_{f_{int}})$	« <i>Relative Contrast Sensitivity</i> » Loi de visibilité inspirée des travaux de Blackwell.
$rMBE$	relative Mean Bias Error (voir annexe G : Calculs statistiques)
$RMSE$	Root Mean Square Error (voir annexe G : Calculs statistiques)
$rRMSE$	relative Root Mean Square Error (voir annexe G : Calculs statistiques)
S_{mint}	Mesure d'intensité lumineuse effectuée sur le matériau à tester pour le calcul de BRDF (en cd)
S_{refint}	Mesure d'intensité lumineuse effectuée sur un matériau de référence pour le calcul de BRDF (en cd)
$s_{source}(\lambda)$	Distribution spectrale d'une source de lumière (W/m ²)
$s_\alpha(\lambda)$	Sensibilité α -opique relative
S_1	Coefficient de spécularité rendant compte des propriétés de réflexion spéculaires d'un revêtement de chaussée

S/P_{oeil}	Ratio S/P mesuré au niveau de l'œil de l'observateur
t	Durée d'exposition de la cible (en s).
TC	Température de couleur (en K)
TI	« <i>Threshold Increment</i> » : indice majoritairement utilisé en éclairage routier pour caractériser l'éblouissement d'incapacité subi par un usager.
τ	Part de l'intérieur du tunnel visible depuis la distance d'arrêt (utilisée dans la méthode L_{20}).
τ_{pb}	Facteur de transmission du pare-brise
τ_{atm}	Facteur de transmission de l'atmosphère
θ	Angle d'éblouissement entre la demi-droite reliant l'œil de l'observateur à la source de lumière et la demi-droite reliant l'œil de l'observateur à l'objet cible (en radians ou en degrés en fonction de la formule utilisée).
θ_{DO}	Demi angle au sommet du cône à prendre en compte depuis la distance d'arrêt de référence, pour avoir un champ de vision équivalent à celui offert par le cône de demi-angle au sommet 10° à 150 m (en degrés)
θ_{ij}	Angle entre le centre de l'image et le pixel i,j (en degrés)
θ_{ijp}	Angle entre le centre de l'image et le pixel i,j lorsqu'on se place à la distance d'arrêt (en degrés)
θ_{in}	Angle zénithal pour la source de lumière dans une mesure de BRDF (en degrés)
θ_{out}	Angle zénithal pour le capteur de mesure dans une mesure de BRDF (en degrés)
t_0	Temps de réaction (en s)
U_g	Uniformité générale
U_l	Uniformité longitudinale
v	Vitesse (en m/s ou km/h)
v_{dim}	Vitesse retenue pour le dimensionnement de l'éclairage simulé pour la tranchée d'Antony (en km/h)
V_m	Visibilité météorologique (en m)
$V_{m_{dim}}$	Visibilité météorologique retenue pour le dimensionnement de l'éclairage simulé pour la tranchée d'Antony (en m)
$V(\lambda)$	Fonction de sensibilité relative spectrale photopique
$V_{mes}(\lambda)$	Fonction de sensibilité relative spectrale mésopique (varie en fonction des conditions lumineuses)
$V'(\lambda)$	Fonction de sensibilité relative spectrale scotopique
x	Première coordonnée chromatique du système CIE Yxy
X	Première des trois coordonnées trichromatiques
x_{base}	Facteur correctif du flux de l'installation de base
x_j	Facteur correctif à appliquer au flux de la rangée de luminaires j de l'installation de renfort (en cd/m^2)
y	Deuxième coordonnée chromatique du système CIE Yxy
Y	Deuxième des trois coordonnées trichromatiques
Z	Troisième des trois coordonnées trichromatiques
ζ	Angle entre la normale à la surface éblouissante considérée et le segment reliant le centre de l'œil du conducteur avec le centre de cette surface (en degrés).

Table des matières

Introduction	35
0.1 Contexte.....	35
0.1.1 Description de l'objet tunnel.....	35
0.1.2 La révolution des LEDs.....	36
0.1.3 Les fondamentaux de la vision	37
0.1.4 Rôle de l'éclairage	42
0.2 Problématique de la thèse	48
0.3 Démarche générale et contenu	48
Chapitre 1 : Méthodes de dimensionnement	51
1.1 Objectifs et démarche	51
1.1.1 Objectifs	51
1.1.2 Démarche	51
1.2 Origine des règles de dimensionnement.....	51
1.2.1 Zone d'entrée – adaptation spatiale.....	52
1.2.2 Zone de transition – adaptation temporelle.....	66
1.2.3 Section courante	72
1.3 Méthodes de dimensionnement actuelles.....	74
1.3.1 Eclairages diurne et nocturne - Distinction entre tunnels courts et tunnels longs 74	
1.3.2 Dimensionnement de l'éclairage diurne des tunnels longs.....	79
1.4 Pistes d'évolutions des règles de dimensionnement	93
1.4.1 Evolutions liées aux sources LEDs	93
1.4.2 Evolutions liées aux connaissances	103
1.5 Conclusion du chapitre	110
Chapitre 2 : Contenu spectral et visibilité	113
2.1 Objectifs et démarche	113
2.1.1 Contexte	113
2.1.2 Expériences sur la visibilité	114
2.1.3 Axes de recherche	115
2.2 Expérimentation	116
2.2.1 Objectifs	116

2.2.2	Matériel et méthode	119
2.3	Résultats expérimentaux.....	141
2.3.1	Caractéristiques des observateurs	141
2.3.2	Mesure et calcul du contraste cible / chaussée.....	141
2.3.3	Caractéristiques des spectres reçus par les observateurs.....	142
2.3.4	Traitement des résultats	144
2.3.5	Interprétation des résultats	150
2.3.6	Discussion	156
2.3.7	Limites et perspectives.....	164
2.4	Conclusion du chapitre	166
Chapitre 3 : Environnement de modélisation		169
3.1	Objectifs et démarche	169
3.1.1	Objectifs	169
3.1.2	Besoins	169
3.1.3	Démarche	169
3.2	Choix du logiciel de modélisation.....	170
3.2.1	Etat de l'art sur les logiciels existants	170
3.2.2	Présentation succincte du logiciel.....	171
3.3	Modélisation de la section courante.....	172
3.3.1	Caractérisation géométrique et photométrique de la maquette de tunnel ...	172
3.3.2	Comparaison avec les résultats de simulation.....	190
3.4	Modélisation des luminances de voile	211
3.4.1	Présentation du site et du dispositif	212
3.4.2	Prise en compte du climat lumineux.....	215
3.4.3	Comparaison des résultats de simulation avec les données CAMEL.....	225
3.5	Conclusion du chapitre	233
Chapitre 4 : Scénarios d'éclairage intelligent		237
4.1	Objectifs et démarche	237
4.1.1	Objectif	237
4.1.2	Démarche	237
4.1.3	Tranchée couverte d'Antony.....	237
4.2	Pistes de réflexion sur l'éclairage intelligent.....	238

4.2.1	Asservissement aux conditions de luminosité extérieure	238
4.2.2	Asservissement au trafic	239
4.2.3	Asservissement à l'état du sol.....	239
4.2.4	Application du modèle dynamique	240
4.3	Scénarios d'éclairage testés	262
4.3.1	Présentation des scénarios et hypothèses associées	262
4.3.2	Résultats obtenus.....	265
4.3.3	Discussion	276
4.4	Conclusion du chapitre	281
Conclusion		283
Bibliographie		287
Annexes		299

Table des figures

Figure 0-1 Courbes de sensibilité spectrale relative des 4 types connus de photorécepteurs de l'œil humain (les longueurs d'onde correspondant aux pics de sensibilité sont indiquées) ...	37
Figure 0-2 Distribution typique des cônes et des bâtonnets dans la rétine humaine (Mazzocco 2017).....	38
Figure 0-3 Découpage d'un tunnel en zones d'éclairage, présentation du profil de variation typique des luminances établi par la CIE pour résoudre les problèmes d'adaptations spatiale et temporelle en pleine journée	43
Figure 0-4 Comparaison des contrastes négatifs obtenus pour une installation symétrique et une installation contre-flux offrant des conditions de visibilité identiques (BSI 2016).....	45
Figure 1-1 Diagramme polaire d'Adrian (CIE 88 2004)	56
Figure 1-2 Luminance requise en zone d'entrée pour que la cible soit visible pour différentes valeurs de contraste et différentes valeurs de luminances de voile L_{seq} (iso-valeurs L_{seq}) (cible de 10' d'angle) (Adrian 1976)	60
Figure 1-3 Luminance requise en zone d'entrée pour que la cible soit visible pour différentes valeurs de contraste et différentes valeurs de luminances de voile L_{seq} (iso-valeurs de contraste) (cible de 10' d'angle) (Adrian 1976)	60
Figure 1-4 Profils de décroissance de luminance établis par De Boer, Schreuder, Kabayama et Mäder et Fuchs pour assurer l'adaptation temporelle des usagers (Bommel 2014)	67
Figure 1-5 Profils de décroissance de luminance admissibles établis par Kabayama (CETU 1998)	68
Figure 1-6 Logarithme des seuils de contraste dynamique et statique avant et après une entrée de tunnel en fonction du temps de parcours. La transition de luminance se fait de 4000 cd/m ² à 1 cd/m ² . La courbe pleine correspond aux tests dynamiques et la courbe pointillée aux tests statiques (Bourdy et al. 1987)	70
Figure 1-7 Profils de décroissance de luminance établis par De Boer, Schreuder, Kabayama, Mäder et Fuchs et par la CIE pour assurer l'adaptation temporelle des usagers (Bommel 2014)	71
Figure 1-8 Profils de décroissance de luminance établis par De Boer, Schreuder, la CIE et le CETU pour assurer l'adaptation temporelle des usagers.....	72
Figure 1-9 Arbre de décision de la CIE pour l'éclairage des tunnels en fonction de leur longueur (CIE 88 2004)	75
Figure 1-10 (1) Principe de calcul du LTP ; (2) Objet critique utilisé par la méthode dans le cas d'un trafic motorisé.....	76
Figure 1-11 Arbre de décision de la méthode CETU pour les tunnels interurbains bidirectionnels à fort trafic ou à vitesse importante (CETU 2000)	78

Figure 1-12 Efficacités lumineuses en fonction de l'intensité de courant traversant le luminaire pour la gamme de luminaires Omnistar de la marque Comatelec Schröder triée par températures de couleur	94
Figure 1-13 Spectres, efficacités lumineuses, températures de couleur et durées de vie typiques des trois types de sources lumineuses les plus utilisées en tunnels (LED, sodium haute pression, tube fluorescent), sur les spectres sont aussi représentées les sensibilités spectrales de l'œil en vision photopique (V, cônes uniquement) et en vision scotopique (V', bâtonnets uniquement).....	95
Figure 1-14 Fonctions d'efficacité lumineuse spectrale photopique et scotopique. Les nombres indiqués donnent la longueur d'onde (en nm) correspondant à la sensibilité maximum de la courbe.....	103
Figure 1-15 Spectres et ratios S/P typiques d'une source LED "blanc froid", d'une source SHP et d'un tube fluorescent.....	106
Figure 1-16 Sensibilités spectrales relatives des photorécepteurs humains visuels et non visuels (CIE S 026 2018). Les nombres indiqués donnent la longueur d'onde (en nm) correspondant à la sensibilité maximum de la courbe.	108
Figure 1-17 Position des cellules ganglionnaires dans les différentes couches de la rétine (source : http://perceptioncouleurs.free.fr/lanatomie.htm)	109
Figure 2-1 Représentation graphique des coefficients de friction pour chaussée sèche et chaussée mouillée en fonction de la vitesse.....	120
Figure 2-2 Facteurs de réflexion spectraux des différents matériaux présents dans la maquette	123
Figure 2-3 Photographie de l'extérieur de la maquette, prise de vue depuis la position de l'observateur	124
Figure 2-4 (1) Photographie des 4 cibles utilisées dans l'expérience ; (2) Vue proche de la cible carrée dans le tunnel (photographie) ; (3) Vue depuis la position de l'observateur (photographie)	125
Figure 2-5 Dispositif expérimental. Les dimensions sont données pour la maquette à l'échelle 1/20 (les dimensions réelles théoriques sont données entre parenthèses)	125
Figure 2-6 Irradiance spectrale mesurée, sur la chaussée, juste devant la cible, pour chacune des 7 puces LEDs à puissance maximale	126
Figure 2-7 Niveaux de luminance de chaussée choisis par le panel d'expert pour caractériser les transitions d'état de visibilité de la cible pour la LED ambre et la LED blanche. Les flèches de couleur indiquent si les niveaux lumineux pour la LED ambre augmentent ou diminuent pour la série de données considérées. La série « Moyenne sens croissant » correspond à une moyenne arithmétique des résultats obtenus pour l'ambre et le blanc dans le sens croissant.	130
Figure 2-8 (1) Vue du dessous de la maquette, position de mesure du spectroradiomètre bouchée par le substitut en medium utilisé pendant les expériences ; (2) Vue de l'intérieur de	

la maquette depuis un orifice pratiqué dans le plafond, tête du spectroradiomètre équipée de son diffuseur et placée au niveau de la chaussée (point P) pour réaliser des mesures	134
Figure 2-9 Irradiance spectrale relative des 6 spectres à leur niveau maximal (#45), mesuré sur la chaussée, devant la cible (point P)	136
Figure 2-10 Rendu visuel des 6 spectres de l'expérience à l'intérieur de la maquette, pour le palier d'éclairement maximum	137
Figure 2-11 Temporisations pour un cycle de montée / descente	139
Figure 2-12 Résumé schématique du déroulement du passage d'un observateur	140
Figure 2-13 Luminance d'adaptation photopique (L_v , oeil) en fonction de la luminance de chaussée photopique (L_v , ch) pour les 5 seuils de visibilité et les 6 spectres étudiés	153
Figure 2-14 Ratios entre une valeur de α_{DER} oeil et sa valeur pour 2000 K LM, pour tous les spectres	154
Figure 2-15 Comparaison entre la luminance d'adaptation à laquelle les 5 seuils de visibilité ont été atteints par les observateurs pour les 6 spectres et les résultats présentés dans (Adrian 1987).....	155
Figure 2-16 Iso-valeurs du coefficient mésopique m , ratios S/P oeil des seuils de visibilité choisis par les observateurs pour les 6 spectres de l'expérience, en fonction de la luminance d'adaptation photopique correspondant au seuil de visibilité.....	157
Figure 2-17 Coefficient d'adaptation mésopique m pour les 5 seuils de visibilité et les 6 spectres étudiés	158
Figure 2-18 Moyennes et erreurs types des luminances de chaussée à mettre en œuvre après correction liée à l'impact du pare-brise (L_v , ch, pb) pour chaque seuil de visibilité et chaque température de couleur (LM et HM sont considérés simultanément). La significativité des résultats du test post hoc est indiquée (p -value < 0.001 (***) et p -value < 0.01 (**)). Les accolades indiquent les recommandations actuelles de la CIE (international), du CEN (Europe) et du CETU (France). Le rectangle gris indique la gamme de luminances que l'on pourrait recommander au vu de nos résultats.	163
Figure 3-1 Visualisation du modèle 3D de la maquette. (1) Représentation sous Sketchup. (2) Rendu visuel sous OCEAN avec les luminaires allumés. (3) Carte de luminance réalisée sous OCEAN. (4) Capteur d'éclairement montrant les valeurs obtenues sur la chaussée de la maquette.....	172
Figure 3-2 Dispositif expérimental. Les dimensions sont données pour la maquette à l'échelle 1/20 (les dimensions réelles théoriques sont données entre parenthèses)	173
Figure 3-3 Représentation schématique de la méthode de mesure d'une BRDF.....	174
Figure 3-4 Spectrogoniophotomètre "Banc REFLET". (1) Caisson de mesure et ordinateur de collecte des données. (2) Appareil de mesure (vue éloignée). (3) Appareil de mesure (vue proche).	175
Figure 3-5 Représentation schématique des zones de mesure prises en compte lors de la caractérisation des BRDF avec le Banc REFLET	176

Figure 3-6 Exemples de BRDF 3D des matériaux de la maquette, issus des mesures en intensité du Banc REFLET. Tous les graphiques sont donnés pour $\theta_{in} = -30^\circ$. (1) BRDF de la chaussée. (2) BRDF de la cible. (3) BRDF du plafond. (4) BRDF du piédroit.	178
Figure 3-7 Résumé de la méthode de correction des données spectrales issues des mesures du Banc REFLET	180
Figure 3-8 Exemples de BRDF 3D des matériaux de la maquette, issus des mesures spectrales du Banc REFLET. Tous les graphiques sont donnés pour $\theta_{in} = -30^\circ$ et $\lambda = 555 \text{ nm}$. (1) BRDF de la chaussée. (2) BRDF de la cible. (3) BRDF du plafond. (4) BRDF du piédroit.....	181
Figure 3-9 Dispositif de mesure de l'indicatrice d'intensité des LEDs	182
Figure 3-10 Schémas théorique et mesurés de l'intensité relative de la puce blanche	183
Figure 3-11 Représentation 3D de la distribution des intensités des sources dans la maquette, modélisée sous Dialux.....	184
Figure 3-12 Dispositif de mesure du flux des LEDs dans la maquette. (1) Vue du dessus de la maquette, la LED est placée sur l'orifice de la sphère d'Ulbricht située dans le tunnel. (2) Sphère d'Ulbricht à l'intérieur du tunnel pendant une mesure.....	185
Figure 3-13 Flux lumineux mesuré pour une seule LED pour les différents spectres utilisés dans l'expérience en fonction du palier d'éclairement choisi	185
Figure 3-14 Prise de vue des grilles de mesure à l'intérieur de la maquette avec un objectif Fish Eye	186
Figure 3-15 Grille de mesure théorique pour les mesures de luminance sur la chaussée de la maquette	187
Figure 3-16 Grille de mesure théorique pour les mesures de luminance sur le piédroit gauche de la maquette	187
Figure 3-17 Carte de luminance issue des fichiers de mesure LMK et représentée dans Matlab. Les points rouges donnent des exemples de points d'intersection de la grille de mesure...	188
Figure 3-18 Grille de mesure théorique pour les mesures d'éclairement sur la chaussée de la maquette	189
Figure 3-19 Dispositif de mesure d'éclairement sur la chaussée de la maquette. (1) Vue du dessus du dispositif. (2) Exemple de réalisation de mesure à l'intérieur de la maquette.....	190
Figure 3-20 Modélisation Sketchup de la maquette. (1) Vue extérieure du modèle 3D sous Sketchup. (2) Vue intérieure du modèle 3D sous Sketchup.	191
Figure 3-21 Représentation des différentes BRDF de chaussée sous OCEAN (source de lumière au zénith, avec le spectre de l'illuminant D65 de la CIE). (1) BRDF lambertienne ; (2) BRDF issue de la correction des mesures en intensité ; (3) BRDF issue de la correction des mesures spectrales.	193
Figure 3-22 Grille de mesure de l'éclairement théorique utilisée sous OCEAN	194
Figure 3-23 Résultat de simulation pour la grille de mesure de l'éclairement modélisée sous OCEAN	195

Figure 3-24 Profils d'éclairage longitudinaux pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 63 lm). La position des luminaires et la cible sont représentées. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-5.....	196
Figure 3-25 Profils d'éclairage transversaux pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 63 lm). La position des luminaires est représentée.	196
Figure 3-26 Profils d'éclairage longitudinaux pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 59 lm). La position des luminaires et la cible sont représentées. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-7.....	197
Figure 3-27 Profils d'éclairage longitudinaux pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 54 lm). La position des luminaires et la cible sont représentées. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-9.....	198
Figure 3-28 Comparaison des modèles de sinusoïdes obtenus pour les mesures réelles et pour les données simulées pour la ligne de mesure centrale	200
Figure 3-29 Comparaison des modèles de sinusoïdes obtenus pour les mesures réelles et pour les données simulées pour la ligne de mesure centrale sans prise en compte du coefficient a_0	201
Figure 3-30 Rendu visuel sous OCEAN pour les grilles de mesure en luminance de chaussée et de piédroit. Les points rouges indiquent les points de mesure de la grille de la chaussée pour une ligne transversale, les points verts indiquent les points de mesure de la grille du piédroit pour une ligne transversale.....	204
Figure 3-31 Exemple de résultats obtenus par simulation sous OCEAN pour le scénario 2000 K LM #45. (1) Rendu visuel pour la simulation avec les BRDF spectrales corrigées ; (2) Rendu visuel pour la simulation avec les BRDF en intensité corrigées ; (3) Rendu visuel pour la simulation avec les BRDF lambertiennes ; (4) Carte de luminance pour la simulation avec les BRDF spectrales corrigées ; (5) Carte de luminance pour la simulation avec les BRDF en intensité corrigées ; (6) Carte de luminance pour la simulation avec les BRDF lambertiennes.	205
Figure 3-32 Profils de luminance longitudinaux sur la chaussée pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN. La position des luminaires est représentée. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-18. .	207
Figure 3-33 Profils de luminance longitudinaux sur le piédroit gauche pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN. La position des luminaires est représentée. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-19.....	208
Figure 3-34 Photographie aérienne de la tranchée couverte du Noiret (Géoportail)	213

Figure 3-35 Modélisation Sketchup de la tranchée couverte du Noiret.....	213
Figure 3-36 Photographie du portail d'entrée de la tranchée couverte du Noiret depuis la position de CAMEL. Les parties colorées indiquent les éléments présents dans un cône de vision de 20° (angle total au sommet). Le bleu indique la portion de ciel, l'orange indique les portions de roche, le jaune indique la portion de portail d'entrée, le vert indique les portions d'herbe.	214
Figure 3-37 Schéma de séparation de la voûte céleste en 145 zones. Les zones oranges sont celles simulées en Figure 3-38, les zones vertes sont les zones vues directement dans le champ de vision de 20° de la caméra.	216
Figure 3-38 (1) Projection équirectangulaire de la zone 1 ; (2) Projection équirectangulaire de la zone 2 ; (3) Résultat de simulation sous OCEAN avec les images (1) et (2) passées en paramètre pour une caméra placée au niveau du sol et visant vers le zénith.	217
Figure 3-39 Exemple de rendu visuel obtenu sous OCEAN pour la tranchée couverte du Noiret, avec la zone 137 passée en paramètre	218
Figure 3-40 Schéma explicatif du changement d'angle à effectuer pour le calcul du L0 (voir définition dans l'équation [3-21])	223
Figure 3-41 Résumé de la méthode de calcul du L20 pour une image donnée.....	224
Figure 3-42 Exemples de cartes de luminance obtenues (résultats présentés dans Matlab) avec l'algorithme de calcul. (1) Conditions du 23/11/2019 à 12:08 (ciel couvert) ;(2) Conditions du 17/05/2020 à 12:08 (ciel bleu).....	225
Figure 3-43 Profil de luminance de voile L20 mesuré et simulé pour la journée du 03/03/2020 (nuageux + pic d'ensoleillement en fin de journée)	227
Figure 3-45 Profil de luminance de voile L_20 mesuré et simulé pour la journée du 18/03/2020 (ciel bleu + pic d'ensoleillement en fin de journée).....	227
Figure 3-46 Profil de luminance de voile L20 mesuré et simulé pour la journée du 06/05/2020 (nuageux).....	228
Figure 3-47 Représentation des zones de ciel 136, 137 et 138 telles que vues par la caméra sous OCEAN (paramètres finaux retenus pour la position de la caméra). Le cercle violet donne la zone de mesure du L20.....	229
Figure 3-48 Histogramme des luminances de voile L20 pour les données mesurées et simulées. Les données prises en compte sont celles pour lesquelles l'éclairement horizontal global est supérieur à 100 lx.	231
Figure 3-49 Effectifs cumulés décroissants des luminances de voile L20 pour les données mesurées et simulées. Les données prises en compte sont celles pour lesquelles l'éclairement horizontal global est supérieur à 100 lx.	231
Figure 3-50 Exemple de maillage de ciel plus fin prenant en compte un plus grand nombre de zones au niveau de la course du soleil (https://recherche.cstb.fr/fr/offres/expertises/eclairage/)	233
Figure 4-1 Photographie aérienne de la tranchée couverte d'Antony (Géoportail).....	238

Figure 4-2 Modèle Sketchup du site de la tranchée couverte d'Antony. Le tube étudié par la suite est le tube sud, circulé dans le sens est vers ouest.....	242
Figure 4-3 Plan de situation des stations de comptage SIRIUS pour le tunnel d'Antony	244
Figure 4-4 Conditions de trafic typiques pour une semaine complète au niveau de la tranchée couverte d'Antony (semaine du 4 au 10 mars 2019)	246
Figure 4-5 Répartition en catégories d'état du sol des données trihoraires collectées via SYNOP Orly	248
Figure 4-6 Courbe des fréquences cumulées croissantes des données de visibilité météorologiques sur l'année 2019 (données issues de SYNOP Orly)	248
Figure 4-7 Point de vue de la caméra utilisée pour l'évaluation des luminances de voile sur le tube sud de la tranchée couverte d'Antony. (1) Zone de ciel 139 allumée ; (2) Zone de ciel 109 allumée ; (3) Zone de ciel 80 allumée.	249
Figure 4-8 Schéma de décroissance de luminance typique adopté par la CIE pour les zones de renfort et de transition.....	252
Figure 4-9 Simulation OCEAN donnant les 137 zones de calcul utilisées pour l'évaluation des éclairagements sur la chaussée	253
Figure 4-10 Simulations OCEAN donnant les éclairagements sur la chaussée pour différentes rangées de luminaires allumées. (1) Première rangée pour le renfort de type 1 (voir Tableau 4-2) ;(2) Première rangée pour le renfort de type 2 ;(3) Première rangée pour le renfort de type 3.....	254
Figure 4-11 Simulations OCEAN donnant les éclairagements sur la chaussée pour l'installation de base allumée	255
Figure 4-12 Rendus visuels issus de simulations OCEAN pour différentes vues de la grille d'uniformité des luminances de chaussée utilisée. (1) Vue depuis l'entrée du tunnel ; (2) Vue proche ; (3) Zoom sur une portion de la grille : l'indice r désigne les « colonnes » et l'indice q désigne les « lignes ».....	259
Figure 4-13 Rendus visuels issus de simulations OCEAN avec différentes rangées de luminaires allumées. (1) Quatrième rangée pour le renfort de type 1 ; (2) Septième rangée pour le renfort de type 1 ; (3) Toutes les rangées pour l'installation de base.	259
Figure 4-14 Schéma résumé de l'algorithme de calcul du modèle dynamique.....	261
Figure 4-15 Profil de besoin de luminance de chaussée établi pour le dimensionnement (=profil maximum de besoin, l'installation ne peut pas aller au-delà).....	263
Figure 4-16 Profils de luminance de besoin et profils de luminance optimisés par le modèle dynamique à 07h08 et 13h08 le 14/05/2019 pour les 4 scénarios testés.....	266
Figure 4-17 Résultats de simulation OCEAN pour un ciel CIE de type 1 (ciel couvert, luminance zénithale de 5000 cd/m ²)	267
Figure 4-18 Facteurs de lumière du jour moyens sur chaque zone de calcul de la chaussée (voir Figure 4-9)	267

Figure 4-19 Exemples de profils de consommation de l'installation de renfort atypiques pour les journées du 6 et 13 février 2019 et du 22 octobre 2019. L'axe des ordonnées donne la consommation électrique en kWh et l'axe des abscisses donne l'heure d'hiver.....	268
Figure 4-20 Exemples de tracés journaliers pour les journées du 12, 13 et 19 mai 2019. (1) Eclairages horizontaux globaux et diffus (klx) ; (2) Consommations de l'installation de renfort (kWh) ; (3) Vitesse de trafic (km/h) ; (4) Etat du sol ; (5) Visibilité météorologique (km). L'axe des abscisses désigne l'heure d'hiver.	269
Figure 4-21 Consommations énergétiques mensuelles calculées pour l'installation de renfort sur les différents scénarios d'étude	271
Figure 4-22 Consommations énergétiques annuelles calculées pour l'installation de renfort sur les différents scénarios d'étude	272
Figure 4-23 Répartition des valeurs d'uniformité générale pour tous les quarts d'heure de l'année 2019 (le rectangle rouge indique des valeurs inférieures aux recommandations CETU, tandis que le rectangle vert indique des valeurs supérieures)	274
Figure 4-24 Répartition des valeurs d'uniformité longitudinale pour tous les quarts d'heure de l'année 2019 (le rectangle rouge indique des valeurs inférieures aux recommandations CETU, tandis que le rectangle vert indique des valeurs supérieures)	275
Figure 4-25 Médianes mensuelles des vitesses de véhicules pour les jours de la semaine sur l'année 2019 (les samedis et dimanches sont exclus)	277
Figure 4-26 Répartition des quarts d'heure de chaque mois en conditions de chaussée sèche ou de chaussée mouillée	278
Figure 4-27 Comparaison de profil de luminance optimisé par le modèle dynamique et d'un profil par paliers. La grille d'uniformité utilisée pour le calcul des uniformités générale et longitudinale est représentée. Les nombres violets donnent la luminance théorique du premier et du dernier point de la grille.....	280

Table des tableaux

Tableau 1-1 Limites angulaires des anneaux utilisés dans le diagramme polaire d'Adrian	55
Tableau 1-2 Besoins en éclairage artificiel en tunnels courts en fonction de la valeur de LTP mesurée.....	76
Tableau 1-3 Besoins en éclairage artificiel en tunnels courts en fonction du pourcentage de visibilité de l'objet critique (Pobjet désigne le pourcentage de la surface de l'objet pouvant être vue en contraste sur la sortie du tunnel)	77
Tableau 2-1 Dimensions de la maquette et de l'ouvrage théorique correspondant	121
Tableau 2-2 Echelle de visibilité utilisée dans l'expérience	128
Tableau 2-3 Contribution théorique de chaque puce de couleur à l'irradiance totale des 6 spectres	135
Tableau 2-4 TC, X, Y, Z, x, y, Rf et Ee, mel pour les 6 spectres à leur niveau maximal (#45) calculés à partir de l'irradiance spectrale mesurée sur la route, devant la cible (point P) ...	136
Tableau 2-5 Moyennes et écarts-types (ET) pour la température de couleur, x, y, Rf et les ratios S/P, sur tous les paliers d'éclairage de chacun des 6 spectres (mesures sur la chaussée devant la cible, au niveau du point P)	138
Tableau 2-6 Correspondance entre valeur calculée du d de Cohen et taille d'effet	145
Tableau 2-7 Variables ayant un impact sur le niveau de luminance de chaussée sélectionné par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité (p-value < 0.001 (***) et p-value < 0.01 (**))	148
Tableau 2-8 Omega 2 de Xu et d de Cohen calculés pour les variables et les modalités ayant un impact significatif sur les niveaux de luminance de chaussée sélectionné par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité.....	148
Tableau 2-9 Moyennes et erreurs types (ErT) des niveaux de luminance de chaussée sélectionnés par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité, sur les 6 spectres, pour les modalités "Montées" et " Descentes" séparées, puis moyennées. Erreur type (ErT) = Ecart-type divisé par la racine carrée du nombre d'observations	150
Tableau 2-10 Valeurs moyennes caractérisant les conditions de luminosité sélectionnées par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité de chaque spectre : Luminance de chaussée photopique (Lv, ch), ratio S/P du stimulus atteignant l'œil de l'observateur (S/Pœil), éclairage photopique au niveau de l'œil de l'observateur (Ev, oeil), luminance photopique équivalente uniforme de fond (Lv, oeil), luminance mésopique équivalente uniforme de fond (Lmes, oeil), coefficient d'adaptation du modèle mésopique de la CIE (m).....	151
Tableau 2-11 « Daylight Efficacy Ratios » α -opiques et ratios S/Pœil calculés à partir des mesures dans le plan de l'œil de l'observateur, pour chaque spectre.....	152
Tableau 2-12 Moyennes et erreurs types (ErT) des niveaux de luminance de chaussée sélectionné par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité, sur les 6 spectres, pour les	

modalités de la variable « Température de couleur », après correction liée à l'influence du pare-brise	161
Tableau 3-1 Liste des logiciels envisagés et vérification de leur compatibilité avec les besoins formulés	170
Tableau 3-2 Plages de mesure des différents angles permettant de caractériser la BRDF d'un matériau	176
Tableau 3-3 Comparaison des mesures avec les données fabricant, dans les plans longitudinal et transversal pour la puce blanche et la puce ambre.....	184
Tableau 3-4 Caractéristiques des sources de lumière utilisées pour produire les spectres de l'expérience	194
Tableau 3-5 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 63 lm).....	197
Tableau 3-6 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 63 lm).....	197
Tableau 3-7 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 59 lm).....	198
Tableau 3-8 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 59 lm).....	198
Tableau 3-9 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 54 lm).....	199
Tableau 3-10 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 54 lm).....	199
Tableau 3-11 Résumé des coefficients modélisant les sinusoides des profils d'éclairage longitudinaux. Le coefficient de corrélation de Pearson est indiqué. « MR » désigne les mesures réelles et « S » les résultats de simulation. « LC » désigne la ligne de mesure centrale et « LD » la ligne de mesure de droite.	199
Tableau 3-12 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 55.2 lm).....	202
Tableau 3-13 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 55.2 lm).....	202

Tableau 3-14 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairement longitudinaux (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 56.25 lm).....	202
Tableau 3-15 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 56.25 lm).....	202
Tableau 3-16 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairement longitudinaux (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 58.33 lm).....	203
Tableau 3-17 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 58.33 lm).....	203
Tableau 3-18 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils de luminance longitudinaux sur la chaussée	209
Tableau 3-19 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils de luminance longitudinaux sur le piédroit gauche.....	210
Tableau 3-20 Eclaircissements, luminances et facteurs de réflexion résultants pour chaque matériau présent à l'intérieur du cercle de vision de 20°	215
Tableau 3-21 Composition du fichier d'éclairage naturel final.....	218
Tableau 3-22 Evolutions des facteurs de réflexion passés en paramètre de la modélisation entre la première et la dernière version de simulation	226
Tableau 3-23 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les luminances de voile L20	232
Tableau 4-1 Facteurs de réflexion des surfaces du modèle 3D	242
Tableau 4-2 Caractéristiques des luminaires utilisés pour les simulations	243
Tableau 4-3 Codes pour l'état du sol tels que présentés dans les fichiers originaux	247
Tableau 4-4 Paramètres pris en compte pour le dimensionnement du profil de luminance de référence	262
Tableau 4-5 Résumé des écarts de consommations annuelles entre les différents scénarios d'étude pour l'installation de renfort	272
Tableau 4-6 Consommations énergétiques annuelles totales et écarts de consommations entre les différents scénarios d'étude	273
Tableau 4-7 Uniformités générales et longitudinales minimales, moyennes et maximales pour les 4 scénarios d'étude	275
Tableau 4-8 Recommandations CETU pour les uniformités générale et longitudinale pour les luminances de chaussée.....	276

Introduction

0.1 Contexte

0.1.1 Description de l'objet tunnel

Selon l'article R. 118-1-1 du code de la voirie routière, toute chaussée située sous un ouvrage de couverture doit être considérée comme un tunnel routier si les ouvertures vers l'extérieur représentent moins de 1 m² par mètre de chaussée et par voie de circulation. Cette définition implique donc directement la longueur de l'ouvrage, mais également l'existence éventuelle d'ouvertures disposées sur le côté de l'ouvrage : en effet, un ouvrage de couverture long présentant de grandes ouvertures régulières sur un de ses côtés ne sera pas considéré comme un tunnel routier du moment que ces ouvertures sont suffisamment importantes pour que le ratio évoqué précédemment soit supérieur à 1. Il est à noter que lorsqu'un ouvrage tombe dans la catégorie des tunnels routiers, il est alors considéré comme « présentant des risques particuliers pour la sécurité des personnes » (article R. 118-1-1 du code de la voirie routière) et des règles de sécurité spécifiques s'appliquent donc. La définition de tunnel routier donnée par la réglementation est à visée sécuritaire, puisque les ouvertures latérales pratiquées dans un ouvrage de couverture peuvent permettre l'évacuation des usagers en cas d'incident, ainsi que celle de fumées en cas d'incendie par exemple, ce qui explique que les réglementations plus strictes des tunnels en termes de sûreté des usagers ne s'appliquent pas à ce type d'ouvrage.

Les enjeux de sécurité pour les tunnels routiers ont notamment été mis en avant par plusieurs graves accidents survenus entre la fin des années 90 et le début des années 2000. L'incendie du tunnel du Mont-Blanc est évidemment le plus tristement célèbre d'entre eux. C'est donc à la suite de ces désastres matériels et humains que les réglementations sur les tunnels routiers se sont durcies, et ce pour tous les aspects techniques que recouvrent ces ouvrages. Ainsi, de nombreux guides techniques présentant les doctrines établies par le Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) ont été publiés à la suite de ces événements afin d'inciter les exploitants à renforcer la sécurité dans leurs ouvrages. Les domaines couverts par ces guides concernaient notamment l'évacuation des usagers, les équipements mis à disposition des services de secours, la ventilation ou encore l'éclairage.

Un retour d'expérience mené par le CETU sur 96 tunnels français de plus de 300 m a dénombré 19467 pannes, 4839 accidents et 177 incendies sur la période 2002 – 2011. Ces statistiques montrent que les risques restent présents malgré les améliorations des conditions de sécurité, et qu'il convient d'agir le plus possible en amont afin de les réduire.

Un autre aspect des tunnels routiers important du point de vue des exploitants est celui des consommations énergétiques. En effet, la mise en place de nombreux matériels destinés à la sécurité des usagers n'est pas sans impact sur les consommations électriques de l'ouvrage. Les installations de ventilation et d'éclairage sont notamment les deux plus gros postes de

dépenses énergétiques dans la plupart des ouvrages. La proportion de dépenses de chacun de ces deux postes est propre à chaque tunnel : il n'existe pas de tendance généralisable à l'ensemble des tunnels routiers français puisque cela dépendra fortement des besoins de chaque ouvrage en termes de ventilation et d'éclairage et que ces besoins sont indépendants l'un de l'autre. On peut tout de même affirmer que, hors ventilation, l'éclairage représente le poste de dépense énergétique le plus important dans la plupart des tunnels routiers français, lorsque ces derniers en sont équipés.

0.1.2 La révolution des LEDs

L'aspect sécuritaire est donc prépondérant en tunnel, notamment pour le dimensionnement de l'installation d'éclairage. Les économies d'énergie viennent dans un second temps et sont recherchées seulement une fois que la sécurité des usagers est assurée. Elles peuvent être atteintes notamment au moyen de nouvelles technologies offrant de meilleures performances et permettant de répondre aux besoins en éclairage sans nécessairement surdimensionner les niveaux lumineux fournis. Une de ces évolutions technologiques s'est imposée progressivement sur le marché de l'éclairage depuis 2010 : il s'agit des sources LEDs. Ces dernières sont aujourd'hui fortement présentes dans tous les domaines traitant d'éclairagisme, que ce soit en intérieur, en éclairage urbain, mais également en éclairage de tunnel.

Cette nouvelle technologie vient remplacer progressivement les sources jusqu'alors utilisées en tunnel et qualifiées de traditionnelles : les lampes Sodium Basse Pression et Haute Pression (SBP et SHP), et les tubes fluorescents. Les caractéristiques des LEDs sont très différentes de celles des sources traditionnelles et les concepteurs tentent d'en tirer parti afin de créer des installations d'éclairage plus performantes énergétiquement parlant. Il est à noter que l'efficacité lumineuse des LEDs est maintenant globalement supérieure à celle des sources SHP et des tubes fluorescents : cet aspect de la technologie à lui seul permet donc de réaliser des économies d'énergie par rapport aux sources traditionnelles. Les LEDs offrent en outre de nombreuses autres possibilités que ne peuvent fournir les sources traditionnelles :

- La forme et la taille des luminaires peuvent être manipulées autant que nécessaire du fait que ces derniers sont composés d'une multitude de puces LEDs qui peuvent être agencées à la convenance du concepteur.
- Le matériau utilisé pour l'optique des puces LEDs peut être modifié (nature et forme) afin d'ajuster l'indicatrice d'intensité finale des luminaires.
- Le flux lumineux des LEDs peut être gradé afin de répondre exactement aux besoins de luminance réels.
- Il est possible de créer une multitude de spectres lumineux différents avec ces sources.

C'est donc en jouant sur ces caractéristiques que les concepteurs pourront créer des installations sûres, confortables et économes en énergie.

La flexibilité du contenu spectral des sources LEDs est particulièrement intéressante afin d'optimiser la sollicitation des photorécepteurs de l'œil humain, qui seront présentés dans la section suivante.

0.1.3 Les fondamentaux de la vision

0.1.3.1 Types de vision / Photorécepteurs connus

Comme mentionné précédemment, l'optimisation énergétique des installations d'éclairage peut notamment passer par un ajustement du contenu spectral des sources afin de maximiser la sollicitation des photorécepteurs de l'œil humain. Cette opération permettra, à puissance rayonnée constante, d'obtenir une sensation de luminosité plus importante.

La vision humaine et plus particulièrement la perception de luminosité d'une source ou d'un objet est un processus complexe faisant intervenir différents photorécepteurs et cheminements neurobiologiques. Les photorécepteurs bien connus de l'œil humain sont au nombre de quatre : les cônes-S, les cônes-M, les cônes-L et les bâtonnets. Chacun d'entre eux possède une courbe de sensibilité spectrale propre (Figure 0-1). Les cônes-S sont les moins nombreux et ne représentent que 4 à 5% de l'ensemble des cônes. L'œil humain compte en moyenne entre 3 et 5 millions de cônes (Jonas, Schneider, et Naumann 1992; Curcio et al. 1990) qui se situent en grande majorité dans la fovéa, leur densité diminue au fur et à mesure que l'excentricité augmente. La quantité moyenne de bâtonnets par œil humain est, quant à elle, comprise entre 60 millions et 100 millions. Ces bâtonnets sont principalement situés en périphérie de la rétine, leur densité diminue à l'approche de la fovéa, cette dernière comprenant une zone d'environ 0,35 mm de diamètre sans bâtonnet (Curcio et al. 1990). Le maximum de densité est atteint sur un anneau elliptique orienté horizontalement et dont l'excentricité correspond à celle du centre de la tache aveugle de la rétine due à l'insertion du nerf optique. Lorsqu'on s'éloigne de cette ellipse pour atteindre la périphérie plus lointaine de la rétine, la densité de bâtonnets diminue à nouveau (voir Figure 0-2).

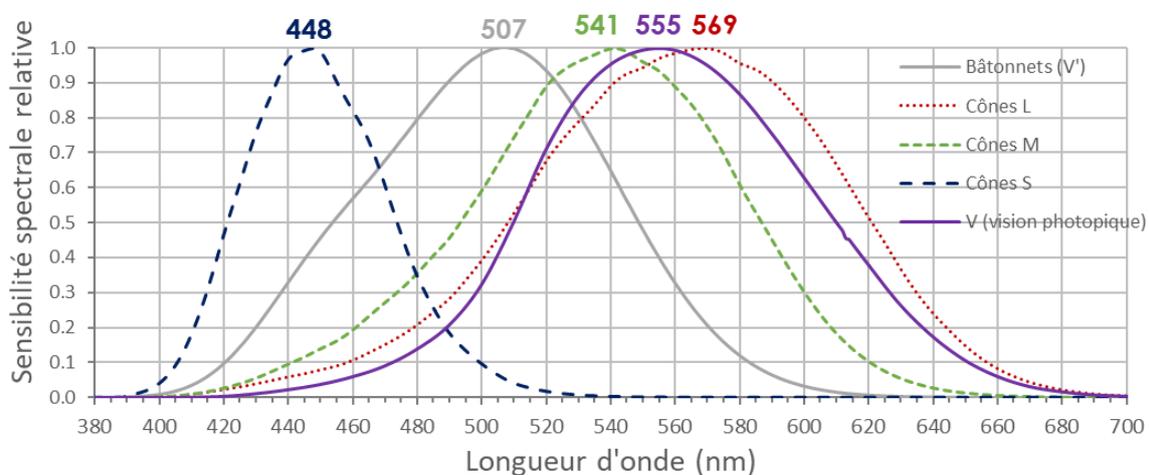


Figure 0-1 Courbes de sensibilité spectrale relative des 4 types connus de photorécepteurs de l'œil humain (les longueurs d'onde correspondant aux pics de sensibilité sont indiquées)

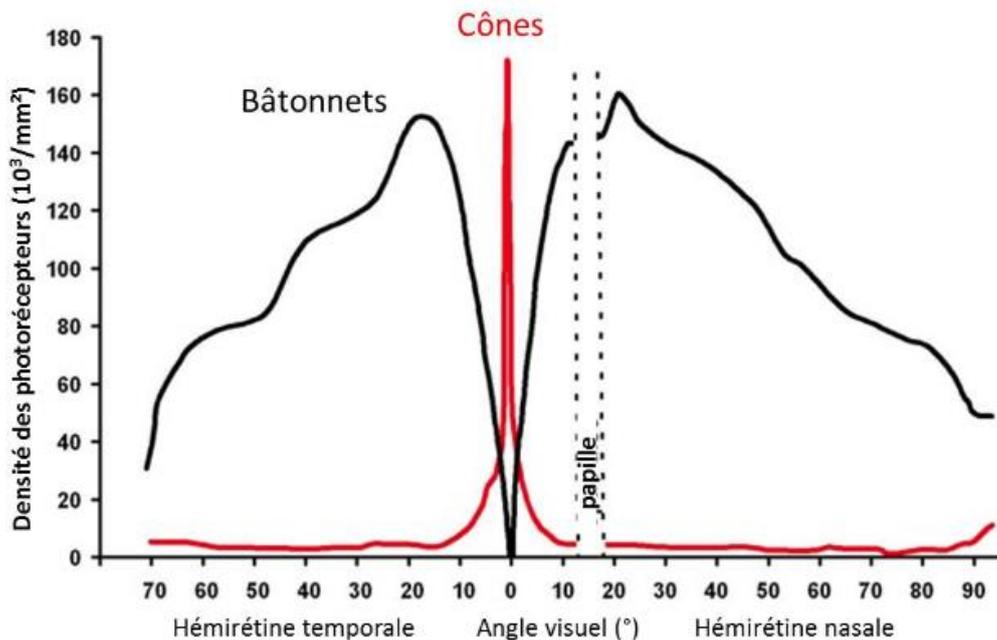


Figure 0-2 Distribution typique des cônes et des bâtonnets dans la rétine humaine (Mazzocco 2017)

Les cônes ne permettent pas de détecter les faibles niveaux de luminance, ils participent donc uniquement à la vision diurne et assurent la détection des couleurs. Le niveau de luminance à partir duquel ces photorécepteurs participent au processus de vision est compris entre $0,003 \text{ cd/m}^2$ (Hood et Finkelstein 1986) et $0,01 \text{ cd/m}^2$ (Eloholma et Halonen 2005). Les bâtonnets, à l'inverse, saturent à partir de certains niveaux de luminance ($3,2 \text{ cd/m}^2$ (Hood et Finkelstein 1986) ; 10 cd/m^2 (Eloholma et Halonen 2005)) et ne permettent de détecter que les images présentant une luminosité très faible. Ainsi, la vision diurne assurée par les cônes est qualifiée de photopique, tandis que la vision nocturne assurée par les bâtonnets est qualifiée de scotopique. Les valeurs mentionnées précédemment pour la saturation des bâtonnets et pour le seuil d'activation des cônes montrent que pour une certaine plage de valeurs de luminance, les deux types de photorécepteurs contribuent simultanément au processus de vision : ce phénomène faisant intervenir conjointement cônes et bâtonnets est appelé vision mésopique ; il sera détaillé dans la section **1.4.2.1 Vision mésopique**. Les grandeurs photométriques telles que la luminance sont calculées en tenant compte de la sensibilité de l'œil humain. Ainsi, en fonction des conditions lumineuses de la scène observée, le calcul de la luminance pourra se faire sous forme photopique, mésopique ou scotopique pour représenter le plus fidèlement possible la perception de l'observateur. L'équation [0-1] détaille le calcul de ces luminances photopiques et scotopiques.

$$L = K_m * \int_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} f(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad [0-1]$$

Avec L la luminance photopique ou scotopique (cd.m^{-2}) ;

K_m l'efficacité lumineuse spectrale maximale (égale à 683 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ pour les luminances photopiques et à 1699 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ pour les luminances scotopiques) ;

$f(\lambda)$ la fonction d'efficacité lumineuse spectrale photopique ou scotopique (notée $V(\lambda)$ pour la fonction photopique et $V'(\lambda)$ pour la fonction scotopique, voir Figure 0-1) ;

$L_e(\lambda)$ la radiance spectrale également appelée luminance énergétique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$).

De la même manière, les grandeurs photométriques telles que l'éclairement, le flux lumineux, ... peuvent être calculées à condition de disposer des grandeurs spectrales adéquates pour mener le calcul. Le rapport d'une grandeur scotopique sur une grandeur photopique (généralement le flux lumineux pour une source de lumière) permet de calculer le ratio S/P d'une source de lumière, qui est un indice qui va permettre de caractériser l'efficacité de cette dernière dans les domaines mésopique et scotopique.

Il est à noter que des photorécepteurs jusqu'alors connus pour leurs effets non visuels, les cellules ganglionnaires rétiniennes intrinsèquement photosensibles (CGRiPs), sont aujourd'hui étudiés pour leur potentiel impact sur le processus de vision. Ce « nouveau » photorécepteur sera également plus amplement présenté en section **1.4.2.2 Cellules à mélanopsine**.

Ainsi, en s'appuyant sur les sensibilités spectrales des différents photorécepteurs de l'œil humain et en ciblant ceux ayant le plus fort impact dans le processus de vision, les concepteurs peuvent ajuster le contenu spectral des sources LEDs afin de les rendre les plus efficaces possibles.

0.1.3.2 Fondamentaux sur la visibilité

Comme mentionné précédemment, le critère de sécurité est essentiel en tunnel, du fait que ces ouvrages ne permettent pas aux usagers d'évacuer facilement. Une des premiers objectifs recherchés est donc de prévenir l'accident. Cette philosophie de conception a donc imposé que le critère dimensionnant pour les installations d'éclairage soit la visibilité : le conducteur doit être capable de détecter, suffisamment en avance, d'éventuels obstacles sur la chaussée afin de pouvoir manœuvrer en conséquence sans mettre en danger les autres usagers. Cette approche du dimensionnement par la visibilité a donc fait l'objet de nombreuses études scientifiques qui ont cherché à décrypter les principaux phénomènes impactant les performances visuelles des conducteurs. Historiquement, les bases de la visibilité en éclairage routier classique (utilisées également pour l'éclairage des tunnels) ont été posées par Waldram (Waldram 1934), Weston (Weston 1945) et Blackwell (H. R. Blackwell 1959). Ces travaux ont notamment montré que la capacité des observateurs à réaliser une tâche visuelle donnée se basait sur la taille de la cible, la luminance d'adaptation du conducteur et le contraste de luminance de la cible avec son environnement de fond. Ces principes sont restés

d'actualité et constituent encore aujourd'hui les bases de la notion de visibilité au sens où on l'entend en éclairage routier. La taille de la cible correspond à une taille angulaire, puisque c'est le ressenti de l'observateur qui importe, et la luminance est calculée ou mesurée en photopique. Le contraste, en revanche, mérite d'être introduit ici et son expression mathématique est donnée ci-après par l'équation [0-2].

$$C_{int} = \frac{L_{obj_{int}} - L_{f_{int}}}{L_{f_{int}}} \quad [0-2]$$

Avec C_{int} le contraste intrinsèque entre un objet et son environnement de fond. La définition du contraste donnée par cette équation est appelée contraste de Weber.

$L_{obj_{int}}$ la luminance de l'objet / cible mesurée à proximité immédiate de celui-ci afin de limiter l'influence de facteurs extérieurs (en cd.m^{-2}) ;

$L_{f_{int}}$ la luminance de l'environnement de fond sur lequel la cible se détache mesurée à proximité immédiate de celui-ci (en cd.m^{-2}). L'environnement de fond considéré pour calculer le contraste dépend de la méthode de dimensionnement choisie (parfois, la luminance de chaussée est considérée comme une approximation correcte de la luminance de fond).

Cette expression met en évidence le fait que le contraste peut prendre deux plages de valeurs bien particulières : le résultat pouvant en effet être négatif ou positif. Ainsi, lorsque la luminance de cible est inférieure à la luminance de fond, le contraste est négatif et lorsque l'inverse est vrai, le contraste est positif. Généralement en tunnel, les obstacles seront vus en contraste positif sur les premiers mètres à l'intérieur de l'ouvrage, du fait que c'est la pénétration de la lumière naturelle qui permettra de les rendre visibles. En revanche, dès que ces obstacles se retrouveront dans une zone éclairée par les luminaires à l'intérieur du tunnel, ils seront vus en contraste négatif par les conducteurs. On peut conclure de cet état de fait qu'il existe nécessairement en entrée de tunnel une zone de mauvaise visibilité pendant la transition des valeurs de contrastes positives vers les valeurs négatives. Le dimensionnement de l'installation d'éclairage doit viser à limiter autant que faire se peut cette zone.

Il est à noter que l'approche choisie en éclairage routier (et en éclairage de tunnel) se base sur un contraste de luminance et est, par conséquent, achromatique. Cela signifie que le contraste dû aux différences de couleur entre la cible et son environnement de fond n'est pas pris en compte. Cette approche achromatique se justifie par deux points principaux : d'une part, les cibles rencontrées en tunnel présentent souvent des variations de gris et ne sont pas particulièrement colorées ; d'autre part, les premières expériences ayant posé les bases de la visibilité en éclairage routier ont été réalisées à une époque où les sources utilisées (Sodium Basse Pression notamment) présentaient des indices de rendu des couleurs très faibles (inférieurs à 15, généralement les fabricants n'appliquaient même pas l'indice de rendu des couleurs à ces sources) : l'approche chromatique n'était donc pas réellement pertinente. Aujourd'hui, avec l'émergence des sources LEDs, dont le spectre est façonnable, les sources utilisables en tunnel peuvent offrir des indices de rendu des couleurs bien plus élevés (Indice

de rendu des couleurs entre 70 et 90 pour la gamme OMNISTAR de Schreder pour exemple) que ceux des anciennes sources.

0.1.3.3 Dynamiques d'adaptation de l'œil humain

Les notions de visibilité utilisées en éclairage routier classique ont été adaptées pour le milieu des tunnels. Cependant, des conditions d'application particulières caractérisent ces ouvrages puisqu'ils sont éclairés de jour comme de nuit. Ainsi, l'éclairage de jour des tunnels introduit une problématique n'existant pas en éclairage routier classique : la nécessité d'accompagner l'adaptation de l'œil humain de niveaux lumineux élevés vers des niveaux plus faibles lors de l'entrée dans l'ouvrage. Ce problème d'adaptation vient complexifier l'approche de visibilité définie en éclairage routier classique puisqu'il impacte les niveaux de luminance et les contrastes perçus par l'observateur, altérant par la même occasion sa capacité à discerner d'éventuels obstacles sur la chaussée.

Deux phénomènes d'adaptation distincts furent mis en évidence par les chercheurs : l'adaptation spatiale et l'adaptation temporelle. L'application du premier phénomène aux tunnels fut détaillée par Blackwell (CIE 19 1972), puis par Adrian (Adrian 1989), tandis que le second phénomène fut investigué par De Boer et Schreuder (Schreuder 1966).

L'adaptation spatiale est liée à la forte différence de niveaux lumineux entre l'environnement extérieur et l'intérieur du tunnel. L'œil de l'observateur étant adapté à des luminances très élevées en route d'accès, il ne peut distinguer des obstacles potentiels sur la chaussée à l'intérieur du tunnel que si les niveaux de luminance fournis par l'installation d'éclairage permettent de contrebalancer l'éblouissement dû à l'environnement extérieur. Les niveaux de luminance mis en place dans le tunnel en zone d'entrée pour l'éclairage de jour doivent donc être bien plus élevés que ceux utilisés pour l'éclairage routier classique (des ordres de grandeur sont donnés dans la Figure 0-3).

L'adaptation temporelle est liée directement au délai nécessaire à l'œil humain pour retrouver des conditions de visibilité correctes après avoir subi une forte baisse (zone d'entrée) des niveaux de luminance dans son champ de vision, ou inversement après avoir subi une forte augmentation (zone de sortie). En se servant de cette dynamique d'adaptation inhérente à l'œil humain, il est possible de baisser progressivement les niveaux fournis initialement, tout en assurant l'adaptation spatiale, afin de ne pas surdimensionner inutilement l'installation d'éclairage.

Ces deux phénomènes d'adaptation doivent donc être résolus afin d'éviter que le conducteur ne rencontre des zones de mauvaise visibilité (et donc plus susceptibles de provoquer des accidents) dans le tunnel.

0.1.4 Rôle de l'éclairage

0.1.4.1 Enjeux de l'éclairage diurne

Comme mentionné précédemment, les enjeux liés à l'éclairage diurne des tunnels vont principalement consister à résoudre les problèmes d'adaptations spatiale et temporelle des usagers tout en limitant au maximum les consommations électriques associées. Pour ce faire, des règles de dimensionnement ont été établies par les organismes en charge des recommandations sur l'éclairage des tunnels, ces derniers s'appuyant sur de nombreuses expériences menées principalement dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Ces règles diffèrent quelque peu en fonction de l'organisme considéré, mais on retrouve tout de même des points communs à chacune d'entre elles. La résolution du double problème d'adaptation a amené à découper les tunnels routiers en différentes zones du point de vue de l'éclairage. En pratique et pour la plupart des organismes à l'origine des recommandations, l'ouvrage comporte 4 zones distinctes :

- Une zone d'entrée dans laquelle les niveaux lumineux vont être les plus élevés afin de résoudre le problème d'adaptation spatiale ;
- Une zone de transition dans laquelle les niveaux vont décroître progressivement de manière à respecter les conditions d'adaptation temporelle de l'œil humain ;
- Une zone de section courante, apparaissant uniquement une fois que les problèmes d'adaptations spatiale et temporelle ont été résolus, et pour laquelle les niveaux de luminance seront constants et de l'ordre de quelques candelas par mètre carré ;
- Une zone de sortie pour laquelle les niveaux de luminance augmenteront petit à petit afin de limiter le risque d'éblouissement des conducteurs lorsqu'ils quitteront l'ouvrage.

Il est à noter que cette approche est celle utilisée par la plupart des organismes de recommandation, certaines petites modifications sont néanmoins observables pour quelques entités. Pour exemple, le CETU ne considère pas séparément les zones d'entrée et de transition censées résoudre respectivement les problèmes d'adaptations spatiale et temporelle, mais une seule zone dans laquelle les problèmes d'adaptation seront traités simultanément (voir section **1.3.2 Dimensionnement de l'éclairage diurne des tunnels longs**). Cette zone est appelée zone d'entrée ou zone de renforcement. Il est également notable que la zone de sortie n'existe pas toujours dans les tunnels et dépend principalement du potentiel risque d'éblouissement à la sortie de l'ouvrage (qui est généralement lié à son orientation).

Le découpage « classique » des tunnels routiers et le profil de luminance de chaussée typique proposé par un des organismes réalisant les recommandations, la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), est résumé en Figure 0-3.

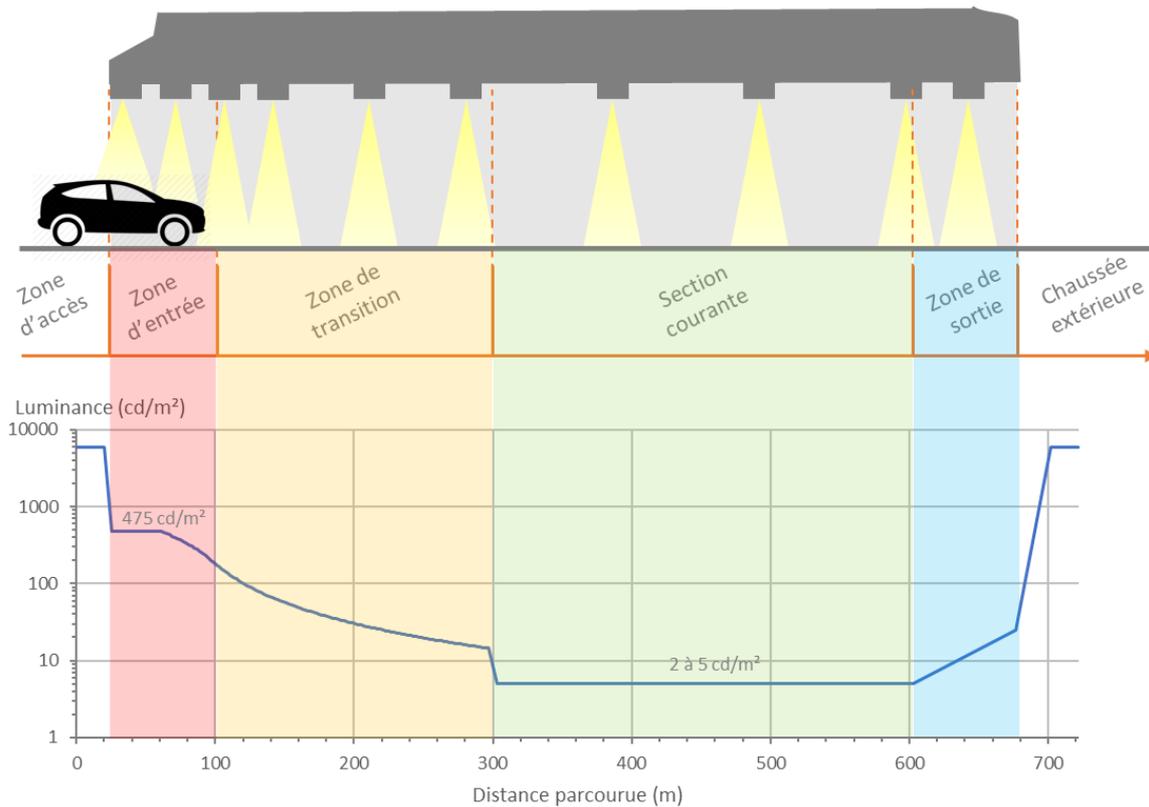


Figure 0-3 Découpage d'un tunnel en zones d'éclairage, présentation du profil de variation typique des luminances établi par la CIE pour résoudre les problèmes d'adaptations spatiale et temporelle en pleine journée

Au vu de cette segmentation en zones et des contraintes de niveaux de luminance associées, toutes les sources utilisées en tunnel ne sont pas forcément adaptées à chacune des zones d'éclairage diurne. Ainsi, les tubes fluorescents ne peuvent notamment pas être utilisés en zone d'entrée et de transition, car leur forme longiligne et la grande longueur de chacun des luminaires ne permet pas d'établir une implantation en voûte suffisamment resserrée pour obtenir les niveaux de luminance nécessaires sur la chaussée. Ils sont en revanche particulièrement efficaces en section courante pour conserver de bonnes uniformités d'éclairage et assurer un guidage visuel optimal pour les conducteurs. Les sources SHP peuvent être utilisées dans n'importe quelle zone grâce à leur compacité et leur efficacité lumineuse importante. C'est également le cas des LEDs.

Ce découpage du tunnel en zone d'éclairage impose d'utiliser des installations distinctes pour répondre aux enjeux de chacune d'entre elles. Le CETU considère ainsi deux installations d'éclairage principales : l'installation de renfort, qui va permettre d'atteindre les niveaux de luminance de chaussée requis en zone d'entrée et de transition, et l'installation de base qui va permettre de maintenir les niveaux en section courante et qui assurera également l'éclairage nocturne de l'ouvrage.

0.1.4.2 Types d'installations

Afin de répondre aux problèmes d'adaptations spatiale et temporelle, les tunnels sont donc généralement découpés en zones d'éclairage. Une fois ce découpage réalisé, la manière d'atteindre des niveaux de visibilité suffisants pour assurer la sécurité des conducteurs n'est pas unique. En effet, comme mentionné précédemment, la capacité d'un conducteur à détecter une cible va principalement dépendre de la taille angulaire de cette dernière, de la luminance d'adaptation et du contraste de luminance avec son environnement de fond. Il est donc possible de jouer sur ces paramètres afin de concevoir différentes méthodes d'éclairage offrant des conditions de visibilité similaires. La taille angulaire de la cible va dépendre de la distance d'observation et de la taille intrinsèque de l'objet. En pratique, les études successives menées sur le domaine de l'éclairage routier ont permis de déterminer une cible standard utilisée dans la plupart des études de dimensionnement des installations d'éclairage : le choix d'un obstacle carré de 20 cm de côté a été retenu (il existe néanmoins des variations de taille de la cible pour certaines études). Pour ce qui est de la distance d'observation, elle est généralement égale à la distance d'arrêt du conducteur sur route mouillée pour des questions de sécurité (le calcul de la distance d'arrêt sera présenté plus tard dans le document, à la section **2.2.2.1 Maquette**). Le paramètre de taille angulaire de la cible ne peut donc être modifié en jouant sur les méthodes d'éclairage employées (pour exemple : la taille angulaire de la cible standard en éclairage routier pour une vitesse de 70 km/h, soit une distance d'arrêt d'environ 74 m, est de 0.15°). En revanche, les paramètres de luminance d'adaptation et de contraste avec l'environnement de fond sont tous deux directement dépendant de la méthode d'éclairage utilisée. C'est en se basant sur cette constatation que les fabricants de luminaires développèrent, dans les années 90, des sources présentant une photométrie très différente de celle utilisée jusqu'alors en éclairage routier et en tunnel. Le principe de ces sources, appelées « luminaires à contre-flux » ou à « mobilisation de contraste », est d'envoyer une grande partie du flux lumineux en direction de l'automobiliste, contrairement aux sources classiques, dites « symétriques » et présentant une distribution de flux éponyme. Cette distribution particulière du flux lumineux émis par les sources à contre-flux permet de créer un contraste négatif accentué de la cible. En effet, en considérant des conditions de luminance identiques au niveau de la chaussée pour une installation symétrique et pour une installation contre-flux, la quantité de flux envoyée sur la surface de la cible visible par le conducteur sera beaucoup plus faible pour l'installation contre-flux que pour l'installation symétrique : la luminance de cible sera donc également plus faible et le contraste négatif s'en trouvera accentué. La Figure 0-4 présente un schéma récapitulatif de ce phénomène.

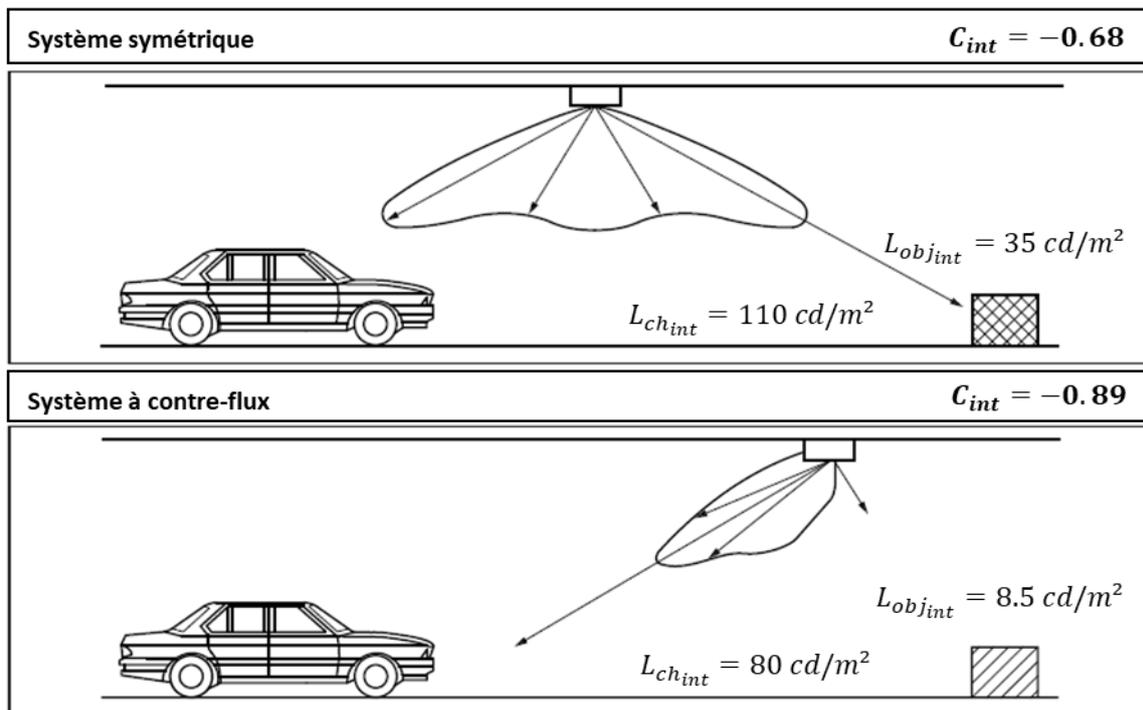


Figure 0-4 Comparaison des contrastes négatifs obtenus pour une installation symétrique et une installation contre-flux offrant des conditions de visibilité identiques (BSI 2016)

Les installations contre-flux permettent donc de réduire les niveaux de luminance de chaussée tout en gardant des conditions de visibilité similaires à celles offertes par les installations symétriques. Cette baisse des niveaux de luminance est obtenue en diminuant les flux générés par les sources de lumière et s'accompagne donc d'une diminution des consommations énergétiques. Il est à noter que ces dispositifs contre-flux étaient originellement utilisés pour des sources SHP (la forme des tubes fluorescents ne se prêtant guère à l'exercice) et demandaient de mettre en place des systèmes de réflexion particuliers dans le luminaire : leur conception était donc plus coûteuse que celle de luminaires plus classiques. C'est pour cette raison que les installations contre-flux n'ont été mises en place que dans les zones de tunnel où elles permettaient de réaliser des économies d'énergie importantes, c'est-à-dire en zones d'entrée et de transition dans lesquelles les niveaux de luminance de chaussée sont les plus élevés. On ne trouve donc pas de luminaires contre-flux en section courante (ni en zone de sortie quand elle existe) aujourd'hui. De la même façon, ces luminaires ne fonctionnent que de jour et ne sont pas utilisés la nuit.

Ces premiers développements visant à économiser de l'énergie sur les installations d'éclairage mises en place en tunnel se sont faits en s'appuyant sur les possibilités technologiques de l'époque. Aujourd'hui la LED et les autres développements qui l'accompagnent apportent leur lot de nouvelles possibilités pour optimiser encore les solutions d'éclairage utilisées en tunnel.

0.1.4.3 Evolutions technologiques du matériel

Comme mentionné précédemment, la technologie LED et ses propriétés très différentes de celles des sources jusqu'alors utilisées requestionnent les méthodes de dimensionnement utilisées en tunnel aujourd'hui. On a déjà vu que le spectre de ces sources pouvait être façonné afin de correspondre au mieux à la sensibilité visuelle du conducteur pour les conditions de luminosité qu'il rencontre. Les deux autres propriétés inhérentes aux LEDs et sur lesquelles les concepteurs commencent à s'appuyer pour réaliser des économies d'énergie sont la forme adaptable des luminaires LEDs et la capacité de la source à grader son flux lumineux.

Les luminaires LEDs sont composés d'une multitude de sources ponctuelles et leur forme peut donc être modifiée au gré des agencements de ces petites sources (pour exemple, les luminaires de la gamme OMNISTAR de Schröder peuvent être composés de 72 à 240 LEDs, les TFLEX peuvent être composés de 20 à 240 LEDs). Cette caractéristique de la technologie LED peut notamment permettre de créer des luminaires extrêmement compacts. Cette compacité jusqu'alors inexistante chez les sources traditionnelles requestionne les synergies existantes entre les critères d'évaluation de la qualité de l'éclairage. Cet aspect sera plus amplement détaillé en section **1.4.1.1 Caractéristiques intrinsèques des sources LEDs**.

De plus, le flux des sources LEDs peut être gradé de manière relativement précise, contrairement aux sources traditionnelles. Cette caractéristique peut permettre de réaliser des économies d'énergie en s'appuyant sur deux points propres aux zones d'entrée et de transition. Tout d'abord, le problème d'adaptation spatiale subi par les conducteurs est principalement lié à l'éblouissement qu'ils subissent à cause des niveaux de luminance qu'ils rencontrent en zone d'accès (portion de route à l'air libre) précédant l'entrée dans le tunnel. Ainsi, lorsque la luminosité extérieure baisse, les niveaux de luminance mis en place en zone d'entrée pour résoudre le problème d'adaptation spatiale des usagers deviennent surdimensionnés. Les sources traditionnelles (notamment les sources SHP) offrent peu de possibilités d'ajustement des niveaux de luminance à l'intérieur de l'ouvrage puisque leur flux lumineux est difficilement gradable. La seule méthode envisageable est donc l'allumage / extinction des sources, qui ne permet de créer que deux ou trois régimes d'éclairage différents. En pratique, ces sources sont pilotées par un luminancemètre placé en amont du tunnel et visant le portail d'entrée de l'ouvrage. En fonction des valeurs de luminance qu'il mesure, le régime d'éclairage permettant d'assurer des niveaux de luminance supérieurs aux besoins liés aux conditions de luminosité extérieure, est mis en place dans le tunnel. Les installations d'éclairage équipées de sources traditionnelles en zone d'entrée génèrent donc la plupart du temps des niveaux de luminance supérieurs aux besoins réels des usagers. Les sources LEDs permettent d'ajuster les flux lumineux de manière fine et de limiter ainsi les dépenses énergétiques inutiles. Dans un second temps, on a vu que les performances visuelles des conducteurs dépendaient principalement de trois facteurs prépondérants. Parmi eux, on compte la taille angulaire de la cible qui est indirectement liée à la vitesse du conducteur (la distance d'observation de l'objet cible étant égale à la distance d'arrêt). Ainsi, la modification

de la vitesse du trafic dans le tunnel change radicalement les conditions d'observation des conducteurs : plus la vitesse et, par conséquent, la distance d'arrêt diminue, plus la taille angulaire de la cible sera importante dans la tâche visuelle que doit accomplir le conducteur. Cette augmentation de la taille de la cible facilite la détection de cette dernière et les niveaux de luminance de chaussée peuvent donc être diminués sans impacter les performances visuelles des conducteurs. Ainsi, les tunnels soumis à des congestions de trafic récurrentes ont la plupart du temps des conditions d'éclairage surdimensionnées au vu de la vitesse réelle observée dans l'ouvrage. C'est pour cette raison que les concepteurs commencent aujourd'hui à s'appuyer sur la possibilité de gradation du flux lumineux des sources LEDs pour tenter d'asservir celui-ci à la vitesse mesurée (à l'aide de capteurs) dans l'ouvrage.

Les concepteurs essaient de tirer parti de toutes ces évolutions technologiques afin d'obtenir des économies d'énergie les plus importantes possibles. Les consommations des installations d'éclairage étant bien plus élevées lors du fonctionnement diurne que lors du fonctionnement nocturne, la plupart des réflexions sur de nouvelles méthodes d'éclairage se sont tournées vers la première composante, au détriment de la seconde. Cependant, l'éclairage nocturne des tunnels routiers présente également des enjeux de sécurité et de consommations énergétiques non négligeables.

0.1.4.4 Enjeux de l'éclairage nocturne

Pour finir, les enjeux liés à l'éclairage nocturne des tunnels correspondent globalement à ceux de l'éclairage routier classique. Généralement, l'éclairage au sein du tunnel sera dépendant de celui de la route d'accès (mise en place des mêmes niveaux de luminance que ceux observés sur la chaussée avant d'entrer dans le tunnel). Lorsque la route d'accès n'est pas éclairée, un éclairage minimal est tout de même recommandé dans le tunnel afin de souligner le point singulier que constitue l'ouvrage sur la route. Il est à noter que l'installation de renfort est éteinte la nuit : les niveaux en zone d'entrée et de transition sont donc les mêmes qu'en section courante et sont fournis par l'installation de base, puisqu'il n'existe plus de problèmes d'adaptations spatiale et temporelle. On a ainsi des niveaux de luminance de chaussée constants tout au long de l'ouvrage.

Le basculement entre éclairage diurne et éclairage nocturne est généralement géré par une cellule photoélectrique placée à l'horizontal aux abords du tunnel dans une zone non impactée par les phares des véhicules. Lorsque la valeur d'éclairement mesurée par cette cellule passe en dessous d'une certaine limite (généralement de l'ordre de 50 à 100 lux pour le CETU) pendant un temps déterminé, l'éclairage du tunnel passe en mode nuit. Il repasse ensuite en mode jour lorsque la valeur d'éclairement dépasse à nouveau cette limite.

Toutes les constatations présentées précédemment, et notamment les apports de la technologie LED, nous amènent à questionner la manière d'éclairer les tunnels routiers

aujourd'hui. De nombreuses pistes semblent en effet indiquer que des améliorations sont possibles en termes de sécurité, de confort et de dépenses énergétiques.

0.2 Problématique de la thèse

La partie contexte a notamment permis de mettre en exergue les différences entre sources traditionnelles et sources LEDs. Ces nombreuses disparités nous amènent à nous demander sur quelles caractéristiques les plus prometteuses des LEDs les concepteurs pourraient s'appuyer pour améliorer l'éclairage des tunnels routiers en termes de confort, de sécurité et de consommations énergétiques ?

D'un point de vue plus applicatif, nous pouvons nous poser la question suivante : en quoi cette technologie et les modifications qu'elle apporte vont impacter les règles de dimensionnement utilisées actuellement en tunnel ?

Enfin, une fois ces deux interrogations soulevées, un dernier questionnement vient logiquement s'imposer à nous : est-il possible de recommander de nouveaux scénarios d'éclairage tenant compte des caractéristiques de la LED et permettant d'optimiser, de jour comme de nuit, le confort et les dépenses énergétiques en tunnel, tout en assurant les conditions de sécurité ?

0.3 Démarche générale et contenu

Afin de répondre aux problématiques exposées précédemment, le présent manuscrit s'articulera en 4 parties distinctes. Dans un premier temps, les méthodes de dimensionnement utilisées actuellement par différents organismes (échelle internationale, européenne et nationale) seront présentées, ainsi que l'impact vraisemblable qu'auront les LEDs sur elles. Pour ce faire, les origines historiques de ces règles seront retracées afin notamment d'analyser les conditions d'expérimentation utilisées et d'attester de leur validité pour des sources LEDs. Les évolutions récentes de technologie et les découvertes sur le système visuel humain seront également analysées afin de voir s'il est possible d'en tirer parti en s'appuyant sur les caractéristiques intrinsèques des LEDs.

Ensuite, un focus plus particulier sera mené concernant l'impact du spectre des sources de lumière sur les performances visuelles des conducteurs. Cette partie s'appuiera notamment sur les résultats d'une expérimentation de visibilité réalisée sur maquette en laboratoire. L'expérience sera plutôt tournée vers des conditions d'éclairage proches de celles mises en place en section courante de tunnel. L'objectif sera notamment de déterminer si le passage de sources SHP à des sources LEDs a un impact sur les performances visuelles des conducteurs, et de découvrir s'il est possible d'optimiser les spectres de ces dernières pour réaliser des économies d'énergie tout en garantissant la sécurité des usagers.

Le travail se tournera ensuite vers une phase de modélisation, ayant pour objectif de créer un outil de simulation dynamique permettant d'apprécier les performances de différentes installations d'éclairage d'un point de vue sécuritaire, mais également énergétique. Cette partie consistera à développer et caler le modèle grâce à des mesures réelles. Ce calage se fera en deux temps. Tout d'abord, la validation de l'éclairage artificiel de section courante sera réalisée en comparant des résultats de simulation avec des données issues d'une campagne de mesures effectuées sur la maquette utilisée lors de l'expérience de visibilité. Ensuite, le calage de la prise en compte du climat et de l'éclairage naturel en zones d'accès et d'entrée du tunnel, se fera en comparant des résultats de simulation avec des données de terrain collectées à la tranchée couverte du Noiret (située en Haute-Savoie) grâce à un appareil dédié utilisé par le CETU.

Enfin, cet environnement de simulation sera mis à profit dans une ultime partie afin de développer des scénarios d'éclairage intelligent. Ces scénarios devront permettre de tirer profit des avantages technologiques des sources LEDs afin de concevoir des installations d'éclairage les plus efficaces possibles en termes de dépenses énergétiques, tout en garantissant la sécurité des usagers. Cette partie s'appuiera sur un exemple de tunnel qui sera modélisé pour être importé dans l'outil de simulation dynamique. En l'occurrence, le choix retenu sera celui du tube non exploité de la tranchée couverte d'Antony qui est le support du projet DELTA (un tunnel expérimental dans lequel des solutions d'éclairage innovantes seront testées à partir de 2023). 4 scénarios différents seront évalués : un scénario de référence reprenant les règles de pilotage des installations d'éclairage actuellement dispensées par le CETU, un scénario utilisant un asservissement parfait aux conditions de luminosité extérieure, un scénario avec un asservissement parfait aux conditions de luminosité extérieure, ainsi qu'aux conditions de trafic, et enfin un scénario asservi aux conditions de luminosité, au trafic, et aux conditions de sol (chaussée sèche ou mouillée). Les résultats obtenus pour ces scénarios, notamment en termes de consommations énergétiques, seront ensuite comparés entre eux afin de pouvoir déterminer des ordres de grandeurs pour les économies d'énergie atteignables en mettant en place les asservissements testés.

Chapitre 1 : Méthodes de dimensionnement

1.1 Objectifs et démarche

1.1.1 Objectifs

L'objectif de ce premier chapitre est de recenser les méthodes de dimensionnement de l'éclairage actuellement utilisées en tunnel. Dans un second temps, il s'agira de déterminer si la généralisation des sources LEDs sur le marché de l'éclairage des tunnels est susceptible d'entraîner une modification de ces règles.

1.1.2 Démarche

Afin de limiter le périmètre de recherche, seules les règles établies par 3 organismes seront étudiées dans ce chapitre : la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage, échelle internationale), le CEN (Comité Européen de Normalisation, échelle européenne) et le CETU (Centre d'Etude des Tunnels, échelle nationale). Les origines expérimentales de ces méthodes seront retracées, dans le but d'évaluer la pertinence des conditions d'expérimentation de l'époque vis-à-vis du contexte technologique actuel. Enfin, une étude bibliographique sera menée sur les évolutions technologiques et les découvertes récentes susceptibles de remettre en cause les règles de dimensionnement.

1.2 Origine des règles de dimensionnement

Comme on a pu le voir en introduction, les enjeux liés à l'éclairage diurne et à l'éclairage nocturne des tunnels sont très différents. L'éclairage diurne des tunnels constitue un point singulier de l'éclairage routier puisque ce sont les seuls ouvrages circulés nécessitant un éclairage plus important de jour que de nuit. De nombreuses expériences se sont donc intéressées aux phénomènes physiques et physiologiques susceptibles d'être suscités par la traversée d'un tunnel routier en plein jour. Ces expériences sont parties du postulat que la tâche de conduite se basait avant tout sur la perception de l'environnement par les conducteurs, leur comportement au volant dépendant des éventuels dangers qu'ils détectent. De ce fait, le point critique de la traversée d'un tunnel de jour est la différence de luminance entre l'environnement extérieur et l'intérieur de l'ouvrage. La chaussée sera trop sombre en zone d'entrée pour permettre de distinguer d'éventuels obstacles, les conducteurs auront donc tendance à ralentir car ils percevront ce fameux « trou noir » comme un danger, ce comportement favorisant l'apparition de phénomènes de congestion et le risque d'accidents. En sortie, les conducteurs seront éblouis et ne distingueront plus clairement leur environnement proche pendant un court instant, ils auront donc également tendance à ralentir en percevant ce danger. Les expériences menées pour chercher une solution afin de

limiter les risques en tunnel se sont donc intéressées à cet écart de luminance et au meilleur moyen de limiter ses conséquences. En couplant ce premier constat avec des résultats physiologiques stipulant que l'adaptation du système visuel des niveaux de luminance élevés vers des niveaux plus faibles se faisait de manière plus lente que l'inverse, il est donc apparu que la zone d'entrée constituait un défi plus important que la zone de sortie et la plupart des expériences menées sur les tunnels routiers ont cherché à surmonter ce challenge. Dans un second temps, ces expériences ont démontré que le défi initial identifié se déclinait en deux éléments distincts, et c'est ainsi que les phénomènes d'adaptations spatiale et temporelle ont été mis en exergue. Le but des méthodes de calcul présentées dans les documents guides (CIE, CEN et CETU) est donc de définir les niveaux de luminance de chaussée suffisants pour assurer ces deux adaptations. En pratique, le principe général utilisé est similaire pour les 3 méthodes. Dans un premier temps, les conditions d'adaptation du conducteur à l'approche du tunnel doivent être prises en compte : généralement, cela se fait par l'intermédiaire d'une valeur de luminance de voile (notion expliquée ci-après en section **1.2.1.2 Origines de la méthode de la luminance de voile L_{seq} (CIE 88 2004)**). Une fois cette luminance de voile déterminée, il s'agit de caractériser le seuil de contraste nécessaire entre un objet cible standard et son environnement de fond (généralement associé à la chaussée) pour assurer sa détection par les conducteurs. Enfin, la luminance de chaussée nécessaire en entrée de tunnel peut être déduite de ces éléments. Cette approche permet de résoudre l'adaptation spatiale, la résolution de l'adaptation temporelle se base quant à elle sur des courbes d'acceptabilité de décroissance des niveaux de luminance (par l'œil humain), établies à partir d'expériences en laboratoire.

Les règles de dimensionnement en éclairage nocturne sont similaires pour les 3 documents d'étude considérés. La création de ces dernières a largement suivi celle des règles pour l'éclairage routier classique. L'objectif est d'assurer aux conducteurs une visibilité suffisante pour détecter d'éventuels obstacles sur la chaussée.

1.2.1 Zone d'entrée – adaptation spatiale

Le phénomène d'adaptation spatiale a été identifié par de nombreux chercheurs et retranscrit dans toutes les règles présentées dans les 3 guides techniques considérés (CIE, CEN et CETU). La prise en compte de ce phénomène ne se fait cependant pas toujours de la même façon selon le document considéré.

1.2.1.1 Origines de la méthode de la luminance moyenne L_{20} (CEN 2006)

Le développement de la méthode L_{20} s'est fait en deux étapes. Tout d'abord, des études ont mis en évidence le lien entre niveaux de luminance en zone d'accès et luminance nécessaire en zone d'entrée, puis dans un second temps, la méthode de calcul de ces niveaux de luminance en zone d'accès a été précisée.

Les premières expériences sur le sujet de l'influence de la luminance en zone d'accès sur la visibilité des conducteurs ont été menées par Schreuder dans les années 60 (Schreuder 1964). En pratique, il utilisa un dispositif statique pourvu d'un écran occupant tout le champ de vision de l'observateur : l'écran était uniforme en termes de luminance et représentait les conditions lumineuses en zone d'accès. Un carré de luminance différente, représentant le portail d'entrée du tunnel était affiché brièvement sur l'écran et un objet cible pouvant prendre différentes tailles et différentes valeurs de contraste était représenté à l'intérieur de ce carré. Les niveaux de luminance de l'écran et du carré variaient indépendamment et, pour chacun des cas de figure présentés, l'observateur devait spécifier s'il détectait ou non l'objet cible. Les résultats de Schreuder ont permis d'obtenir une première approximation du lien existant entre luminance en zone d'accès et luminance nécessaire en zone d'entrée. Cependant, l'hypothèse de l'uniformité des niveaux de luminance en zone d'accès n'était pas applicable en pratique et la CIE introduisit le concept de luminance moyenne en zone d'accès L_{20} en 1973, afin de tenir compte de la réalité du terrain. Cette luminance moyenne a été définie pour un champ de vision de 20° et consiste en une moyenne pondérée des luminances de ciel, de chaussée et d'environnement. La pondération se fait en fonction de la superficie occupée par l'élément considéré dans le champ de vision de 20° du conducteur. La valeur de luminance moyenne ainsi obtenue peut être comparée à la luminance uniforme utilisée par Schreuder puisque le positionnement des sources d'éblouissement n'est pas pris en compte dans la méthode L_{20} . Des coefficients k (voir section **1.3.2.1 Zone d'entrée**) faisant le lien entre luminance moyenne en zone d'accès et luminance nécessaire en zone d'entrée ont donc été déduits des résultats obtenus par Schreuder. Les valeurs de k dépendent de la vitesse du véhicule s'approchant du tunnel. Le cas le plus défavorable (vitesse la plus élevée) correspond au résultat obtenu par Schreuder dans l'expérience présentée ci-dessus ($L_{th} = 0.1 \times L_{20}$), tandis que les autres valeurs de k , plus faibles, ont été choisies de manière empirique par la CIE. Il est à noter que le fait d'associer les résultats de Schreuder au cas le plus défavorable dans la réalité semble être un choix étonnant, puisque le passage de conditions quasi-statiques à des conditions dynamiques devrait plaider pour des valeurs de luminance en zone d'entrée nécessairement plus élevées et non pas plus basses.

Le développement de la méthode de calcul s'est basé principalement sur des expériences quasi-statiques, auxquelles une approche empirique est venue s'ajouter afin de préciser les résultats obtenus en laboratoire et de tenir compte de la réalité du terrain.

La méthode L_{20} , qui a été originellement la première méthode à être développée pour lier les niveaux lumineux extérieurs et ceux à l'intérieur du tunnel, est encore utilisée aujourd'hui du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de calcul. La méthode L_{seq} , développée un peu plus tard et présentée ci-après, est plus précise mais plus complexe.

1.2.1.2 Origines de la méthode de la luminance de voile L_{seq} (CIE 88 2004)

Détermination des luminances de voile

La méthode de la luminance de voile s'appuie sur le phénomène physiologique suivant : la lumière provenant des zones lumineuses entourant le portail d'entrée du tunnel et entrant dans l'œil du conducteur est partiellement diffusée dans le cristallin et le globe oculaire, et redirigée vers la fovéa. Cette lumière crée un voile brillant qui se superpose à l'image observée au centre du champ de vision et diminue les capacités visuelles du conducteur. Les premières recherches menées sur le sujet ont investigué la relation existant entre le seuil de différence de luminance (entre un objet et son environnement de fond) à partir duquel un objet devient visible, et la taille du champ environnant (Adrian et Eberbach 1969). Les résultats de ces expériences montrèrent dans un premier temps que l'augmentation des niveaux de luminance des sources parasites rendait plus difficile la détection d'une cible par les observateurs, mais également que les niveaux de luminance dans le champ de vision central influençaient plus l'état d'adaptation du conducteur que ceux du champ de vision périphérique. Sur la base de ces constatations, le concept de luminance de voile équivalente consiste à considérer les éléments brillants environnant le tunnel comme autant de sources d'éblouissement qui réduisent le contraste perçu des objets dans la zone d'entrée. Le poids de ces éléments en termes de luminance de voile dépend de leur position par rapport au centre du champ de vision. La formule finalement retenue par Adrian et Eberbach pour calculer cette luminance de voile équivalente fut la suivante (Adrian et Eberbach 1969) :

$$L_{seq} = k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{E_{v,oeil_i}}{\theta_i^2} \quad [1-1]$$

Avec $E_{v,oeil_i}$ l'éclairement de la source i dans le plan de l'œil de l'observateur (en lx) ;

θ_i l'angle d'éblouissement entre la demi-droite reliant l'œil et la source de lumière, et la demi-droite reliant l'œil et l'objet cible observé (en radians) : les θ_i doivent être compris entre 0.026 et 0.52 radians (soit entre 1.5° et 30°) ;

k un coefficient dépendant de l'âge et pris ici, au vu des conditions d'expérimentation, tel que $k = 2,81 \times 10^{-3}$ (Adrian et Eberbach 1969) ;

n le nombre de zones de luminance parasites (sources d'éblouissement) prises en compte dans le champ de vision de l'observateur.

Le coefficient correctif lié à l'âge du conducteur fut ensuite précisé par Adrian en 1989 (Adrian 1989).

$$k = (0.0752 \text{ Age} - 1.883)^2 + 9.2 \quad [1-2]$$

Le domaine de validité de l'équation est $25 \text{ ans} < \text{Age} < 80 \text{ ans}$.

Cette formule pour k est uniquement valable pour des valeurs de θ_i prises en degré, et non en radians, dans l'équation [1-1].

La conversion du coefficient k initialement indiqué par Adrian dans son document de 1969 pour des valeurs de θ_i en degrés donne $k = 9.2$: soit la même valeur que celle obtenue pour un âge fixé à 25 ans dans l'équation [1-2]. Pour cette seconde formule, uniquement valable pour des conducteurs âgés de 25 à 80 ans, les valeurs de k étaient comprises entre 9.2 et 26.3 (pour des valeurs de θ_i en degrés), mettant en avant l'impact prépondérant de l'âge du conducteur sur les niveaux de luminance de voile perçus par ce dernier pour des conditions lumineuses fixées.

Cette méthode de calcul de la luminance de voile L_{seq} se base sur une expérience quasi-statique (expérience statique avec un temps de présentation des cibles limité) et non dynamique, la transposition des résultats obtenus en laboratoire à un cas réel de conduite à l'approche d'un tunnel peut donc mener à une sous-estimation des seuils de différence de luminance pour lesquels un objet devient visible. De plus, Adrian extrapole ces résultats pour des cas concrets en partant du principe que le regard du conducteur à l'approche du portail d'entrée d'un tunnel reste fixé sur le centre de l'entrée de l'ouvrage. Ce postulat est contredit par certains chercheurs (Mourant et Rockwell 1970; Narisada et Yoseoikawa 1974) qui affirment que le regard du conducteur va se déplacer sur le portail d'entrée et ses alentours. En prenant en compte ces travaux, Adrian mena des recherches afin de caractériser l'impact du point de fixation du conducteur sur les luminances de voile équivalentes qu'il perçoit (Adrian 1976). Il constata effectivement que l'adaptation de l'œil subissait des étapes transitoires dues aux changements de points de fixation lors de l'approche du portail d'entrée. Ces étapes n'étaient cependant pas très impactantes du fait que l'entrée plus sombre du tunnel reste tout de même la principale zone d'attraction du regard.

Par la suite, Adrian développa une méthode graphique afin de simplifier le calcul de la luminance de voile équivalente pour des cas pratiques (Adrian 1987). Dans cette méthode, il s'inspira de la première équation développée pour le calcul de la luminance de voile équivalente (équation [1-1]) en privilégiant une approche intégrale plutôt que discrète. La formule de base de sa méthode (équation [1-1]) peut alors être réécrite comme indiqué dans l'équation [1-3].

$$L_{seq} = k \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} L(\theta, \varphi) \frac{\sin \theta \cos \theta}{\theta^2} d\theta d\varphi \quad [1-3]$$

Avec $L(\theta ; \varphi)$ la luminance comme fonction de θ et de φ (cd.m^{-2}) ;

θ_i et θ_{i+1} présentés en Tableau 1-1.

Tableau 1-1 Limites angulaires des anneaux utilisés dans le diagramme polaire d'Adrian

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\theta_i(^{\circ})$	1	1.5	2	2.9	4	5.8	8.3	12	18	28.4

L'équation [1-3] correspond à la luminance de voile équivalente moyenne sur un anneau défini par θ_i et θ_{i+1} . Les anneaux sont établis de telle sorte que chacun d'entre eux induit le même éclairage parasite au niveau de la fovéa du conducteur. La somme des luminances de voile équivalente sur tous les anneaux qui composent le champ de vision de l'observateur permet d'obtenir la luminance de voile équivalente totale. Le calcul formel de l'intégrale n'étant pas aisé, la méthode graphique d'Adrian consiste à subdiviser ces anneaux en 12 sections distinctes et à considérer la luminance moyenne de chacune de ces sections dans le calcul final de la luminance de voile équivalente, présenté en équation [1-4]. En pratique la méthode graphique consiste à superposer un diagramme polaire sur une photographie de l'entrée du tunnel (un objectif précis doit être utilisé pour connaître sa projection angulaire) prise à la distance d'arrêt, comme présenté en Figure 1-1. Cette méthode est plus amplement détaillée en section **1.3.2.1 Zone d'entrée**.

$$L_{seq} = 0.5131 \times 10^{-3} \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{12} L_{ij} \quad [1-4]$$

Avec L_{ij} la luminance moyenne de chaque section d'anneau du diagramme polaire (cd.m^{-2}).

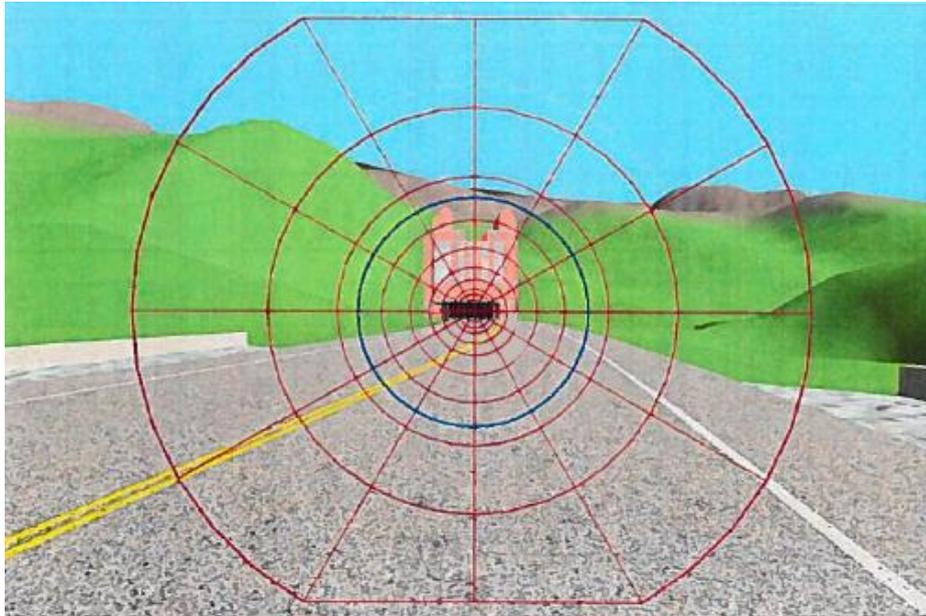


Figure 1-1 Diagramme polaire d'Adrian (CIE 88 2004)

En parallèle du développement de ce modèle, Adrian mena une expérience afin de démontrer l'importance de la prise en compte de la luminance de voile équivalente sur l'état d'adaptation du conducteur (Adrian 1987). Il introduisit donc un concept de luminance d'adaptation L_A correspondant à la somme de la luminance perçue au niveau du point de fixation de l'utilisateur et de la luminance de voile équivalente. La méthode la plus utilisée originellement pour le dimensionnement de l'éclairage en zone d'entrée était la méthode L_{20} (voir section **1.2.1.1 Origines de la méthode de la luminance moyenne L_{20} (CEN 2006)**) : l'objectif d'Adrian avec cette expérience était donc de démontrer que la seule prise en compte de la luminance moyenne en zone d'accès, sans considération de la position des sources d'éblouissement,

n'était pas représentative du ressenti des conducteurs. Il mit ainsi en évidence le fait que pour une luminance moyenne en zone d'accès L_{20} constante, de nombreuses valeurs de luminance d'adaptation L_A différentes pouvaient exister et que cette luminance moyenne en zone d'accès n'était donc pas suffisante pour décrire le ressenti des conducteurs à l'approche d'un tunnel. Il étudia également la corrélation entre L_{20} et L_{seq} et montra qu'elle était assez faible. Il mit en évidence le fait que l'établissement d'une régression linéaire entre les deux variables était impossible et menait à des résultats aberrants (Adrian 1987).

L'équation [1-4] fut ensuite modifiée par la CIE dans son rapport de 2004 afin de tenir compte de l'influence du pare-brise sur le ressenti du conducteur. Le terme L_i fut ainsi remplacé par le terme $(\tau_{pb} \cdot L_i) + L_{pb}$.

Il est à noter que la luminance de voile équivalente n'est pas la seule luminance de voile qui impacte les performances visuelles des conducteurs, les luminances de voile d'atmosphère et de pare-brise jouent également un rôle important à ce niveau. Les processus physiologiques associés à ces phénomènes de voile sont plus amplement détaillés ci-après. En ce qui concerne la luminance de voile d'atmosphère, la dispersion de la lumière du jour par les poussières et les particules contenues dans l'air environnant entrave la visibilité d'obstacles potentiels dans la zone d'entrée. Une partie de la lumière qui se disperse dans le cône de vision parvient directement au niveau de la fovéa et se superpose avec l'image du portail d'entrée du tunnel. Ce phénomène peut diminuer de manière importante le contraste perçu par les conducteurs. Une autre partie de la lumière, qui se disperse en dehors du cône de vision dans la direction de l'œil, peut également atteindre la fovéa à la suite de dispersions multiples dans les composants de l'œil. Ce second effet de voile, également associé à l'atmosphère est bien moins important que le premier et souvent négligeable. En ce qui concerne la luminance de voile de pare-brise, lorsque la lumière du jour vient éclairer le pare-brise d'un véhicule, une partie de cette dernière est dispersée en direction de l'œil du conducteur et diminue le contraste perçu. Plus la saleté accumulée sur le pare-brise du véhicule est importante, plus l'effet de voile sera important. Là encore, une partie de la lumière dispersée par le pare-brise parvient jusqu'à la fovéa où elle se superpose à l'image du portail d'entrée du tunnel. Des recherches ont visé à déterminer des valeurs typiques de luminance de voile d'atmosphère L_{atm} et de pare-brise L_{pb} . Les travaux de Padmos (Padmos et Alferdinck 1983; Padmos 1984) ont notamment permis d'établir des équations exprimant ces grandeurs en fonction de la luminance moyenne de l'environnement. Elles sont données ci-après.

$$L_{atm} = \frac{3.8 DA}{V_m} L_0 \quad [1-5]$$

$$L_{pb} = (0.093 + 0.00018 DA) L_0 \quad [1-6]$$

Avec DA la distance d'arrêt associée à la vitesse limite de la portion de route considérée, le calcul de celle-ci sera détaillé plus tard dans le manuscrit (m) ;

V_m la visibilité météorologique, c'est-à-dire la distance à laquelle un objet standard est visible pour les conditions climatiques considérées (m) ;

L_0 la luminance moyenne dans un cône de 20° d'ouverture totale évaluée 150 m en amont de l'entrée du tunnel (cd.m⁻²).

Notion de contraste perçu

Ces éléments présentent donc les origines de la méthode d'estimation de la luminance de voile équivalente. La méthode du contraste perçu présenté par la CIE dans son rapport de 2004 fait ensuite le lien entre cette luminance de voile équivalente (et celles d'atmosphère et de pare-brise) et les niveaux de luminance de chaussée nécessaires en zone d'entrée pour assurer l'adaptation spatiale des conducteurs. Pour ce faire, le contraste perçu par le conducteur d'un objet de référence posé sur la chaussée permet de faire le lien entre luminances de voile et luminance de chaussée nécessaire, les expériences originelles ayant permis d'établir des lois physiques reliant ces différents paramètres entre eux sont présentées ci-après.

La formule la plus simple pour exprimer le contraste entre un objet et son environnement de fond est la formule de Weber, rappelée ci-après.

$$C_{int} = \frac{L_{obj_{int}} - L_{f_{int}}}{L_{f_{int}}} \quad [1-7]$$

Avec C_{int} le contraste intrinsèque entre l'objet étudié et son environnement de fond ;

$L_{obj_{int}}$ la luminance de l'objet (en cd.m⁻²) ;

$L_{f_{int}}$ la luminance de l'environnement de fond (en cd.m⁻²).

Une première évolution amenée par Adrian en 1976, fut de prendre en compte l'influence de la luminance de voile équivalente sur le contraste perçu par le conducteur. Il appela cette nouvelle formulation « le contraste réduit ».

$$C_{red} = \frac{\Delta L}{L_{f_{int}} + L_{seq}} \quad [1-8]$$

Avec ΔL la différence de luminance entre l'objet cible et l'environnement de fond (en cd.m⁻²) ;

L_{seq} la luminance de voile équivalente (en cd.m⁻²) ;

$L_{f_{int}}$ la luminance de fond (en cd.m⁻²).

Cette formule du contraste réduit a par la suite été modifiée par la CIE, afin de tenir compte de l'influence de l'atmosphère et du pare-brise en plus de celle de la luminance de voile équivalente. La nouvelle formulation du contraste prit le nom de « contraste perçu », son expression est rappelée ci-après.

$$C_p = \frac{L_{obj_p} - L_{f_p}}{L_{f_p}} \quad [1-9]$$

Avec C_p le contraste perçu ;

L_{obj_p} la luminance de l'objet telle que perçue par le conducteur (en cd.m^{-2}), son expression est détaillée ci-après ;

L_{f_p} la luminance de l'environnement de fond de la cible (assimilée à la luminance de chaussée dans cette méthode) telle que perçue par le conducteur (en cd.m^{-2}), son expression est également détaillée ci-après.

$$L_{obj_p} = \tau_{pb} \tau_{atm} L_{obj_{int}} + \tau_{pb} L_{atm} + L_{pb} + L_{seq} \quad [1-10]$$

$$L_{f_p} = \tau_{pb} \tau_{atm} L_{f_{int}} + \tau_{pb} L_{atm} + L_{pb} + L_{seq} \quad [1-11]$$

En parallèle de ces recherches sur l'expression la plus juste du contraste pour retranscrire le ressenti d'un conducteur à l'approche d'un tunnel, la question du seuil de contraste décelable par un observateur lambda s'est posée. Ce seuil de détection dépendant forcément de la distance d'observation et de la taille de l'objet cible, ces deux paramètres furent fixés par la communauté scientifique : la tâche de détection conventionnelle consistait donc à repérer une cible carrée de 20 cm de côté située à 100 m de l'observateur (correspondant à une taille angulaire de 0.11 degrés). Les recherches sur le seuil de contraste nécessaire pour une perception jugée adéquate des obstacles potentiels sur la chaussée furent menées principalement par Adrian (Adrian 1976) et Schreuder (Schreuder 1964). Les résultats obtenus montrèrent qu'un contraste perçu de 0.2 entre la cible et son environnement de fond était nécessaire pour assurer une bonne détection de la part des usagers, pour la taille angulaire de cible considérée.

Luminances de chaussée en zone d'entrée

Une fois les luminances de voile déterminées et les besoins en termes de contraste exprimés, il s'agissait de caractériser la luminance de chaussée nécessaire pour assurer ces derniers. Les chercheurs se sont donc attelés à déterminer les liens existants entre contraste et luminance de chaussée en zone d'entrée. Dans un premier temps, Adrian montra qu'une manière d'améliorer le seuil de contraste permettant la détection de l'objet type était simplement d'augmenter les niveaux de luminance en zone d'entrée (Adrian 1976). Il développa dans le même temps des modèles physiques permettant d'estimer la luminance de chaussée nécessaire en zone d'entrée en fonction de la luminance de voile équivalente et du contraste intrinsèque de la cible. Il présenta ces résultats sous forme de courbes à luminance de voile équivalente constante ou à contraste intrinsèque constant (Figure 1-2 et Figure 1-3). Ces courbes découlent de la définition de contraste réduit donnée par Adrian (équation [1-8]) : en chaque point de chacune d'entre-elles, la valeur du contraste réduit associée aux 3 paramètres pris en compte est constante égale à 0.2.

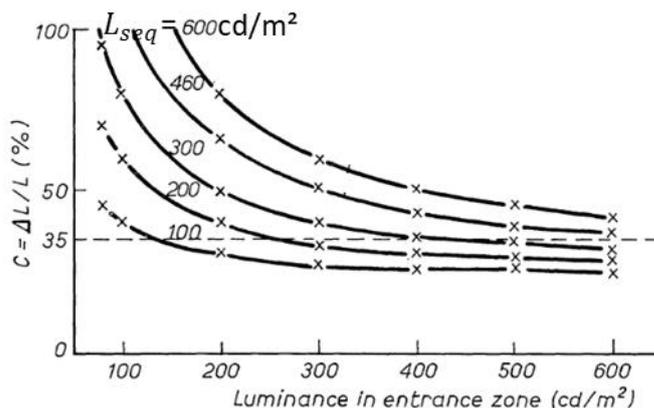


Figure 1-2 Luminance requise en zone d'entrée pour que la cible soit visible pour différentes valeurs de contraste et différentes valeurs de luminances de voile L_{seq} (iso-valeurs L_{seq}) (cible de 10' d'angle) (Adrian 1976)

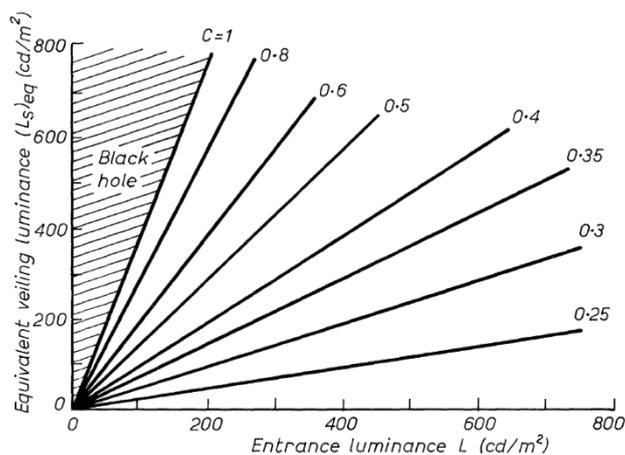


Figure 1-3 Luminance requise en zone d'entrée pour que la cible soit visible pour différentes valeurs de contraste et différentes valeurs de luminances de voile L_{seq} (iso-valeurs de contraste) (cible de 10' d'angle) (Adrian 1976)

L'effet trou noir est ainsi créé lorsque la cible de plus grand contraste intrinsèque possible devient invisible (la luminance de chaussée en zone d'entrée étant trop faible pour assurer l'adaptation spatiale au vu des niveaux de luminance de voile équivalente auxquels est confronté le conducteur).

Les modèles d'Adrian mettent en évidence plusieurs points concernant les liens entre contraste, luminance de voile équivalente et luminance de chaussée en zone d'entrée :

- Plus le contraste intrinsèque de la cible est élevé, plus la luminance nécessaire en zone d'entrée pour obtenir un contraste réduit de 0.2 est faible (Figure 1-3) ;
- Plus la luminance en zone d'entrée augmente, plus le contraste intrinsèque nécessaire pour obtenir un contraste réduit égal à 0.2 diminue (à luminance de voile équivalente constante, voir Figure 1-2) ;

- Plus le contraste intrinsèque de la cible est faible, plus l'augmentation de la luminance de voile équivalente a une forte influence sur la luminance nécessaire en zone d'entrée (Figure 1-3).

Le chercheur proposa par la suite une formule afin d'exprimer la luminance de chaussée nécessaire en zone d'entrée en fonction du contraste intrinsèque de la cible, du seuil de contraste permettant la détection et de la luminance de voile équivalente (Adrian 1982).

$$L_{th} = \frac{L_{seq}}{\left(\frac{C_{int}}{C_m} - 1\right)} \quad [1-12]$$

Avec L_{th} la luminance de chaussée nécessaire au début de la zone d'entrée (cd.m⁻²) ;

C_{int} le contraste intrinsèque de la cible ;

C_m le seuil de contraste à partir duquel la cible devient visible (le développement de la méthode de calcul se base sur le fait que le contraste réduit C_{red} doit être au moins égal à C_m pour que la cible soit visible, la valeur de L_{th} ainsi trouvée constitue donc un minimum à respecter).

La formule fut ensuite modifiée par la CIE afin de tenir compte de l'influence du pare-brise et de celle de l'atmosphère (luminances de voile et facteurs de transmission). La forme principale de l'équation fut conservée :

- L_{seq} fut ainsi remplacé par le terme $\tau_{pb} \cdot L_{atm} + L_{pb} + L_{seq}$ afin de prendre en compte toutes les luminances de voile et pas seulement la luminance de voile équivalente.
- Le contraste de la cible C_{int} peut également s'écrire $\frac{L_{obj_{int}} - L_{f_{int}}}{L_{f_{int}}}$ d'après les notations utilisées par la CIE. La cible étant considérée comme un objet parfaitement diffusant, la loi de Lambert permet de réécrire $L_{obj_{int}} = \frac{\rho_{obj} E_v}{\pi}$ puis finalement $C_{int} = \frac{L_{obj_{int}} - 1}{1} = \frac{\rho_{obj}}{\pi q_c} - 1$, avec q_c le paramètre de qualité de contraste, dont l'expression est donnée par l'équation [1-13].
- Enfin, L_{th} étant la luminance de chaussée en zone d'entrée telle qu'elle est perçue par le conducteur à l'approche du tunnel, le terme à gauche de l'équation devient $\tau_{pb} \cdot \tau_{atm} \cdot L_{th}$ afin de tenir compte de l'influence du pare-brise et de l'atmosphère.

$$q_c = \frac{L_{ch_{int}}}{E_v} \quad [1-13]$$

Avec $L_{ch_{int}}$ la luminance de chaussée (cd.m⁻²) ;

E_v l'éclairement vertical mesuré une dizaine de centimètres au-dessus de la chaussée (lx), le rôle du paramètre de qualité de contraste et les recommandations associées sont présentés plus en détail en **annexe C : Critères complémentaires pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage**.

L'équation finalement retenue par la CIE dans son document de 2004 devient donc (CIE 88 2004) :

$$L_{th} = \frac{L_m}{\frac{1}{c_m} \left(\frac{\rho_{obj}}{\pi q_c} - 1 \right) - 1} \quad [1-14]$$

Avec $L_m = \frac{\tau_{pb} L_{atm} + L_{pb} + L_{seq}}{(\tau_{pb} \tau_{atm})}$;

Et L_{th} la luminance de la chaussée nécessaire en entrée de tunnel (cd.m⁻²).

Ainsi, le modèle de luminance de voile équivalente et la méthode du contraste perçu reposent en grande partie sur des résultats d'expériences menées en laboratoire. Afin de prendre en compte la réalité du terrain, des facteurs correctifs liés à la réalité physique de ce dernier sont venus enrichir les formules issues des expériences originelles en laboratoire (prise en compte de l'atmosphère, du pare-brise, ...).

1.2.1.3 Origines de la méthode CETU (CETU 1998)

La méthode CETU se base sur une loi de visibilité établie par Adrian (Adrian 1989). Celle-ci a été créée en se basant sur une expérience de visibilité durant laquelle des participants devaient détecter une cible se détachant sur un fond de luminance uniforme. Les résultats obtenus ont permis de déterminer des valeurs d'écarts de luminance entre cible et fond pour lesquelles la quasi-totalité des participants (99.93% de probabilité de détection) pouvaient détecter la cible. Le chercheur s'est ensuite appuyé sur de nombreux résultats précédemment obtenus lors de diverses expériences, afin de développer un modèle mathématique permettant de calculer le seuil de différence de luminance nécessaire entre une cible et son environnement de fond pour que cette dernière soit visible par un conducteur. Ce modèle s'est développé sous la forme d'une fonction principale dépendant de la taille angulaire de la cible et de la luminance de fond, dérivée des travaux de Berek (Berek 1943). Ce dernier s'était lui-même inspiré de lois établies par Ricco et Weber (Ricco 1877; Fechner 1966) qui donnaient le seuil de différence de luminance nécessaire pour la détection d'une cible sur son environnement de fond, respectivement pour des tailles angulaires de cibles très petites et très grandes. Les formules associées sont les suivantes :

Ricco :

$$\Delta L_{\alpha \rightarrow 0} = \Phi(L_{f_{int}}) \alpha^{-2} \quad [1-15]$$

Weber :

$$\Delta L_{\alpha \rightarrow \infty} = L(L_{f_{int}}) \quad [1-16]$$

Avec ΔL le seuil de différence de luminance nécessaire entre une cible et son environnement de fond pour permettre la détection de celle-ci (en cd.m^{-2});

Φ une fonction explicitée ci-après ;

$L_{f_{int}}$ la luminance de fond (en cd.m^{-2});

α la taille angulaire de la cible (en minutes d'angle).

L une fonction explicitée ci-après (voir \sqrt{L} dans l'équation [1-19]).

Berek (Berek 1943) proposa ensuite une formule mixant les deux équations afin d'obtenir un modèle valable pour toutes les tailles de cibles.

$$\Delta L = k \left(\frac{\sqrt{\Phi}}{\alpha} + \sqrt{L} \right)^2 \quad [1-17]$$

Avec k un coefficient pris égal à 2.6 dans le modèle d'Adrian.

Les fonctions $\sqrt{\Phi}$ et \sqrt{L} ont ensuite été déterminées à partir des données d'Adrian (Adrian et Eberbach 1969), d'Aulhorn (Aulhorn 1964) et de Blackwell (H. R. Blackwell 1946).

Pour $L_{f_{int}} \geq 0.6 \text{ cd/m}^2$

$$\sqrt{\Phi} = \log(4.1925 L_{f_{int}}^{0.1556}) + 0.1684 L_{f_{int}}^{0.5867} \quad [1-18]$$

$$\sqrt{L} = 0.05946 L_{f_{int}}^{0.466} \quad [1-19]$$

Pour $L_{f_{int}} \leq 0.00418 \text{ cd/m}^2$

$$\log(\sqrt{\Phi}) = 0.028 + 0.173 \log(L_{f_{int}}) \quad [1-20]$$

$$\log(\sqrt{L}) = -0.891 + 0.5275 \log(L_{f_{int}}) + 0.0227 \log(L_{f_{int}})^2 \quad [1-21]$$

Pour $0.00418 \text{ cd/m}^2 < L_{f_{int}} < 0.6 \text{ cd/m}^2$

$$\log(\sqrt{\Phi}) = -0.072 + 0.3372 \log(L_{f_{int}}) + 0.0866 \log(L_{f_{int}})^2 \quad [1-22]$$

$$\log(\sqrt{L}) = -1.256 + 0.319 \log(L_{f_{int}}) \quad [1-23]$$

Le modèle développé par Adrian est subdivisé en 3 domaines de luminance de fond pour une meilleure correspondance des courbes de tendance.

Une fois le corps principal de l'équation développé, Adrian l'enrichit en ajoutant des facteurs correctifs permettant de tenir compte de l'influence de l'âge du conducteur, de la durée d'exposition de la cible, ainsi que du type de contraste (positif ou négatif) sous lequel cette dernière était vue. Le modèle ainsi obtenu était plus complet et introduisait des facteurs d'influence complémentaires à la seule prise en compte de la luminance de fond et de la taille angulaire de la cible.

Le facteur correctif lié à la durée d'exposition de la cible est indiqué en équation [1-24]. Son développement s'appuie sur les résultats expérimentaux de Schmidt-Claussen (Schmidt-Claussen, Ziegler, et Ziegler 1969) et Blackwell (IES 1966).

$$\frac{a(\alpha, L_{f_{int}})^{+t}}{t} \quad [1-24]$$

$$\text{Avec } a(\alpha, L_{f_{int}}) = \frac{\sqrt{a(\alpha)^2 + a(L_{f_{int}})^2}}{2.1};$$

$$a(\alpha) = 0.36 - 0.0972 \left(\frac{(\log(\alpha) + 0.523)^2}{(\log(\alpha) + 0.523)^2 - 2.513 (\log(\alpha) + 0.523) + 2.7895} \right);$$

$$a(L_{f_{int}}) = 0.36 - 0.0972 \left(\frac{(\log(L_{f_{int}}) + 6)^2}{(\log(L_{f_{int}}) + 6)^2 - 10.4 (\log(L_{f_{int}}) + 6) + 52.28} \right)$$

Le facteur correctif associé à la polarité du contraste (cible vue en contraste positif ou négatif) était une première au moment de la sortie du modèle : en effet, la plupart des expériences de visibilité menées jusqu'alors considéraient uniquement des cibles vues en contraste positif, alors qu'il est relativement fréquent que les cibles utilisées en éclairage routier, et notamment en tunnels, soient vues en contraste négatif. Par la suite, des résultats obtenus par Aulhorn semblaient montrer que les cibles vues en contraste négatif étaient toujours mieux perçues par les observateurs que les cibles vues en contraste positif, pour un ΔL constant. Un facteur correctif F_{CP} , dérivé des données de Aulhorn fut ainsi introduit par Adrian dans son modèle. La définition initiale donnée à ce terme était la suivante :

$$\Delta L_{neg} = \Delta L_{pos} F_{CP} \quad [1-25]$$

Avec ΔL_{neg} la différence de luminance nécessaire entre une cible et son environnement de fond pour que cette dernière soit visible si elle est vue en contraste négatif.

ΔL_{pos} la différence de luminance nécessaire entre une cible et son environnement de fond pour que cette dernière soit visible si elle est vue en contraste positif.

L'expression de F_{CP} est donnée en équation [1-26]. Comme mentionné précédemment, ce facteur est toujours inférieur à 1 lorsque la cible est vue en contraste négatif, donnant des valeurs de ΔL finales plus faibles que pour un contraste positif, lorsque tous les autres paramètres sont fixés. Ce facteur permet donc bien de rendre compte de l'amélioration de la probabilité de détection d'une cible lorsqu'elle est vue en contraste négatif.

$$F_{CP}(\alpha, L_{f_{int}}) = 1 - \frac{10^{-10} \left[\log(L_{f_{int}} + 1) \right]^{-0.125 \times \left[\log(L_{f_{int}} + 1) \right]^2 + 0.0245}}{2.4 \times \Delta L_{pos}(t=2s)} \times \alpha^{-0.6} L_{f_{int}}^{-0.1488} \quad [1-26]$$

Avec $\Delta L_{pos}(t=2s)$ la différence de luminance nécessaire entre une cible et son environnement de fond pour que cette dernière soit visible si elle est vue en contraste positif, pour une durée d'exposition de 2 secondes.

Enfin, Adrian ajouta à son modèle un facteur correctif lié à l'âge des observateurs AF , en s'inspirant des données de Mortenson-Blackwell (O. M. Blackwell et Blackwell 1980) et de Weale (Weale 1961), qui avaient mis en exergue le fait que la transmittance oculaire diminuait avec l'âge. Le facteur AF pouvait prendre 2 formes, en fonction de la classe d'âge des observateurs considérée.

$$\begin{cases} AF = \frac{(Age-19)^2}{2160} + 0.99 & \text{si } 23 \text{ ans} < Age < 64 \text{ ans} \\ AF = \frac{(Age-56.6)^2}{116.3} + 1.43 & \text{si } 64 \text{ ans} < Age < 75 \text{ ans} \end{cases} \quad [1-27]$$

L'équation finale établie par Adrian était donc composée d'un corps principal, multiplié par 3 facteurs correctifs permettant d'affiner les paramètres pris en compte pour le calcul de ΔL .

$$\Delta L(\alpha, L_{f_{int}}, t, Age) = 2.6 \left(\frac{\sqrt{\Phi}}{\alpha} + \sqrt{L} \right)^2 F_{cp} \frac{a(\alpha, L_{f_{int}})^{+t}}{t} AF \quad [1-28]$$

Les variables sont détaillées en section **1.3.2.1 Zone d'entrée**, dans le tableau de synthèse.

Le CETU basa son modèle de résolution de l'adaptation spatiale sur la loi RCS (loi de « Relative Contrast Sensitivity » établie par Blackwell et permettant de déterminer le contraste minimum décelable en fonction de la luminance de fond (H. R. Blackwell 1981)) dans un premier temps (CETU 1985), puis adopta le modèle d'Adrian à sa sortie en 1989 en fixant les paramètres de durée d'exposition de la cible et d'âge du conducteur, respectivement à 1 seconde et à 40 ans (CETU 1998).

La caractérisation du ΔL constitue la première étape de la résolution de l'adaptation spatiale dans le modèle CETU, il s'agit ensuite de déterminer la luminance de chaussée nécessaire sur tout le renforcement, en tenant compte des luminances de voile observées en zone d'accès. Les modèles associés à la prise en compte de ces voiles se sont basés sur des expériences menées par des chercheurs internationaux, mais également sur des expériences menées en interne par le CETU. Le modèle de luminance de voile de FRY repose sur les travaux du chercheur éponyme (Fry 1954) et fut introduit dans la méthodologie CETU par Dubuisson (Dubuisson 1978) dans les années 70. Ce dernier introduisit également la notion de voile d'atmosphère en se basant sur les travaux de Middleton (Middleton 1957), de Koschmieder (Koschmieder 1924) et sur une série d'essais in situ conduits dans le tunnel du Mont-Blanc en 1975. Enfin, le voile de pare-brise fut introduit par Bertrand et Monié vers la fin des années 70, suite à des essais in situ sous la trémie Garibaldi (située à Lyon, dans le Rhône).

Une fois tous ces éléments caractérisés, le CETU choisit de créer un modèle de résolution itératif modélisant l'approche d'un automobiliste aux abords du tunnel. La résolution de l'adaptation spatiale se faisait donc en estimant le ΔL nécessaire entre une cible et son environnement de fond à l'aide de l'équation de visibilité d'Adrian, puis en se servant de la définition de ΔL (différence de luminance entre une cible et son environnement de fond) pour

exprimer la luminance de chaussée nécessaire en fonction du résultat de l'équation d'Adrian, des facteurs de transmission de l'atmosphère et du pare-brise, du coefficient de réflexion de l'objet type et du paramètre de qualité de contraste de l'installation.

Ainsi, on notera que la validité du modèle CETU repose en grande partie sur celle du modèle d'Adrian, puisque l'équation de visibilité de ce dernier est au centre des méthodes de dimensionnement utilisé par le CETU. Il est donc intéressant de détailler les conditions expérimentales utilisées par Adrian pour établir son modèle, afin de déterminer le domaine de validité de la méthode CETU.

L'établissement du modèle d'Adrian repose sur de nombreuses expérimentations. Les plus notables sont celles de Blackwell, Aulhorn et Adrian. Les expériences d'Aulhorn et d'Adrian se sont basées sur la méthode d'ajustement, c'est-à-dire que la luminance du fond sur lequel l'objet à détecter était disposé était augmentée graduellement jusqu'à ce que les observateurs puissent détecter ledit objet. A contrario, les expériences de Blackwell ont utilisé la méthode de choix forcé : des stimuli étaient présentés aux observateurs et ces derniers devaient indiquer à la fin de chaque stimulus s'ils avaient détecté ou non la cible potentiellement présentée. Le document compilant les résultats d'Adrian (Adrian et Eberbach 1969) ne détaille pas le spectre des sources de lumière utilisées ni le nombre de participants. Les résultats d'Aulhorn ne sont à priori pas disponibles en anglais. Pour les résultats de Blackwell, on apprend que les expériences ont été menées en 1946, les stimuli lumineux étaient produits à l'aide de phares d'automobile de l'époque, et le panel de participants sollicités pour l'expérience comptait 9 femmes âgées de 19 à 26 ans. Le fait que le modèle d'Adrian soit basé sur plusieurs expériences permet de le fiabiliser en augmentant le nombre d'observations et donc la validité statistique dudit modèle. Les éventuels points de vigilance à considérer sont le caractère quasi-statique et non dynamique des expériences menées, ainsi que le spectre des sources utilisées (les sources de l'époque présentent potentiellement des différences de spectres relativement importantes avec les sources LEDs). Ce dernier point devra donc être investigué plus en détail afin de lever les doutes pouvant subsister quant à la validité du modèle pour les technologies actuelles.

1.2.2 Zone de transition – adaptation temporelle

1.2.2.1 Origines de la courbe de décroissance admissible utilisée par la CIE et le CEN

Les méthodes L_{seq} et L_{20} utilisent toutes deux la même courbe de décroissance pour résoudre les problèmes d'adaptation temporelle des usagers. Cette courbe permet de déterminer les niveaux de luminance à mettre en place dans la zone de transition pour les deux organismes (CIE et CEN), et s'intègre dans le profil de luminance standard établi par la CIE pour tous les types de tunnels longs. La courbe actuellement utilisée par la CIE et le CEN est le fruit de nombreuses recherches et retours d'expérience. Les premières courbes de décroissance de luminance admissibles furent développées dans les années 60, elles s'exprimaient sur un graphique indiquant le pourcentage de luminance nécessaire sur la chaussée, en fonction du

temps de traversée de l'utilisateur. Ces premières courbes furent établies expérimentalement par de Boer (de Boer 1961), Schreuder (Schreuder 1964), Kabayama (Kabayama 1963) et Mäder et Fuchs (Mäder et Fuchs 1966). Elles sont présentées en Figure 1-4.

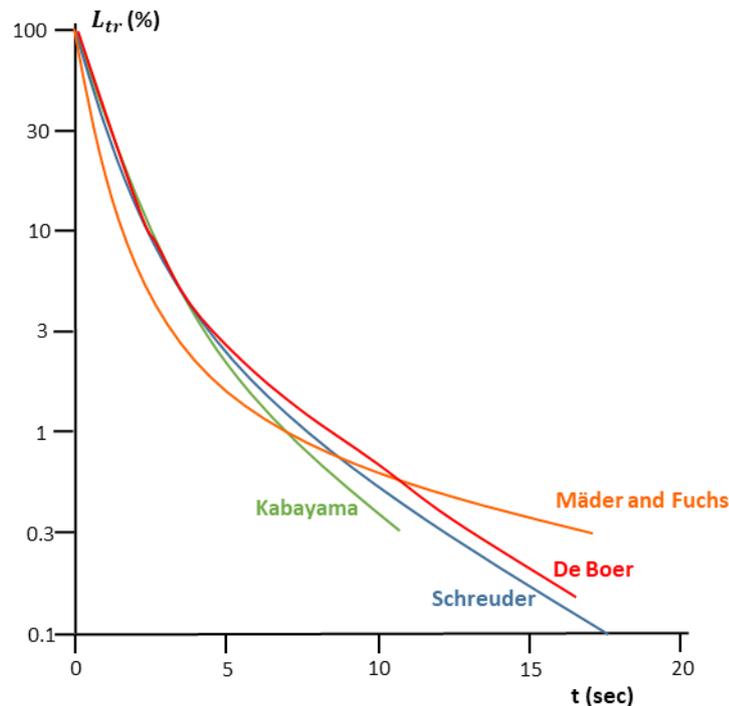


Figure 1-4 Profils de décroissance de luminance établis par De Boer, Schreuder, Kabayama et Mäder et Fuchs pour assurer l'adaptation temporelle des usagers (Bommel 2014)

De Boer mena notamment deux expériences pour investiguer cette problématique d'adaptation temporelle. Dans la première, il modifiait d'un seul coup la luminance d'un environnement de fond uniforme, en partant de 8000 cd/m² et en arrivant à des valeurs comprises entre 2500 et 200 cd/m². Il demandait aux observateurs d'indiquer s'ils étaient gênés ou non par cette modification brutale de la luminance. Il s'est avéré que pour un facteur inférieur à 5.5 entre la luminance de départ et celle d'arrivée, les utilisateurs ne ressentent pas de gêne particulière (soit pour un saut de 8000 à 1500 cd/m²). De Boer développa ensuite une seconde expérience afin de compléter les résultats de la première. Les observateurs étaient à nouveau adaptés à un fond uniforme présentant une luminance de 8000 cd/m², ils passaient ensuite brutalement à une luminance de 1600 cd/m² (facteur 5) et devaient réduire manuellement les niveaux de luminance du fond, de manière à toujours distinguer une cible carrée représentée sur ce fond et à ne ressentir aucune gêne. La courbe de De Boer présentée en Figure 1-4 a été obtenue lors de cette deuxième expérience : elle représente la décroissance admissible par 75% des usagers.

Schreuder mena également deux campagnes d'expérimentation concernant la caractérisation de l'adaptation temporelle. Dans un premier temps, il testait le temps nécessaire pour que des usagers retrouvent des conditions de vision supportables après avoir subi une chute brutale des niveaux de luminance dans leur champ de vision. En pratique, les observateurs étaient placés devant un écran uniforme présentant une luminance de 8000 cd/m², puis cette valeur chutait brutalement à 13 cd/m² et les observateurs devaient indiquer à quel moment la gêne visuelle ressentie devenait supportable. La seconde expérience ressemblait beaucoup à celle de De Boer, sans saut brutal de luminance au début du processus d'ajustement. Ainsi, les observateurs étaient à nouveau face à un écran uniforme en luminance (8000 cd/m²) et devaient faire décroître manuellement les niveaux jusqu'à atteindre une valeur de 4 cd/m², le plus rapidement possible sans pour autant ressentir de gêne. La courbe de Schreuder présentée en Figure 1-4 correspond à la décroissance admissible par 75% des observateurs, établie lors de la deuxième expérience.

Kabayama testa quant à lui l'influence du niveau de luminance initial sur le profil de décroissance admissible. Ses résultats sont indiqués en Figure 1-5. La courbe 6 présentée dans cette figure est également celle qui est indiquée en Figure 1-4.

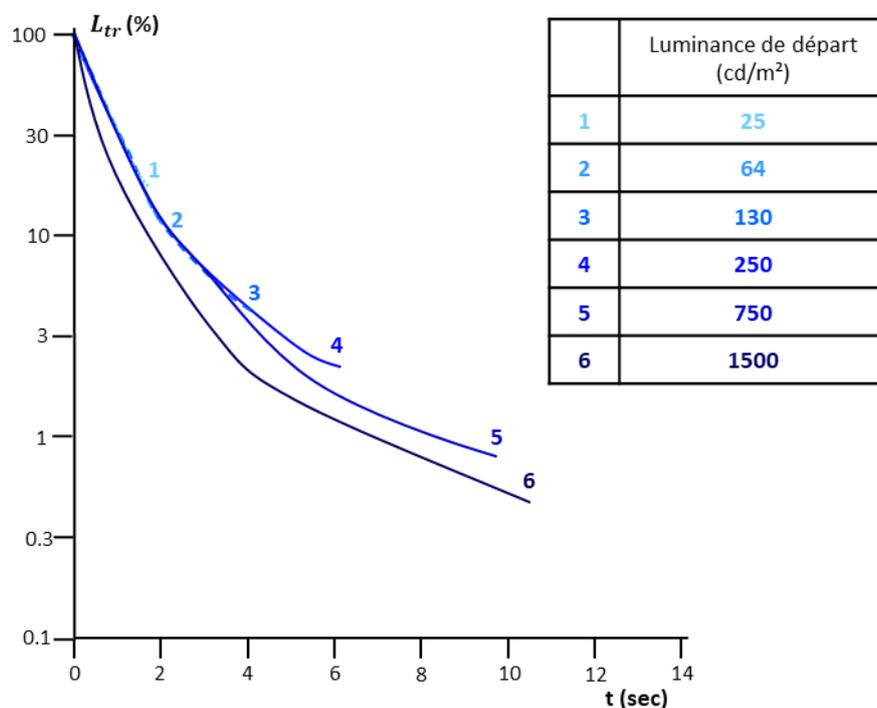


Figure 1-5 Profils de décroissance de luminance admissibles établis par Kabayama (CETU 1998)

Les résultats obtenus par Kabayama montraient que l'influence de la luminance de départ dans le profil de décroissance était relativement faible, notamment pour des valeurs variant de quelques dizaines de candelas par mètre carré à quelques centaines. Il est toutefois notable que plus les valeurs de départ augmentaient, et plus la décroissance relative pouvait se faire rapidement.

Ainsi, les résultats obtenus entre les différents chercheurs étaient relativement proches (voir Figure 1-4). Cependant, ils furent établis en laboratoire et, lorsque les courbes furent appliquées à des cas concrets, il s'avéra que les conducteurs ressentait un fort sentiment d'inconfort vis-à-vis de tels profils de décroissance de luminance. Cet écart constaté trouvait plusieurs raisons. Tout d'abord, la tâche de conduite était simplifiée à l'extrême dans ces expériences, puisque l'environnement de fond était uniforme et les observateurs devaient simplement caractériser leur état de gêne ou distinguer une cible fixe et prédéterminée. Le passage à des conditions réelles apportant de nombreux éléments perturbateurs supplémentaires, les conditions établies en laboratoire pouvaient s'avérer insuffisantes pour assurer des performances visuelles optimales aux usagers. Deuxièmement, la plupart des niveaux de luminance pris en compte pour le départ de la décroissance dans les expériences ne représentaient absolument pas ceux utilisés par la CIE pour la courbe de décroissance résolvant l'adaptation temporelle. En effet, la valeur de luminance de référence correspondant aux 100% dans les expériences était généralement de plusieurs milliers de candelas par mètre carré (8000 cd/m² pour les expériences de De Boer et Schreuder), tandis que pour la CIE, cette valeur de référence correspondait à la luminance de chaussée maximale en zone d'entrée L_{th} (de l'ordre de quelques centaines de candelas par mètre carré). Ainsi, il semblait difficile d'appliquer de tels profils dans des cas concrets si le début de la décroissance se faisait à des valeurs totalement différentes de celles prises en compte pendant les expériences. De plus le travail de Kabayama venait appuyer cette observation faite par la CIE puisqu'il avait constaté que plus les luminances de départ de la décroissance étaient élevées, et plus la décroissance relative pouvait se faire rapidement. Ainsi, en partant de quelques centaines de candelas par mètre carré et en appliquant une courbe de décroissance relative établies pour des niveaux de départ de l'ordre de plusieurs milliers de candelas par mètre carré, le profil de décroissance était nécessairement trop rapide pour permettre une bonne adaptation temporelle des usagers.

Bourdy réalisa par la suite une expérience pour laquelle les dynamiques de luminance présentées aux observateurs s'approchaient grandement de celles observées à l'approche d'un tunnel (Bourdy et al. 1987). L'objectif était de créer une expérience rendant plus compte de la réalité de la tâche de conduite et se basant sur les performances visuelles des observateurs plutôt que sur leur ressenti de gêne. Il testa avec cette expérimentation l'impact de l'adaptation temporelle sur le seuil de détection des usagers. L'expérience se déroulait en 3 phases distinctes :

- Une phase d'adaptation à de hauts niveaux de luminance constants (4000 cd/m² pendant 5 minutes) ;
- Une phase d'approche correspondant à la conduite d'un véhicule sur la zone d'accès (18 secondes) ;
- Une phase d'entrée dans le tunnel, marquée par une chute des niveaux de luminance et une baisse progressive de ces derniers (les mesures portaient sur les 52 secondes suivant l'entrée de l'observateur dans le tunnel).

Deux profils de décroissance étaient testés : l'un se terminant à 5 cd/m^2 et l'autre à 1 cd/m^2 . Pour ces deux profils, les seuils de contraste perçus par les observateurs étaient testés de manière dynamique (changement continu de luminance lors de l'observation) et de manière statique (présentation de niveaux de luminance fixes correspondant aux grandes phases du parcours). Le défaut d'adaptation temporelle fut ensuite estimé en comparant les valeurs obtenues pour ces deux types de seuils de contraste. La Figure 1-6 montre les résultats obtenus par Bourdy : il apparaissait que durant les 10 premières secondes de traversée du tunnel, l'usager voyait son seuil de détection augmenter très fortement. L'état d'adaptation retrouvait un état stable une trentaine de secondes après que l'usager était rentré dans le tunnel. Le seuil de contraste observé pour cet état de stabilité dans la situation dynamique restait néanmoins bien plus élevé que celui obtenu pour les expérimentations statiques. La nécessité de prendre en compte l'aspect dynamique de la tâche de conduite était mise en exergue ici.

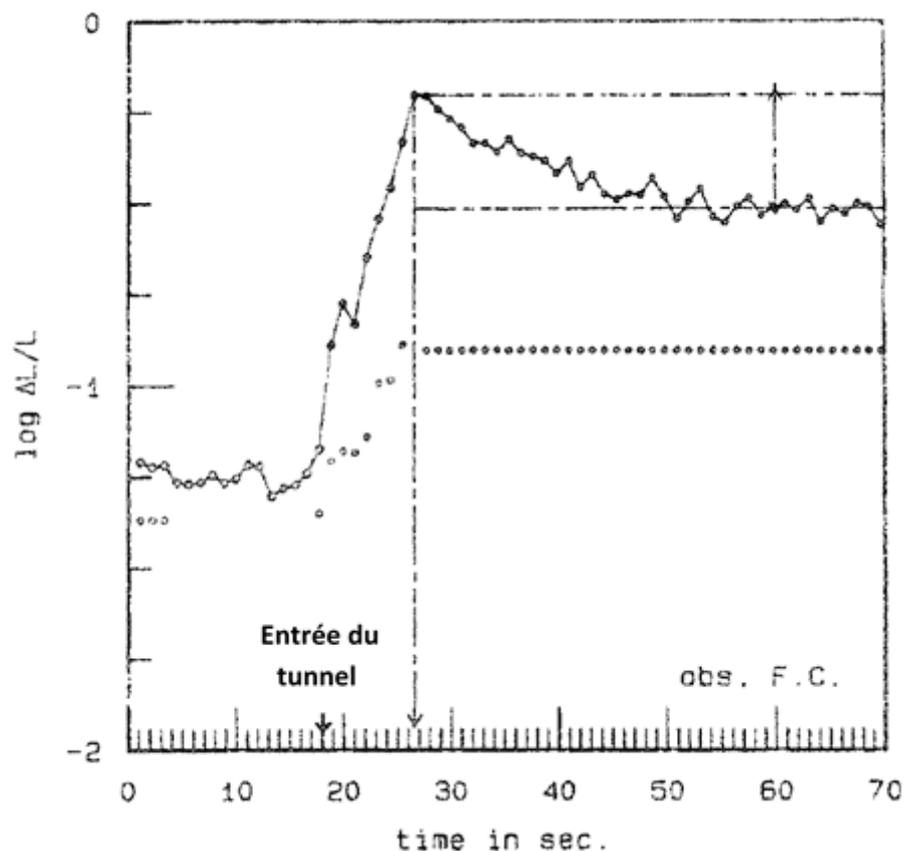


Figure 1-6 Logarithme des seuils de contraste dynamique et statique avant et après une entrée de tunnel en fonction du temps de parcours. La transition de luminance se fait de 4000 cd/m^2 à 1 cd/m^2 . La courbe pleine correspond aux tests dynamiques et la courbe pointillée aux tests statiques (Bourdy et al. 1987)

Au vu de ces constatations, la CIE s'appuya sur le travail de ses comités techniques, qui se basèrent sur des données récupérées dans un grand nombre de tunnels différents, afin de développer une nouvelle courbe de décroissance de luminance, plus adaptée aux besoins visuels des conducteurs et tenant compte de la complexité de la tâche de conduite. Cette

courbe est comparée à celles de De Boer, Schreuder, Kabayama et Mäder et Fuchs en Figure 1-7. Comme le suggéraient les travaux de Kabayama, la courbe de la CIE présente une décroissance relative plus lente que les autres, du fait (entre autres) que le niveau de luminance de départ est bien moins élevé que celui des expérimentations menées en laboratoire. Cependant, on remarque tout de même que la courbe finalement obtenue par la CIE ne concorde pas avec les résultats de Kabayama pour des luminances de départ de quelques centaines de candelas par mètre carré (courbes 3 et 4 de la Figure 1-5).

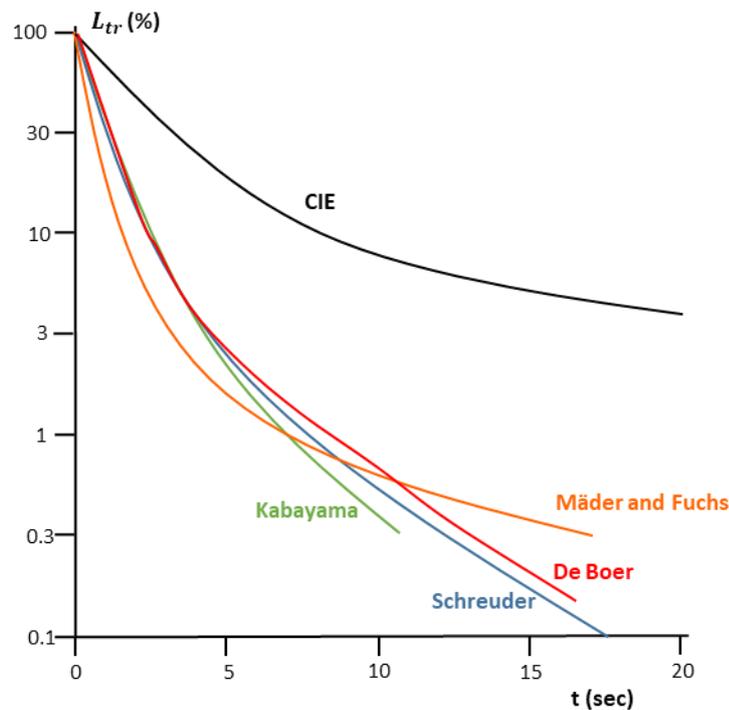


Figure 1-7 Profils de décroissance de luminance établis par De Boer, Schreuder, Kabayama, Mäder et Fuchs et par la CIE pour assurer l'adaptation temporelle des usagers (Bommel 2014)

Les étapes de développement des profils de décroissance de luminance en zone de transition utilisés par la CIE et le CEN, ont été marquées par la prise de conscience de l'énorme impact que pouvait avoir l'adaptation temporelle sur les seuils de contraste perçus par les usagers. L'expérience de Bourdy mit en avant cet impact, ainsi que l'écart pouvant exister entre les résultats d'une expérience prenant en compte la complexité de la tâche de conduite par rapport à ceux d'une expérience plus simpliste.

1.2.2.2 Origines de la courbe de décroissance admissible utilisée par le CETU

La méthode de prise en compte de l'adaptation temporelle utilisée par le CETU découle des expériences de De Boer et Schreuder. Cette méthode est fondamentalement différente de celle utilisée par la CIE ou le CEN. En effet, les niveaux de luminance de départ de la décroissance pris en compte par le CETU sont ceux observés en zone d'accès de tunnel, soit

des niveaux de plusieurs milliers de candelas par mètre carré, contrairement aux quelques centaines de candelas par mètre carré de la CIE. Les conditions de décroissance utilisées par le CETU sont donc très proches de celles utilisées dans les expériences de Schreuder et De Boer notamment. Ainsi, la courbe prise en compte par le CETU consiste simplement en une moyenne des courbes de Schreuder et de De Boer. Elle est présentée plus en détail en section **1.3.2.2 Zone de transition**. La Figure 1-8 présente les courbes de Schreuder, de De Boer, de la CIE, ainsi que du CETU.

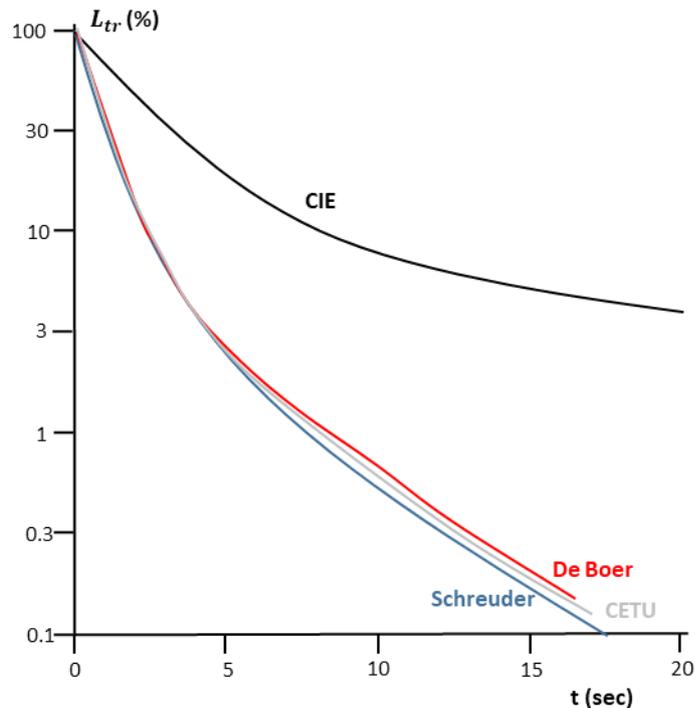


Figure 1-8 Profils de décroissance de luminance établis par De Boer, Schreuder, la CIE et le CETU pour assurer l'adaptation temporelle des usagers

Il apparaît donc que les courbes de Schreuder et de De Boer peuvent être utilisées dans des cas réels à condition que les niveaux de luminance (niveaux moyens dans le champ de vision de l'observateur) de départ pris en compte pour la décroissance soient de l'ordre de plusieurs milliers de candelas par mètre carré, ce qui est généralement le cas sur une route d'accès à l'approche d'un tunnel, notamment par temps ensoleillé.

A nouveau les résultats obtenus dépendent des conditions expérimentales.

1.2.3 Section courante

Les règles de dimensionnement de l'éclairage appliquées en section courante sont bien plus simples que celles des zones d'entrée et de transition devant résoudre respectivement les problèmes d'adaptations spatiale et temporelle. En effet, les niveaux de luminance en section

courante sont constants et ne sont mis en place que lorsque les deux processus d'adaptation cités précédemment ont été complétés.

Le traitement des niveaux de luminance en section courante se fait globalement de la même façon dans tous les documents guides étudiés. Ils sont de l'ordre de quelques candelas par mètre carré et sont constants sur toute la zone de section courante (exception faite des tunnels très longs pour lesquels les niveaux sont diminués après un certain temps de parcours dans la section courante). Les conditions de visibilité dans cette zone du tunnel se rapprochent grandement de celles observées en éclairage routier classique de nuit : les niveaux de luminance mis en place sont relativement faibles et constants. Toutefois, la présence des piédroits, ainsi que le fait que l'adaptation des usagers à des niveaux de luminance faibles ne soit pas complète (contrairement à la conduite de nuit) imposent que les valeurs de luminance observées en section courante seront généralement légèrement plus élevées que celles utilisées en éclairage routier classique. Néanmoins, les règles de dimensionnement de l'éclairage en section courante trouvent leur genèse dans les mêmes expériences qui ont permis d'établir les doctrines utilisées en éclairage routier classique.

Tout comme pour les zones d'entrée et de transition, le dimensionnement de l'éclairage de section courante se base sur la visibilité d'éventuels obstacles sur la chaussée afin d'assurer la sécurité des usagers en priorité. Les premières expériences ayant posé les bases des notions de visibilité telles que nous les connaissons aujourd'hui sont celles de Waldram (Waldram 1934), Weston (Weston 1945) et Blackwell (H. R. Blackwell 1959). Le travail de Waldram a défini le principe de silhouette (cible vue en contraste négatif), tandis que les travaux de Weston et Blackwell se sont penchés sur les performances visuelles des conducteurs et ont montré que la capacité à réaliser une tâche visuelle donnée se basait sur la taille de la cible, sa luminance, et le contraste avec son environnement de fond. L'expérience de Blackwell ayant permis d'obtenir ces résultats consistait en un écran de luminance uniforme variable occupant la majeure partie du champ de vision de l'observateur, et au centre duquel une cible de taille et de luminance données était projetée. Les observateurs devaient préciser pour chaque cas (différentes combinaisons de luminances de cible, de fond et de taille de cible) s'ils pouvaient détecter la cible ou non.

Toutes ces premières expériences utilisaient des anneaux de Landolt et d'autres cibles stationnaires placées sur la chaussée ou les accotements afin d'évaluer la qualité de l'éclairage routier (de Boer et Schreuder 1967; Bommell et de Boer 1980). Après différents essais de tâches visuelles, celle qui a été adoptée le plus largement par la communauté de l'éclairage routier fut la détection d'une cible carrée de 20 cm de côté ayant un contraste intrinsèque avec la luminance de chaussée égal à 0.33 et placée à 100 m devant le conducteur. Ce modèle est encore couramment utilisé de nos jours, tant en éclairage routier classique qu'en application spécifique aux tunnels. Les niveaux de luminance mis en place en section courante sont donc dérivés de ces expériences et notamment des travaux de Blackwell qui constituent la base de l'éclairage routier tel qu'on l'appréhende aujourd'hui.

A la suite de retours d'expérience sur des tunnels réels, un critère de confort et de sécurité supplémentaire est venu s'ajouter à l'approche purement axée sur la visibilité. Ce critère tenait compte du trafic généralement observé sur le tunnel considéré : les niveaux de luminance étaient légèrement rehaussés lorsque celui-ci était considéré comme important. Cette règle est valable pour les 3 organismes étudiés en section **1.3.2.3 Section courante**. Elle est considérée comme une règle de « confort » par de nombreux chercheurs car elle ne concerne pas directement la visibilité d'une cible. En effet, comme mentionné précédemment, la notion de visibilité d'un obstacle est définie par la taille angulaire de ce dernier, sa luminance, ainsi que le contraste de luminance avec l'environnement de fond. L'augmentation de la densité de trafic n'influe sur aucune de ces variables et n'est donc pas directement corrélée à la notion de visibilité, c'est pourquoi la prise en compte de cette donnée dans les niveaux de luminance finaux à mettre en œuvre est considérée comme un critère de confort.

Les règles de dimensionnement pour l'éclairage de section courante se basent donc en grande partie sur les expériences de Weston et Blackwell.

Il est à noter que les règles établies pour la zone de sortie n'ont pas fait l'objet de beaucoup d'études dédiées. Nous n'avons pas trouvé d'articles traitant spécifiquement de ce sujet et il semble que les niveaux de renfort proposés en sortie se basent sur des retours d'expérience ou sur l'expertise d'acteurs du monde des tunnels.

1.3 Méthodes de dimensionnement actuelles

1.3.1 Eclairages diurne et nocturne - Distinction entre tunnels courts et tunnels longs

1.3.1.1 Eclairage diurne des tunnels courts

Afin de résoudre les problèmes d'adaptations spatiale et temporelle, les systèmes d'éclairage installés en tunnel doivent respecter différentes règles. Ces dernières sont généralement séparées en deux catégories : celles applicables aux tunnels courts et celles applicables aux tunnels longs. Cette section détaille les règles applicables pour les tunnels courts pour les différents documents d'étude (CIE, CEN et CETU). Les règles applicables aux cas des tunnels longs seront présentées en section **1.3.2 Dimensionnement de l'éclairage diurne des tunnels longs**.

Méthode CIE

La CIE considère 3 catégories de tunnels différentes (CIE 88 2004), à savoir les tunnels géométriquement longs, les tunnels visuellement longs et les tunnels courts. Les tunnels

visuellement longs désignent des tunnels courts géométriquement parlant, mais pour lesquels les observateurs ne peuvent distinguer la sortie en regardant depuis la distance d'arrêt avant le portail d'entrée du tunnel.

En pratique, la distinction se fait au cas par cas en utilisant un arbre de décision (présenté en Figure 1-9).

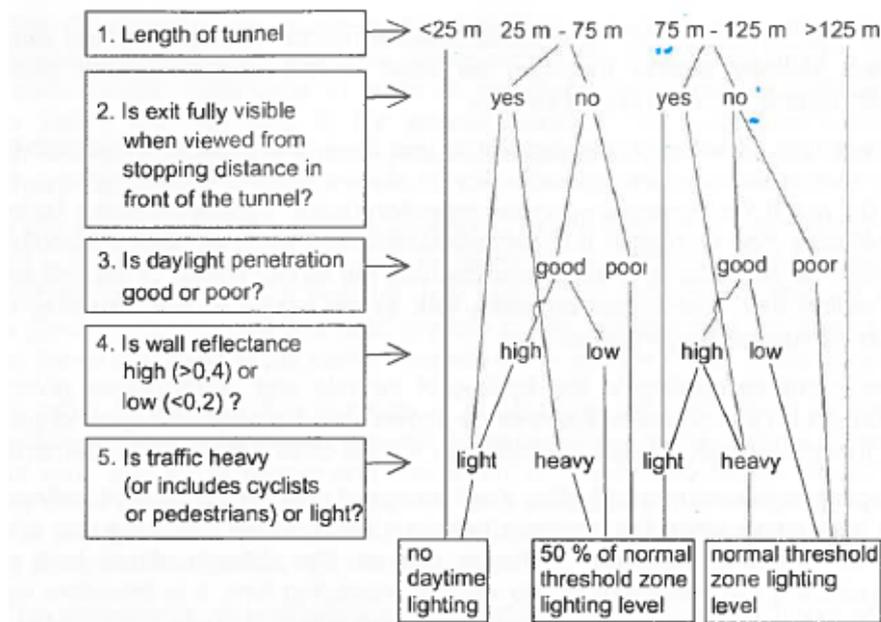


Figure 1-9 Arbre de décision de la CIE pour l'éclairage des tunnels en fonction de leur longueur (CIE 88 2004)

Les tunnels dont la longueur totale est inférieure à 125 mètres sont considérés comme des tunnels courts. Pour ces tunnels, l'arbre de décision (Figure 1-9) permet de déterminer le régime d'éclairage approprié. Tous les autres tunnels sont donc considérés comme des tunnels longs. On ne distingue que 3 cas de figure pour l'éclairage des tunnels courts, à savoir l'éclairage type pour tunnels longs, ce même éclairage type mais en diminuant de moitié les niveaux d'éclairement en zone d'entrée (« threshold zone » dans la Figure 1-9), et enfin l'absence d'éclairage diurne.

Méthode CEN

Le CEN considère que les tunnels d'une longueur inférieure à 25 m ne nécessitent jamais d'éclairage diurne, tandis que les tunnels de plus de 200 m nécessitent toujours une forme d'éclairage (CEN 2006). Pour les tunnels compris entre ces deux extrêmes, une méthode basée sur le Look-Through Percentage (LTP) permet de clarifier les besoins d'éclairage au cas par cas. Globalement, le LTP est donné par le pourcentage que représente la surface de la sortie apparente par rapport à la surface de l'entrée apparente (sachant que le plafond n'est pas pris

en compte étant donné qu'il ne cache généralement pas d'obstacles). Les surfaces prises en compte sont données en exemple dans la Figure 1-10.

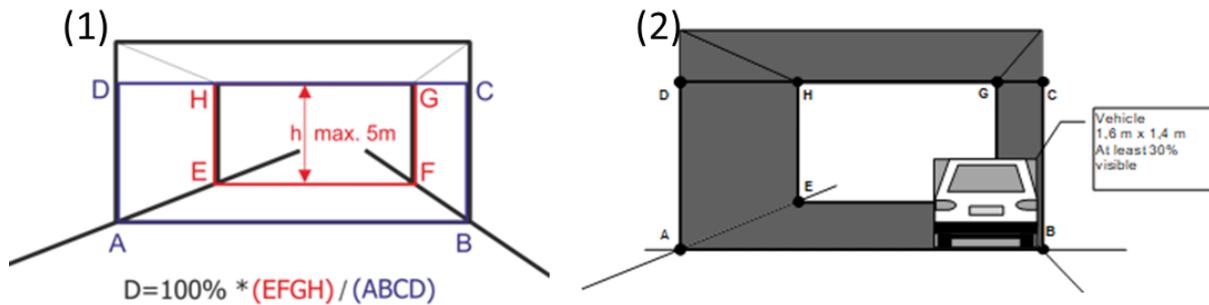


Figure 1-10 (1) Principe de calcul du LTP ; (2) Objet critique utilisé par la méthode dans le cas d'un trafic motorisé

Une fois ce LTP calculé, les différentes valeurs obtenues vont permettre de déterminer le régime d'éclairage à mettre en place (Tableau 1-2)

Tableau 1-2 Besoins en éclairage artificiel en tunnels courts en fonction de la valeur de LTP mesurée

	LTP < 20%	20% < LTP < 50%	LTP > 50%
Eclairage artificiel diurne	Toujours nécessaire	Parfois nécessaire	Jamais nécessaire
Représentation schématique du cas de figure			

La catégorie de tunnels pour lesquels le LTP est compris entre 20% et 50% nécessite de plus amples informations afin de déterminer si un éclairage est nécessaire ou non, et le cas échéant quels régimes doivent être mis en place. Un objet critique est donc déterminé (automobile dans le cas de tunnels accueillant uniquement un trafic motorisé, voir Figure 1-10 (2) ; ou piéton et vélo dans le cas de tunnels accueillant un trafic mixte) et placé au milieu de sa voie de circulation. Tout comme pour le LTP, le pourcentage de l'objet se découpant sur la sortie (assimilé au pourcentage de l'objet vu par le conducteur) va permettre de déterminer si un éclairage diurne est nécessaire ou non (Tableau 1-3) en estimant si la surface de l'objet critique vue par le conducteur est suffisante pour lui permettre de le détecter.

Tableau 1-3 Besoins en éclairage artificiel en tunnels courts en fonction du pourcentage de visibilité de l'objet critique (P_{objet} désigne le pourcentage de la surface de l'objet pouvant être vue en contraste sur la sortie du tunnel)

20%<LTP<50%	$P_{\text{automobile}} < 30\%$	$P_{\text{piéton}} < 50\%$	Tout autre cas
Eclairage artificiel diurne	Nécessaire	Nécessaire	Non-nécessaire

Le CEN n'impose pas de moyens d'éclairage particuliers et laisse libre choix au concepteur, tant que les niveaux d'éclairement respectent les exigences stipulées pour les tunnels longs. Les méthodes possibles sont :

- La mise en place d'un éclairage artificiel classique ;
- La mise en place de « puits de lumière » laissant pénétrer la lumière naturelle en divers endroits du tunnel.

Méthode CETU

Le CETU considère deux catégories de tunnel : les tunnels longs et les tunnels courts. Le caractère long ou court d'un tunnel dépendra en premier lieu de la nature de ce dernier. En effet, la distinction se fait au cas par cas en utilisant un arbre de décision, mais contrairement à la CIE où un unique arbre pouvait être utilisé pour toutes les situations, le CETU a développé plusieurs arbres pour les différentes catégories de tunnels existantes. On distingue ainsi les tunnels urbains, les tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse importante (cette catégorie est subdivisée en deux sous-catégories : les tunnels bidirectionnels et les tunnels unidirectionnels) et les tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse réduite. Les différents arbres de décision associés à chacune de ces catégories sont présentés en **annexe A : Arbres de décision pour l'éclairage des tunnels (CETU 2000)**. Un exemple est donné en Figure 1-11 pour les tunnels interurbains bidirectionnels à fort trafic ou à vitesse importante.

On note que seuls les tunnels urbains de moins de 125 m de long, les tunnels interurbains bidirectionnels à fort trafic (plus de 2000 véhicules par jour et par sens en moyenne annuelle) ou à vitesse importante (plus de 70 km/h) de moins de 150 m, et tous les autres types de tunnels de moins de 200 m de long peuvent potentiellement être considérés comme des tunnels courts.

Tout comme pour la CIE, les 3 cas de figure envisageables pour l'éclairage des tunnels courts sont :

- Le même régime d'éclairage que pour tunnels longs ;
- Le même régime d'éclairage que pour tunnels longs, mais en diminuant de moitié l'éclairage d'entrée ;
- L'absence d'éclairage diurne.

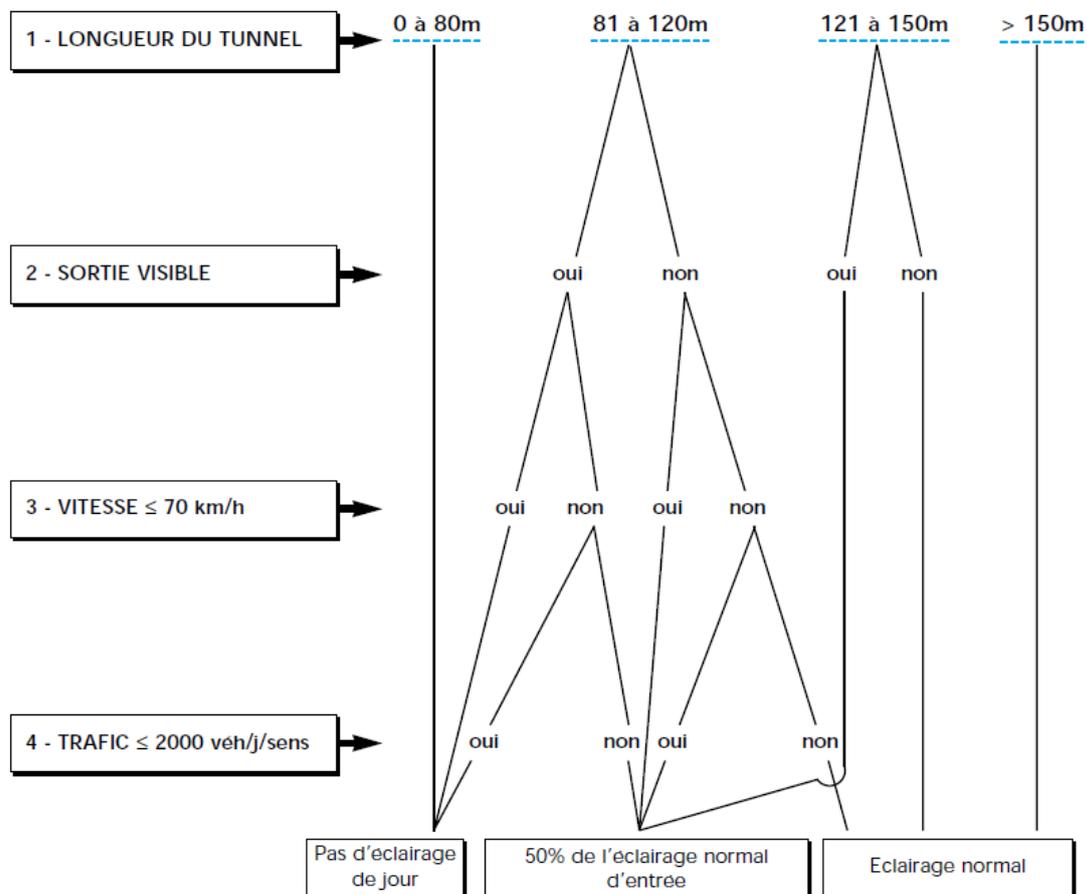


Figure 1-11 Arbre de décision de la méthode CETU pour les tunnels interurbains bidirectionnels à fort trafic ou à vitesse importante (CETU 2000)

1.3.1.2 Eclairage nocturne

L'éclairage nocturne est bien plus simple à mettre en œuvre que l'éclairage diurne, pour la simple raison qu'il ne se heurte pas aux problèmes d'adaptation rencontrés le jour. Le découpage par zones d'éclairage mentionné en introduction n'est donc plus pertinent dans ce cas de figure et les niveaux de luminance sont simplement constants tout au long du tunnel. En pratique, le passage de l'éclairage diurne à l'éclairage nocturne, et inversement, se fait généralement grâce à une cellule photoélectrique positionnée aux abords du tunnel et reliée à l'automate de pilotage de l'installation d'éclairage : lorsque les valeurs d'éclairement en lumière naturelle tombent sous un certain seuil (en dessous de 100 lx pour la méthode CETU), le tunnel bascule en éclairage de nuit. Les critères de vérification de la qualité de l'éclairage mis en place seront donc les mêmes que ceux utilisés pour les zones de luminance constante en éclairage diurne.

Méthode CIE et CEN

La CIE et le CEN distinguent 2 cas de figure pour les recommandations en luminance de chaussée à l'intérieur d'un tunnel.

- Si le tunnel est situé sur une section de route éclairée, les niveaux de luminance à l'intérieur de l'ouvrage doivent être égaux à ceux mesurés sur cette portion de route.
- Si le tunnel est situé sur une portion de route non éclairée, la luminance de chaussée moyenne à l'intérieur du tunnel ne doit pas être inférieure à 1 cd/m².

Méthode CETU

Le CETU recommande des niveaux de luminance compris entre 1 et 2 cd/m². La limite inférieure devant être appliquée aux tunnels situés sur des routes non éclairées.

1.3.2 Dimensionnement de l'éclairage diurne des tunnels longs

Comme on l'a vu dans la partie précédente, les règles de dimensionnement de l'éclairage pour tunnels longs constituent la base des règles applicables aux tunnels courts, puisque le scénario intermédiaire que l'on distingue généralement consiste à appliquer la moitié des niveaux d'éclairage nécessaires en tunnels longs. Du point de vue de l'éclairage, les tunnels sont habituellement découpés en plusieurs zones (présentées en section **0.1.4.1 Enjeux de l'éclairage diurne**), chacune d'entre elles répondant à des besoins spécifiques en termes d'adaptation et de visibilité. Cette section s'intéressera aux règles de dimensionnement associées à chacune de ces zones par nos 3 documents d'étude. Pour mémoire, le document CIE (CIE 88 2004) fait appel à la méthode L_{seq} et le document du CEN (CEN 2006) fait appel à la méthode L_{20} . Le document CETU (CETU 2000) présente quant à lui la méthode éponyme. Par souci de lisibilité et de concision, les méthodes de dimensionnement seront présentées zone d'éclairage par zone d'éclairage, dans un tableau de synthèse dédié. Les croix rouges indiquées dans ces tableaux de synthèse signifient que le paramètre considéré n'est pas pris en compte dans la méthode. Les cases jaunes indiquent que le paramètre est pris en compte, mais de manière moins précise que pour les autres méthodes. Enfin, les cases vertes indiquent que le paramètre est pris en compte de la manière la plus optimale parmi les 3 méthodes (l'attribution des couleurs a été faite par appréciation de l'auteur).

1.3.2.1 Zone d'entrée

		Méthode L_{20} (CEN)	Méthode L_{seq} (CIE)	Méthode CETU
Conditions d'observation	Distance d'observation	Le L_{20} est caractérisé lorsque le conducteur est situé à une distance égale à la distance d'arrêt (DA) en amont de la tête d'entrée du tunnel.	La luminance de voile L_{seq} est caractérisée de la même manière que le L_{20} .	Le point d'observation du conducteur est situé à une distance égale à 1.5 fois la DA, mais les modifications de luminance apportées par la méthode (voir ci-après) se font au niveau de la DA.
	Champ visuel	Un champ visuel de 20° est pris en compte pour le calcul du L_{20} . La position des sources éblouissantes n'a pas d'impact sur la mesure.	Un champ visuel de 56.8° est pris en compte pour le calcul du L_{seq} . La position des sources éblouissantes a un impact sur la mesure (éblouissement plus important lorsqu'on se rapproche du champ de vision central).	Un champ visuel hémisphérique est pris en compte dans le calcul théorique du voile de Fry. La position des sources éblouissantes a un impact sur la mesure (éblouissement plus important lorsqu'on se rapproche du champ de vision central).
Paramètres pris en compte dans la méthode	Luminance moyenne en zone d'accès	Prise en compte via moyenne pondérée, sans considération de l'influence de la position des sources d'éblouissement (notée L_{20})	Prise en compte via une intégrale sur le champ visuel du conducteur, avec considération de la position des sources d'éblouissement (notée L_{seq})	Prise en compte via une intégrale sur le champ visuel du conducteur, avec considération de la position des sources d'éblouissement, dans le calcul théorique original (notée L_{FRY})
	Luminance perçue par le conducteur dans son champ de vision central (2°)	✗	✗	Pris en compte dans le calcul de la luminance d'adaptation du conducteur (notée L_{2°)
	Vitesse	Prise en compte via la DA pour le calcul de L_{20} , puis utilisée pour déterminer le coefficient k permettant de convertir L_{20} en L_{th}	Prise en compte via la DA	Prise en compte via la DA
	Type d'installation	✗	Pris en compte via un paramètre de qualité de contraste (noté q_c)	Pris en compte via un paramètre de qualité de contraste (noté q_c)
	Voile d'atmosphère	✗	Pris en compte dans le calcul de L_{th} (noté L_{atm})	Pris en compte dans le calcul de la luminance d'adaptation du conducteur (noté L_{atm})
	Facteur d'extinction de l'air intérieur	✗	✗	Pris en compte dans le calcul du voile d'atmosphère à l'intérieur du tunnel et du facteur de transmission de l'atmosphère à l'intérieur du tunnel (noté K)
	Caractéristique de diffusion des particules	✗	✗	Prise en compte dans le calcul du voile d'atmosphère à l'intérieur du tunnel (noté Ω)
	Voile de pare-brise	✗	Pris en compte dans le calcul de L_{th} (noté L_{pb})	Pris en compte dans le calcul de la luminance d'adaptation du conducteur (noté L_{pb})
	Voile lié à l'environnement (= luminance moyenne en zone d'accès)	Pris en compte (noté L_{20})	Pris en compte (noté L_{seq})	Pris en compte (noté L_{FRY})

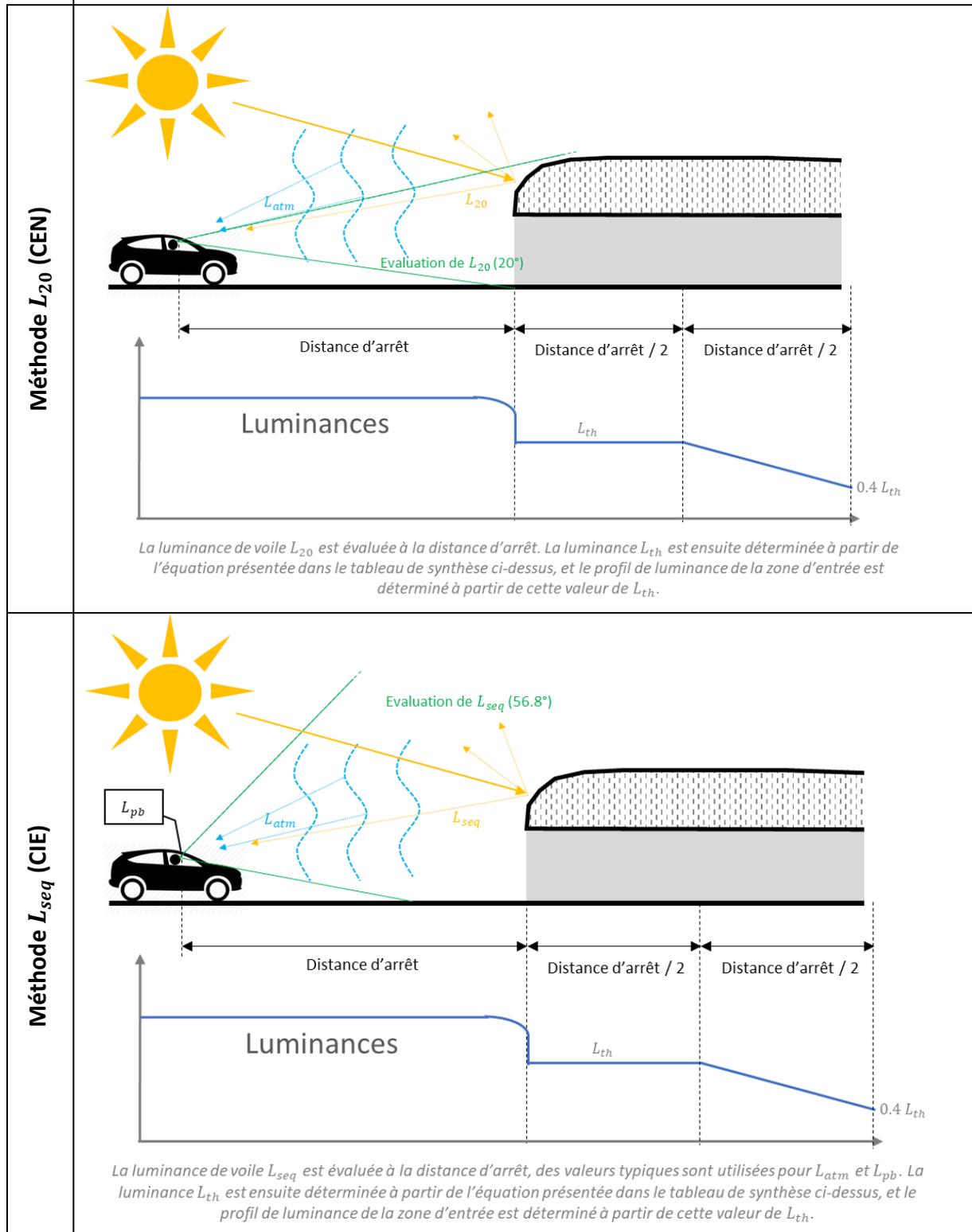
		Méthode L_{20} (CEN)	Méthode L_{seq} (CIE)	Méthode CETU
Paramètres pris en compte dans la méthode	Facteur de transmission de l'atmosphère à l'extérieur du tunnel	✘	Pris en compte dans le calcul de L_{th} (noté τ_{atm} et généralement pris égal à 1)	Pris en compte dans le calcul de la luminance d'adaptation du conducteur et dans celui de la luminance de chaussée nécessaire pour résoudre le problème d'adaptation spatiale (noté τ_{atm} et généralement pris égal à 1). Le facteur de transmission de l'atmosphère à l'intérieur du tunnel est également pris en compte dans les calculs cités ci-dessus. il est cependant défini par une formule et non par une constante, donnée dans la partie Equations de ce tableau (voir page 83)
	Facteur de transmission du pare-brise	✘	Pris en compte dans le calcul de L_{th} (noté τ_{pb} et généralement pris égal à 0.8)	Pris en compte dans le calcul de la luminance d'adaptation du conducteur et dans celui de la luminance de chaussée nécessaire pour résoudre le problème d'adaptation spatiale (noté τ_{pb} et généralement pris égal à 0.85)
	Facteur de réflexion de la cible	✘	Pris en compte dans le calcul de L_{th} (noté ρ et généralement fixé à 0,2)	Pris en compte dans le calcul de la luminance de chaussée nécessaire pour résoudre le problème d'adaptation spatiale (noté ρ et généralement fixé à 0,3)
	Facteur de réflexion de la chaussée	✘	✘	Pris en compte dans le calcul du voile d'atmosphère à l'intérieur du tunnel (noté ρ_{ch} et dont la valeur est généralement approximée empiriquement à partir d'ordres de grandeur préétablis)
	Contraste minimal perceptible	✘	Pris en compte via une valeur fixée à 0,28 (noté C_m)	Pris en compte via une différence de luminance entre la cible et son environnement de fond, calculé en fonction de l'âge du conducteur, de la durée d'exposition de la cible, de la polarité du contraste, de la taille angulaire de la cible et de la luminance d'adaptation du conducteur (notée ΔL)
	Luminance du fond sur lequel la cible se détache	✘	✘	Prise en compte dans le calcul de l'écart de luminance nécessaire entre la cible et son environnement de fond (notée L_{fint})
	Age du conducteur	✘	✘	Pris en compte dans le calcul de l'écart de luminance nécessaire entre la cible et son environnement de fond (noté <i>Age</i> et généralement fixé à 40 ans)
	Durée d'exposition de la cible	✘	✘	Pris en compte dans le calcul de l'écart de luminance nécessaire entre la cible et son environnement de fond (notée <i>t</i> et généralement fixée à 1s)

		Méthode L_{20} (CEN)	Méthode L_{seq} (CIE)	Méthode CETU
Paramètres pris en compte dans la méthode	Taille angulaire de la cible	✗	✗	Prise en compte dans le calcul de l'écart de luminance nécessaire entre la cible et son environnement de fond (notée α)
	Polarité du contraste	✗	✗	Pris en compte dans le calcul de l'écart de luminance nécessaire entre la cible et son environnement de fond (l'objet cible est généralement considéré comme étant vu en contraste négatif). La prise en compte de la polarité du contraste se fait grâce à un facteur correctif noté F_{cp}
Equations prises en compte dans la méthode	Ecart de luminance nécessaire entre la cible et son environnement de fond	✗	Prise en compte sous la forme d'une valeur de contraste minimal perceptible fixée à 0,28 (notée Cm)	$\Delta L(\alpha, L_{f_{int}}, t, Age)$ $= 2.6 \times \left(\frac{\log(4.1925 L_{f_{int}}^{0.1556}) + 0.1684 L_{f_{int}}^{0.5867}}{\alpha} + 0.05946 L_{f_{int}}^{0.466} \right)^2 \times F_{cp} \times \frac{\alpha(\alpha, L_{f_{int}}) + t}{t} \times AF$
	Facteur correctif lié à la polarité du contraste	✗	✗	$F_{cp}(\alpha, L_{f_{int}})$ $= 1 - \frac{10^{-10} \cdot 10^{-0.125 \times [\log(L_{f_{int}} + 1)^2 + 0.0245]}}{2.4 \Delta L_{(t=2s)}} \times \alpha^{-0.6} L_{f_{int}}^{-0.1488}$
	Facteur correctif lié à la durée d'exposition	✗	✗	Voir équation [1-24] en section 1.2.1.3 Origines de la méthode CETU (CETU 1998)
	Facteur correctif lié à l'âge	✗	✗	$AF = \frac{(Age - 19)^2}{2160} + 0.99$
	Dimensionnement des niveaux d'éclairage	$L_{th} = k * L_{20}$	$L_{th} = \frac{\tau_{pb} \cdot L_{atm} + L_{pb} + L_{seq}}{(\tau_{pb} \cdot \tau_{atm}) \left(\frac{1}{C_m} \left[\frac{\rho_{obj}}{\pi \cdot q_c} - 1 \right] - 1 \right)}$	$L_{ch_{int}} = \frac{\Delta L(L_{adap})}{\tau_{pb} \tau_{atm} \left(1 - \frac{\rho_{obj}}{q_c \pi} \right)}$
	Luminance d'adaptation	✗	✗	$L_{adap} = \tau_{atm} \tau_{pb} (L_{20} + L_{FRY}) + \tau_{pb} L_{atm} + L_{pb}$

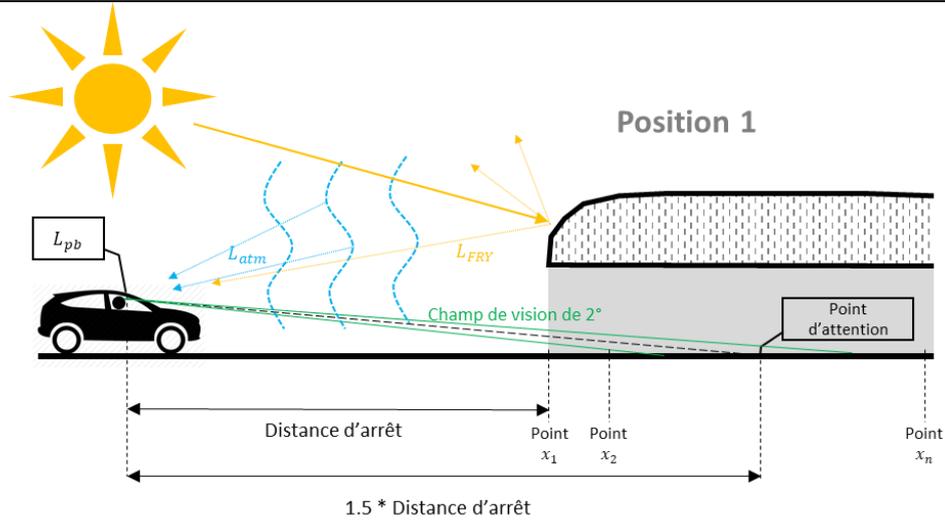
		Méthode L_{20} (CEN)	Méthode L_{seq} (CIE)	Méthode CETU
Equations prises en compte dans la méthode	Luminance de voile due à l'environnement	$L_{20} = \gamma L_c + \rho L_R + \varepsilon L_E$ Avec γ , ρ et ε les pourcentages de surface occupée respectivement par le ciel, la route et l'environnement dans un champ de vision de 20° et L_c , L_R et L_E les luminances moyennes respectives de ces éléments	$L_{seq} = 5,1 \times 10^{-4} \sum [(\tau_{pb} L_{ij}) + L_{pb}]$ Avec L_{ij} la luminance moyenne de chaque section du diagramme d'Adrian (voir Figure 1-1)	$L_{FRY} = K_1 d$ Avec K_1 égal à 4, 3 ou 1.5 pour modéliser respectivement les voiles "Fort", "Moyen" et "Faible", et d la distance séparant le conducteur de l'entrée du tunnel. Si $d > 100$ m, la valeur de L_{FRY} est constante égale à la valeur obtenue à 100 m.
	Luminance de voile d'atmosphère à l'extérieur du tunnel	✘	Fixée à 300 cd/m ² , 200 cd/m ² ou 100 cd/m ² pour les niveaux de voile respectifs "Fort", "Moyen" ou "Faible"	$L_{atm} = K_2 d$ Avec K_2 égal à 3, 2 ou 1 pour modéliser respectivement les voiles "Fort", "Moyen" et "Faible", et d la distance séparant le conducteur de l'entrée du tunnel.
	Facteur de transmission de l'atmosphère à l'intérieur du tunnel	✘	Pas de distinction entre facteurs de transmission de l'atmosphère pour l'intérieur et l'extérieur du tunnel	$\tau_{atm} = \exp(-K y)$ Avec y la distance entre l'entrée du tunnel et le point d'observation du conducteur
	Luminance de voile d'atmosphère à l'intérieur du tunnel	✘	Pas de distinction entre luminances de voile d'atmosphère intérieure et extérieure	$L_{atm} = \int \exp(-K y) \frac{K \pi}{\Omega \rho_{ch}} L_{ch_{int}}(y) dy$ Avec $L_{ch_{int}}(y)$ la luminance de la chaussée au niveau du point considéré, situé entre l'entrée du tunnel et le point d'observation du conducteur
	Luminance de voile de pare-brise	✘	Fixée à 200 cd/m ² , 100 cd/m ² ou 50 cd/m ² pour les niveaux de voile respectifs "Fort", "Moyen" ou "Faible"	$L_{pb} = K_3 d$ Avec K_3 égal à 4, 2 ou 1 pour modéliser respectivement les voiles "Fort", "Moyen" et "Faible", et d la distance séparant le conducteur de l'entrée du tunnel. Si $d > 50$ m, la valeur de L_{pb} est constante égale à la valeur obtenue à 50 m.
Méthode de dimensionnement	Profil de décroissance de luminance	La zone d'entrée a une longueur fixe égale à la distance d'arrêt définie pour la vitesse de référence de l'ouvrage. Sur la première moitié de cette zone, les valeurs de luminance de chaussée sont fixes égales à une valeur maximale notée L_{th} . Sur la deuxième moitié de cette zone, les niveaux décroissent linéairement jusqu'à atteindre la valeur de 0,4 L_{th} en fin de zone d'entrée.	Le profil de décroissance est le même que pour la méthode L_{20}	Il n'y a pas de profils de décroissance de luminance prédéterminés dans la méthode CETU, la résolution se fait par avancée progressive de l'observateur virtuel et par résolution du problème d'adaptation spatiale dans chacune de ses positions successives

		Méthode L_{20} (CEN)	Méthode L_{seq} (CIE)	Méthode CETU
Méthode de dimensionnement	<i>Description de la méthode de résolution</i>	<p>La luminance moyenne dans un cône de 20° est déterminée lorsque l'observateur virtuel est situé à la distance d'arrêt de l'entrée du tunnel.</p> <p>Cette valeur est ensuite multipliée par un coefficient k dépendant de la vitesse limite imposée dans l'ouvrage afin de donner la valeur maximale L_{th} recherchée.</p>	<p>Les valeurs de voile d'atmosphère et de voile de pare-brise sont données par des tableaux indiquant des valeurs typiques pour les tunnels. Les valeurs de facteurs de transmission d'atmosphère et de pare-brise sont généralement fixées par des constantes.</p> <p>La luminance de voile L_{seq} est calculée à partir de l'équation de luminance de voile due à l'environnement et du diagramme d'Adrian (présenté en Figure 1-1).</p> <p>La résolution de l'équation de dimensionnement des niveaux d'éclairage permet ensuite de déterminer la valeur de L_{th} recherchée.</p>	<p>Une première approximation consiste à éclairer l'entrée du tunnel selon la méthode L_{20}.</p> <p>L'observateur est ensuite initialement placé à la DA de l'entrée du tunnel. Son point d'attention (l'endroit où porte son regard) est situé à une distance égale à 1,5 fois la DA devant lui. Les luminances de voile sont calculées grâce aux équations correspondantes et les valeurs de facteurs de transmission d'atmosphère et de pare-brise sont données par des constantes.</p> <p>La luminance d'adaptation du conducteur est ensuite calculée grâce à l'équation correspondante.</p> <p>La valeur de L_{adap} est alors utilisée dans l'équation permettant de calculer l'écart de luminance nécessaire entre la cible et son environnement de fond (L_{adap} fait office de luminance de fond).</p> <p>La luminance de chaussée nécessaire pour résoudre le problème d'adaptation spatiale est ensuite déterminée grâce à l'équation de dimensionnement des niveaux d'éclairage. Si cette luminance de chaussée est différente de celle initialement mise en place par la méthode L_{20}, alors la luminance de chaussée est corrigée au niveau du point situé à la DA du conducteur et toutes les luminances observées pour les points suivants sont multipliées par le rapport de la luminance corrigée sur la luminance initialement mise en place grâce à la méthode L_{20}.</p> <p>L'observateur avance ensuite de 10 m et la méthode est réutilisée pour ce nouveau point d'étude.</p> <p>La méthode est stoppée lorsque le besoin en luminance sur la chaussée est proche des niveaux habituellement mis en place en section courante.</p>

Illustrations graphiques des méthodes

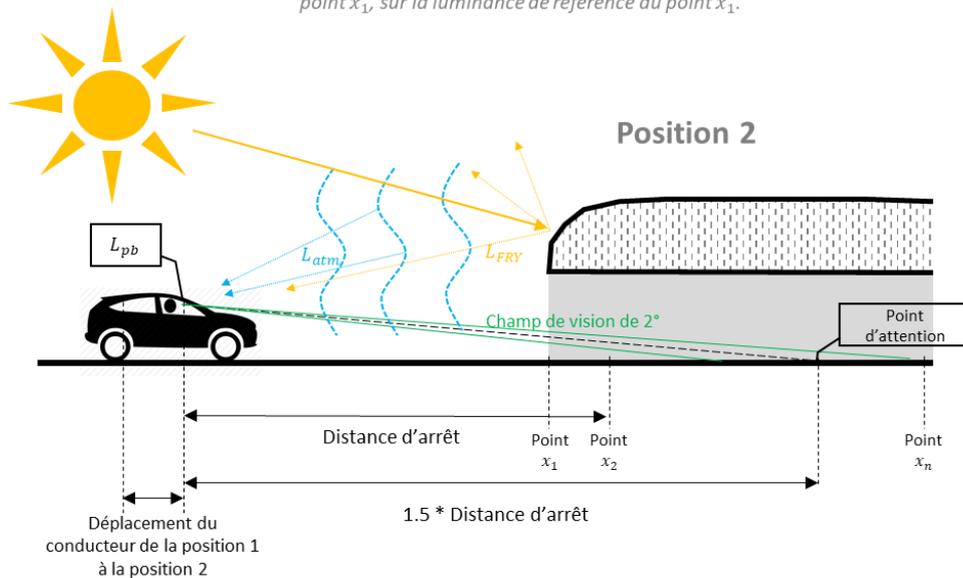


Illustrations graphiques des méthodes



La luminance d'adaptation est calculée en sommant la luminance moyenne dans un champ de vision étroit de 2° centré sur le point d'attention du conducteur et les différentes luminances de voile (en tenant compte des facteurs de transmission des milieux traversés). Cette luminance d'adaptation permet de définir le seuil de différence de luminance nécessaire pour que la cible de référence placée au point x_1 soit visible. Ce seuil permet à son tour de déterminer la luminance de chaussée nécessaire au point x_1 . Si la luminance est corrigée par rapport à la situation de référence au point x_1 , elle l'est également pour tous les points situés après x_1 . Cette correction aux points x_2, x_3, \dots, x_n se fait en multipliant la luminance de référence en ces points par le rapport de la luminance corrigée au point x_1 , sur la luminance de référence au point x_1 .

Méthode CETU



On réitère le même processus de calcul que pour la position 1. On notera que la luminance au point x_2 a potentiellement déjà été corrigée lors de la première étape de calcul. Si les besoins estimés lors de cette étape de calcul sont toujours supérieurs à la luminance corrigée lors de l'étape précédente, on la modifie à nouveau, ainsi que celle de tous les points situés après x_2 .
On poursuit ainsi le processus de calcul en déplaçant l'observateur afin qu'il se trouve à la distance d'arrêt de x_3 , puis de x_4 , et ainsi de suite.

1.3.2.2 Zone de transition

		Méthode L_{20}	Méthode L_{seq}	Méthode CETU
Conditions d'observation	<i>Distance d'observation</i>	Un profil prédéterminé est utilisé, ce paramètre n'est donc pas pertinent ici.	Idem que pour la méthode L_{20} .	Le point d'observation du conducteur est situé à une distance égale à 1.5 fois la DA, mais les modifications de luminance apportées par la méthode (voir ci-après) se font au niveau de la DA.
Paramètres pris en compte dans la méthode	<i>Luminance maximale de référence</i>	Les courbes de décroissance de luminance admissibles sont exprimées sous forme de pourcentage d'une luminance de référence : la valeur de luminance maximale de référence. Elle est prise en compte égale à L_{th} ici.	Prise en compte égale à L_{th}	Prise en compte égale à la valeur de luminance d'adaptation du conducteur lorsque celui-ci est situé à la DA de l'entrée du tunnel.
	<i>Temps passé dans le tunnel</i>	Pris en compte dans la conception de la courbe de décroissance de luminance admissible	Pris en compte dans la conception de la courbe de décroissance de luminance admissible	Pris en compte dans la conception de la courbe de décroissance de luminance admissible et donc dans les équations la définissant (noté t)
	<i>Vitesse</i>	Prise en compte afin de pouvoir effectuer une conversion temps de parcours -> distance	Prise en compte afin de pouvoir effectuer une conversion temps de parcours -> distance	Prise en compte afin de pouvoir effectuer une conversion temps de parcours -> distance
	<i>Luminance d'adaptation</i>	✘	✘	Prise en compte dans le calcul du déficit de luminance à combler pour assurer l'adaptation temporelle des usagers. Elle est calculée selon la formule présentée dans le tableau de synthèse des méthodes de dimensionnement de la zone d'entrée (notée L_{adapt}). Les luminances de voile sont donc prises également en compte par le biais de cette formule.
	<i>Luminance de chaussée moyenne d'une « tranche » du tunnel</i>	✘	✘	Prise en compte dans le calcul de la contribution d'une "tranche" de tunnel à la luminance d'adaptation (notée L_{chi})
	<i>Influence de la luminance de chaussée sur la luminance d'adaptation</i>	✘	✘	Prise en compte sous la forme d'un coefficient de conversion (noté c_i)

		Méthode L_{20}	Méthode L_{seq}	Méthode CETU
Equations prises en compte dans la méthode	<i>Luminance nécessaire pour assurer l'adaptation temporelle</i>	Elle se manifeste sous forme d'une courbe exprimant le pourcentage de luminance admissible par l'utilisateur en fonction du temps. En pratique, elle peut se lire graphiquement (le profil de décroissance admissible pour assurer l'adaptation temporelle est donné dans le tableau d'illustration graphique des méthodes en page 90).	Idem que pour la méthode L_{20}	$f(t) = 10^{\frac{1}{0.414+0.175t}-2.411}$ $f(t) = 10^{-0.1t-1.138}$ Ces deux équations modélisent respectivement les première et deuxième moitié de la courbe de décroissance, exprimée comme un pourcentage de luminance admissible en fonction du temps (la luminance limite pour assurer l'adaptation temporelle est notée L_{db})
	<i>Déficit de luminance total</i>	✘	✘	$\Delta L = L_{db} - L_{adapt}$
	<i>Contribution d'une « tranche » de tunnel à la luminance d'adaptation</i>	✘	✘	$L_i = L_{ch_i} c_i$
	<i>Modification de luminance à apporter à une « tranche » de tunnel</i>	✘	✘	$\Delta L_{ch_i} = \Delta L \frac{c_i}{\sum c_i^2}$
Méthode de dimensionnement	<i>Profil de décroissance de luminance</i>	Le profil de décroissance de luminance est exprimé grâce à une courbe donnant le pourcentage de luminance admissible en fonction du temps. Cette courbe correspond au profil de décroissance typique mis en place en zone de transition et est indiquée dans le tableau « Illustrations graphiques des méthodes de dimensionnement en zone de transition » en page 90.	Le profil de décroissance est le même que pour la méthode L_{20}	Il n'y a pas de profils de décroissance de luminance prédéterminés dans la méthode CETU, la résolution se fait par avancée progressive de l'observateur virtuel et par résolution du problème d'adaptation temporelle dans chacune de ses positions successives. La courbe de décroissance admissible donne un profil typique pour la résolution du problème d'adaptation temporelle, mais comme le CETU considère une unique zone d'entrée et que les problèmes d'adaptations spatiale et temporelle sont traités simultanément, ce profil ne peut être appliqué tel quel.

		Méthode L_{20}	Méthode L_{seq}	Méthode CETU
Méthode de dimensionnement	<i>Description de la méthode de résolution</i>	<p>En considérant le tableau « Illustrations graphiques des méthodes de dimensionnement en zone de transition » en page 90, la vitesse limite imposée dans l'ouvrage, ainsi que la luminance L_{th} déterminée précédemment avec la méthode de dimensionnement de la zone d'entrée, on obtient le profil de décroissance de luminance à mettre en place dans la zone de transition.</p>	<p>Le déroulement est exactement le même que pour la méthode L_{20}.</p>	<p>La résolution du problème d'adaptation temporelle se fait parallèlement à celle du problème d'adaptation spatiale. Ainsi, pour chaque position successive de l'observateur, sa luminance d'adaptation L_{adap} est calculée pour les conditions résolvant l'adaptation spatiale, puis cette valeur est comparée au point correspondant sur le profil de décroissance admissible (indiqué dans le tableau « Illustrations graphiques des méthodes de dimensionnement en zone de transition » en page 90) : la valeur de luminance issue de la lecture de ce point est notée L_{ab}. Si la luminance d'adaptation est trop faible pour assurer l'adaptation temporelle, un certain déficit de luminance ΔL doit donc être comblé.</p> <p>Le déficit de luminance (correspondant à la modification de luminance à apporter), ainsi que la luminance d'adaptation de l'utilisateur, sont obtenus en considérant la totalité du champ de vision de l'observateur. Ainsi, le tunnel est découpé en "tranches" représentant les différentes zones d'influence du champ de vision de l'observateur, la $i^{\text{ème}}$ tranche apportant une contribution L_i à la luminance d'adaptation totale du conducteur. Le déficit de luminance total ΔL est également considéré comme une somme de déficits sur chaque tranche. Chacun de ces déficits élémentaires correspond à une fraction du déficit total, exprimée par ΔL_i qui désigne le déficit de luminance pour la $i^{\text{ème}}$ tranche du tunnel. Ce déficit peut être répercuté sur la luminance de chaussée de cette $i^{\text{ème}}$ tranche de tunnel : on le note ΔL_{ch_i}. Ces déficits élémentaires constituent également l'apport de luminance de chaussée nécessaire à la tranche i pour assurer l'adaptation temporelle de l'observateur.</p> <p>Pour rappel, ce processus est répété pour toutes les positions successives de l'observateur, jusqu'à ce que les niveaux de luminance nécessaires sur la chaussée soient de l'ordre de quelques candelas par mètre carré, c'est-à-dire assimilables à des niveaux de section courante.</p>

Illustrations graphiques des méthodes

<p>Méthode L_{20} et L_{seq}</p>	<p style="text-align: center;">Loi de décroissance admissible utilisée par la CIE</p> <p style="text-align: center;"> — fonction de décroissance de la CIE 70 km/h (% de décroissance admissible) — fonction de décroissance de la CIE 110 km/h (% de décroissance admissible) </p>
<p>Méthode CETU</p>	<p style="text-align: center;">Loi de décroissance admissible utilisée par le CETU</p>

1.3.2.3 Section courante

		Méthode L_{20}	Méthode L_{seq}	Méthode CETU
Paramètres pris en compte dans la méthode	Vitesse limite imposée dans l'ouvrage	Prise en compte via la distance d'arrêt	Prise en compte via la distance d'arrêt	Prise en compte via 2 catégories : vitesse inférieure à 70 km/h et vitesse supérieure à 70 km/h
	Densité de trafic fréquentant l'ouvrage	Pris en compte via 3 catégories : trafic faible, trafic moyen et trafic fort (voir annexe B : Niveaux de luminance en section courante recommandés par la CIE, le CEN et le CETU)	Pris en compte via 2 catégories : trafic léger et trafic lourd (voir annexe B)	Pris en compte via 2 catégories : trafic faible et trafic fort (voir annexe B)
	Type d'ouvrage	X	Pris en compte via 2 catégories : les tunnels « longs » et « très longs » (section courante non franchie en 30 secondes par un conducteur roulant à la vitesse limite autorisée)	Pris en compte via 3 catégories : les tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse inférieure à 70 km/h, les tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse supérieure à 70 km/h et les tunnels urbains
	Type de route	X	X	Pris en compte via 2 catégories : les autoroutes et les autres types de route
Méthode de dimensionnement	Description de la méthode de résolution	Les niveaux de luminance de chaussée à mettre en œuvre sont résumés en annexe B. Ils dépendent de la densité de trafic fréquentant le tunnel et de la distance d'arrêt associée à la vitesse limite autorisée dans l'ouvrage.	Les niveaux de luminance de chaussée à mettre en œuvre sont résumés en annexe B. Tout comme pour la méthode L_{20} , ils dépendent de la densité de trafic fréquentant le tunnel et de la distance d'arrêt associée à la vitesse limite autorisée dans l'ouvrage. Ils dépendent également du type de tunnel considéré (long ou très long).	Les niveaux de luminance de chaussée à mettre en œuvre sont résumés en annexe B. Ils dépendent du type de tunnel étudié, du type de route sur lequel l'ouvrage est construit, de la densité de trafic fréquentant le tunnel et de la vitesse limite autorisée.

1.3.2.4 Zone de sortie

		Méthode L_{20}	Méthode L_{seq}	Méthode CETU
Paramètres pris en compte dans la méthode	Risques identifiés au niveau de la sortie de l'ouvrage	✓✓	✓✓	Pris en compte uniquement pour les risques d'éblouissement
	Longueur du tunnel	✗	Prise en compte via 2 catégories : les tunnels « longs » et « très longs » (voir définition en annexe B : Niveaux de luminance en section courante recommandés par la CIE, le CEN et le CETU)	✗
Méthode de dimensionnement	Description de la méthode de résolution	L'éclairage spécifique en zone de sortie n'est mis en place que si des risques particuliers ont été identifiés en sortie de tunnel. Celui-ci doit alors permettre d'atteindre des niveaux de luminance 5 fois supérieurs à ceux de la section courante et ce pour toute la longueur de la zone de sortie (égale à la DA).	Tout comme pour la méthode L_{20} , l'éclairage spécifique en zone de sortie n'est mis en place que pour des conditions particulières : si des risques spécifiques ont été identifiés en sortie de tunnel ou si le tunnel est considéré comme étant "très long". Les niveaux de luminance doivent alors être augmentés linéairement sur une distance égale à la DA jusqu'à atteindre un niveau de luminance 5 fois plus élevé que celui de la section courante 20 m avant le portail de sortie (les niveaux continuent d'augmenter ensuite jusqu'au portail de sortie).	Tout comme pour les deux autres méthodes, l'éclairage de sortie n'est mis en place que pour des conditions spécifiques. Le choix de cette mise en place est défini par les risques d'éblouissement en sortie de tunnel : orientation est-ouest, sortie donnant sur la mer, ... Des niveaux de luminance plus élevés (de l'ordre de 20 à 40 cd/m ² , soit un ratio compris entre 5 et 10 par rapport aux niveaux de luminance de la section courante globalement) doivent alors être mis en place sur une distance de 50 à 100 m avant le portail de sortie.

Des critères complémentaires sont parfois utilisés pour évaluer la qualité de l'éclairage, ils sont présentés en **annexe C : Critères complémentaires pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage**. Les propriétés de réflexion de chaussée de référence utilisées pour les dimensionnements sont présentées en **annexe D : Caractérisation des propriétés de réflexion du revêtement de chaussée en éclairage routier**.

1.4 Pistes d'évolutions des règles de dimensionnement

Cette section recense les principales découvertes ayant suivi l'établissement des règles de dimensionnement de l'éclairage en tunnel, et dont ces dernières ne tiennent donc pas compte. En comparant les conditions d'expérimentation mises en place pour obtenir ces découvertes récentes et celles utilisées pour l'établissement des règles, il est possible de mettre en lumière des points de divergence pouvant invalider la pertinence de certaines règles établies.

Les découvertes listées dans cette section seront de deux natures : technologiques et physiologiques.

Les découvertes technologiques concernent principalement l'apparition des sources LEDs et de toutes les possibilités qu'elles offrent. Les découvertes physiologiques traitent, quant à elles, du fonctionnement du système visuel humain qui s'est précisé au fil des années.

1.4.1 Evolutions liées aux sources LEDs

1.4.1.1 Caractéristiques intrinsèques des sources LEDs

Les sources qualifiées de « traditionnelles » en tunnel sont les lampes Sodium Haute Pression (SHP) et les tubes fluorescents, dont les caractéristiques sont présentées en Figure 1-13. Les sources SHP ont été majoritairement utilisées depuis les années 70, à la suite des lampes Sodium Basse Pression (SBP), tandis que les tubes fluorescents étaient utilisés dès les années 40. D'autres technologies ont été utilisées ponctuellement dans certains projets de tunnels (induction, plasma, ...), sans pour autant s'imposer sur le marché comme avaient pu le faire les SHP et les tubes fluorescents. L'arrivée de la LED dans les années 2010 est venue bousculer cet ordre établi en s'imposant progressivement dans tous les domaines du marché de l'éclairage, et notamment celui des tunnels. Aujourd'hui, quasiment tous les projets de rénovation de l'éclairage ou de création de tunnels se font en LEDs et cette technologie tend à remplacer progressivement les sources dites traditionnelles.

Durée de vie et efficacité lumineuse

Les sources LEDs présentent une durée de vie bien plus importante que les sources traditionnelles, comme l'indique la Figure 1-13. Cette constatation a son importance dans la

prise en compte des coûts de maintenance, mais n'a pas particulièrement d'impact sur la pertinence des règles établies.

De la même manière, l'efficacité lumineuse des luminaires LEDs n'aura pas d'incidence sur la validité des règles, mais elle pourra en avoir sur les dépenses énergétiques. La Figure 1-12 présente les efficacités lumineuses des luminaires LEDs de la gamme Omnistar de la marque Comatelec Schröder.

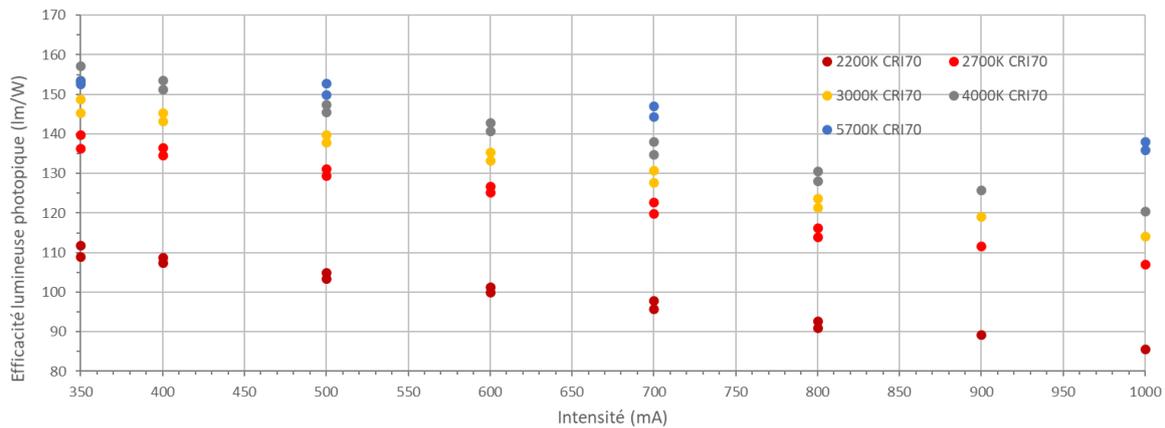


Figure 1-12 Efficacités lumineuses en fonction de l'intensité de courant traversant le luminaire pour la gamme de luminaires Omnistar de la marque Comatelec Schröder triée par températures de couleur

Les données collectées montrent des efficacités lumineuses moyennes comprises entre 100 lm/W et 150 lm/W en fonction de la température de couleur de la source (plus cette dernière est élevée, meilleure est l'efficacité lumineuse du luminaire). Une étude menée par le CETU visant à caractériser l'impact de la température de sources SHP sur leur efficacité lumineuse a permis de collecter des données sur une quinzaine de types de luminaires SHP. Les efficacités lumineuses mesurées variaient de 105 à 120 lm/W. Il apparaît ainsi que les luminaires LEDs présentant des températures de couleur de 2200 K ont des efficacités lumineuses inférieures à celles des luminaires SHP ; a contrario, les luminaires LEDs présentant des températures de couleur supérieures à 2700 K ont des efficacités lumineuses meilleures que celles des luminaires SHP. Pour ce qui est des luminaires à tubes fluorescents, leur efficacité lumineuse est généralement inférieure à 100 lm/W. L'efficacité lumineuse des luminaires LEDs a tendance à s'améliorer avec la progression de la technologie, bien qu'elle soit vouée à atteindre un palier maximal (Duboz 2019). Ainsi, le simple fait d'utiliser des LEDs présentant des températures de couleur supérieures à 2700 K (valable pour la gamme Omnistar), plutôt que des sources traditionnelles permet de réaliser des économies d'énergie, au vu de l'analyse des efficacités énergétiques des différents types de luminaires utilisés en tunnel. La Figure 1-13 résume les propriétés de chaque type de luminaire.

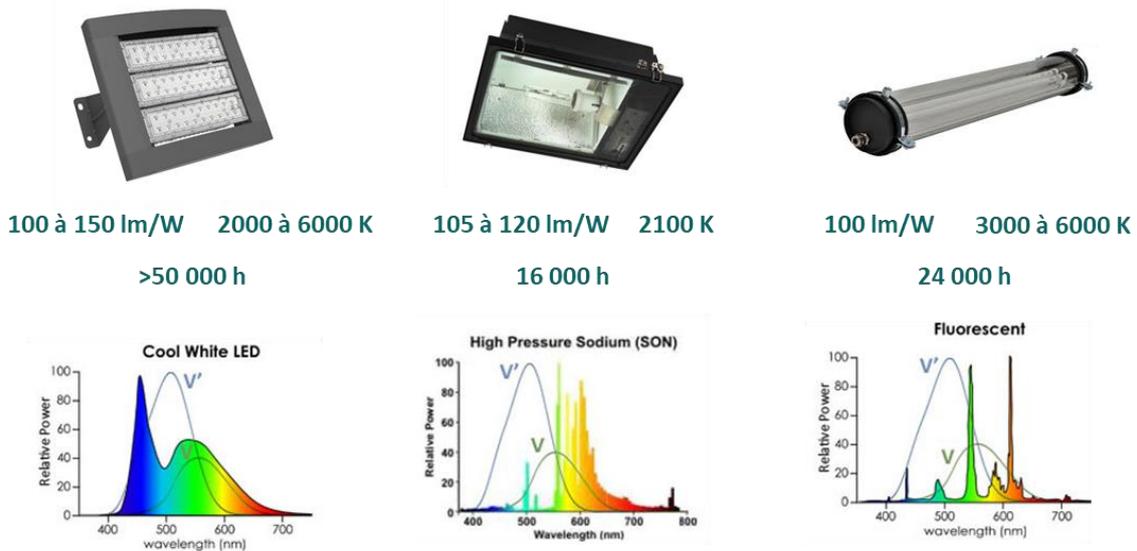


Figure 1-13 Spectres, efficacités lumineuses, températures de couleur et durées de vie typiques des trois types de sources lumineuses les plus utilisées en tunnels (LED, sodium haute pression, tube fluorescent), sur les spectres sont aussi représentées les sensibilités spectrales de l'œil en vision photopique (V, cônes uniquement) et en vision scotopique (V', bâtonnets uniquement).

Compacité

Les luminaires LEDs sont constitués d'un assemblage de puces, ce qui offre une grande flexibilité dans la conception de ces derniers en termes de forme et de taille notamment. Ainsi, contrairement aux sources traditionnelles qui ont une taille irréductible, les sources LEDs peuvent prendre n'importe quelles tailles et présenter une compacité très importante. La taille des luminaires utilisés va notamment influencer le rôle que ces derniers joueront dans le tunnel. Pour exemple, les tubes fluorescents sont exclusivement utilisés en section courante puisque leur forme longiligne permet de fournir un guidage visuel et une uniformité longitudinale corrects. En revanche, cette forme est particulièrement inadaptée pour la zone de renforcement puisque la trop grande taille des luminaires ne permet pas de créer un placement tel que les niveaux de luminance fournis soient suffisants.

Ainsi, les sources LEDs pourront jouer n'importe quel rôle dans un tunnel, notamment du fait de leur forme modifiable. De nombreux chercheurs ont tenté de déterminer si cette flexibilité de la forme des luminaires pouvait apporter d'autres avantages dont les concepteurs pourraient tirer parti afin d'optimiser l'éclairage des tunnels. C'était notamment le postulat de Kimura (Kimura et al. 2013) qui mena une expérience sur le tunnel de Shiratori au Japon afin d'investiguer l'impact de l'uniformité générale des niveaux de luminance sur les performances visuelles des usagers en section courante. L'expérience consistait en une comparaison des performances obtenues pour une zone éclairée par des tubes fluorescents et pour une zone éclairée par des luminaires LEDs. Ces derniers avaient été construits sur mesure afin de présenter une taille et un flux lumineux réduits : il était donc possible d'en installer un grand nombre et d'obtenir ainsi des valeurs d'uniformité générale habituellement

inaccessibles avec des sources traditionnelles. Cette méthode fut intitulée « *High Luminance Uniformity Method* » par Kimura et permettait d'atteindre des valeurs d'uniformités générale et longitudinale de l'ordre de 0.9, tandis que les valeurs obtenues pour les tubes fluorescents étaient plutôt aux alentours de 0.45. Les niveaux de luminance mis en place n'étaient pas les mêmes pour les deux installations : les tubes fluorescents permettaient d'obtenir des niveaux moyens de l'ordre de 3.5 cd/m^2 , contre 2.3 cd/m^2 pour les LEDs. Le protocole de Kimura consistait en une expérience psycho-visuelle portant sur le ressenti des observateurs vis-à-vis de plusieurs aspects de la scène. Parmi ces aspects figuraient notamment : le ressenti général, la luminosité de la chaussée, l'éblouissement, l'uniformité de la luminance sur la chaussée, mais également la détection d'obstacles et la visibilité des véhicules situés devant l'observateur. Kimura évalua donc les conditions de visibilité des usagers en s'appuyant sur leur ressenti plutôt que sur leurs performances et introduisit une tâche visuelle supplémentaire rarement prise en compte dans les expériences historiques à l'origine des règles de dimensionnement de l'éclairage : la visibilité de véhicules. L'approche de Kimura était donc plutôt inédite et apportait de nouvelles méthodes d'évaluation de la visibilité. L'évaluation du ressenti des observateurs se faisait grâce à une échelle à cinq niveaux allant de « bon » à « mauvais ». Les résultats de Kimura montrèrent que le ressenti des observateurs était globalement meilleur pour l'installation LED que pour l'installation classique, exception faite de l'éblouissement. En résumé, les usagers trouvaient la section courante du tunnel éclairée à 2.3 cd/m^2 par des LEDs globalement plus confortable que lorsqu'elle était éclairée à 3.5 cd/m^2 par des tubes fluorescents. Cette expérience met en exergue le fait que les niveaux de luminance de chaussée et l'uniformité de ces derniers sont étroitement liés, contrairement à ce que les règles de dimensionnement stipulent en donnant des valeurs cibles à atteindre indépendantes pour ces deux catégories. Elle met également en évidence le fait que des économies d'énergie sont possibles en s'appuyant sur la constatation précédente. D'après Kimura, il semble en effet possible de diminuer les niveaux de luminance de chaussée tout en conservant le même ressenti de confort et de visibilité, si les uniformités sont augmentées. Dans son expérience, les luminaires LEDs utilisés présentaient une efficacité lumineuse de 65 lm/W et le passage de niveaux de luminance de 3.5 cd/m^2 obtenus avec des tubes fluorescents à des niveaux de luminance de 2.3 cd/m^2 obtenus avec des LEDs permettait tout de même de réaliser des économies d'énergie. En effet, la puissance installée pour les tubes fluorescents était de 2160 W contre 1747 W pour les LEDs. A temps de fonctionnement égaux, l'installation LED permettait donc de réaliser des économies d'énergie de l'ordre de 20% par rapport à l'installation de tubes fluorescents. Il est à noter que l'efficacité lumineuse des luminaires LEDs a fortement augmenté depuis (généralement supérieure à 100 lm/W), tandis que la technologie des tubes fluorescents est restée globalement la même : les économies d'énergie possibles avec cette méthode seraient donc bien plus importantes aujourd'hui.

Ainsi, l'expérience de Kimura remet en cause la pertinence des règles établies pour la section courante, notamment en mettant en évidence un lien direct entre niveaux de luminance de chaussée et niveaux d'uniformité en termes de conditions de visibilité. Ce lien n'est pas pris en compte dans les règles de dimensionnement qui recommandent des valeurs cibles

indépendantes. En résumé, si l'uniformité générale imposée est de 0.4 et que la valeur mesurée est de 0.9, les niveaux de luminance de chaussée à atteindre n'en seront pas diminués pour autant.

L'approche de Kimura permet de mettre en exergue l'existence d'un lien entre luminances de chaussée et uniformités en termes de visibilité. D'autres études ont par la suite cherché à développer de nouveaux indices de visibilité permettant de caractériser ce lien de manière plus précise. Dans la droite lignée des travaux de Kimura, Hirakawa (Hirakawa et al. 2014) fit le lien entre luminance de chaussée moyenne et uniformité générale en utilisant un indice de visibilité adapté d'une notion utilisée en éclairage routier classique : le « *Total Revealing Power* » (*TRP*). Le *TRP* indique la capacité d'une installation d'éclairage à faire apparaître les obstacles. En pratique, cet indice se base sur une approche probabiliste et exprime le nombre d'objets visibles pour une installation d'éclairage donnée comme un pourcentage des objets qui pourraient être présents sur la chaussée. Hirakawa développa donc un indice de visibilité pouvant être utilisé en tunnel et appelé TRP_{ave} , consistant à prendre la valeur moyenne de *TRP* sur une zone de mesure donnée. Cet indice permet de faire le lien entre uniformité générale et luminance de chaussée en termes de visibilité. Ainsi, un TRP_{ave} constant indique des conditions de visibilité identiques. Grâce à cet indice, Hirakawa montra que plus les valeurs d'uniformité générale étaient importantes, plus les valeurs de luminance de chaussée pouvaient être faibles, tout en conservant de bonnes conditions de visibilité.

Tout comme pour l'expérience de Kimura, celle d'Hirakawa met en évidence un lien entre uniformité et luminance de chaussée en termes de visibilité. Cette dernière va néanmoins plus loin en introduisant un indice de visibilité permettant de quantifier ce lien. Cet indice semble très intéressant dans le cadre du déploiement massif des luminaires LEDs en tunnel, puisqu'il permet de tenir compte des avantages offerts par leur compacité en termes d'économies de puissance installée.

La LED, une source ponctuelle potentiellement très directive

Comme mentionné précédemment, les luminaires LEDs sont constitués d'un assemblage de puces, leur apparence lumineuse est donc très différente de celle des sources classiques qui présentent une luminosité globalement uniforme sur toute la surface du luminaire. A contrario, les luminaires LEDs apparaissent donc comme une alternance de points très lumineux (les puces LEDs) et de zones plus sombres. Ces sources peuvent également être très directives et concentrer la lumière dans un espace relativement réduit. Ces deux aspects impactent particulièrement l'éblouissement causé par les sources LEDs (Funke 2017). Par retours d'expériences, il est apparu que les usagers considéraient les LEDs comme plus éblouissantes que les sources classiques. Les études menées sur le sujet sont très souvent psycho-visuelles : le ressenti du participant est pris en compte mais rarement ses

performances visuelles. Ainsi, l'éblouissement d'inconfort (voir **annexe C : Critères complémentaires pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage**) est plutôt considéré dans ces expériences et l'éblouissement d'incapacité l'est un peu moins. Il existe peu (voire pas) d'études spécifiques au tunnel, en revanche des comparaisons entre sources SHP et sources LEDs ont été faites en éclairage routier classique. Il apparaît effectivement que les observateurs considèrent ces dernières comme plus éblouissantes à luminance de chaussée constante (Djokic, Cabarkapa, et Djuretic 2018). Cette constatation mérite une étude approfondie appliquée aux tunnels et une prise en compte de l'éblouissement d'incapacité dans ce cadre. Le CETU a également mis le doigt sur cette notion d'éblouissement plus important des sources LEDs, par retour d'expérience informel. C'est pour cette raison que les valeurs de TI (éblouissement d'incapacité, voir **annexe C : Critères complémentaires pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage**) recommandées pour les LEDs ont été diminuées par rapport à celles recommandées pour les sources classiques (8% au lieu de 10% pour les sources classiques).

La directivité des sources LEDs peut également poser problème pour l'éblouissement, mais elle offre en contrepartie des possibilités intéressantes en termes de photométrie de luminaires. Comme mentionné en introduction, les systèmes contre-flux permettent d'accentuer le contraste négatif d'une cible et d'améliorer ainsi sa visibilité. Ces systèmes étaient jusqu'alors quasiment exclusivement utilisés avec des sources SHP et nécessitaient la mise en place d'une optique spéciale sur le luminaire. En conséquence, les luminaires spécifiques pour le contre-flux étaient bien plus chers à développer et n'étaient donc utilisés qu'en zone de renforcement (zones d'entrée et de transition) afin de rentabiliser leur coût en réalisant des économies d'énergie importantes. Toutefois, la mise en place de systèmes contre-flux avec des LEDs est bien plus simple et ne nécessite pas d'optique particulière et coûteuse. Leur utilisation réservée exclusivement à la zone de renforcement peut donc être remise en question et la mise en place de luminaires contre-flux LEDs en section courante est maintenant envisageable. Cette décision doit être étudiée en prenant en compte l'augmentation des risques d'éblouissement et les économies d'énergie potentiellement réalisables.

1.4.1.2 Contrôle du flux lumineux et choix des spectres

Contrôle dynamique du flux de la source

Le flux lumineux des sources LEDs peut être piloté de manière très précise, contrairement à celui des sources SHP qui équipaient jusqu'alors la quasi-totalité des zones d'entrées et de transition des tunnels routiers. Cette caractéristique des sources LEDs offre la possibilité de caler les niveaux de luminance de chaussée sur les besoins en temps réel. Toutes les formules de besoin présentées en section **1.3 Méthodes de dimensionnement actuelles** font intervenir la vitesse d'approche du conducteur (qui déterminera sa distance d'arrêt) et les conditions de luminosité rencontrées par ce dernier à l'approche du tunnel. Ainsi, en fonction de la présence

de congestions qui modifient la vitesse de trafic et de conditions météorologiques particulières qui impactent les niveaux de luminosité à l'approche du tunnel, les besoins en termes de niveaux de luminance de chaussée peuvent changer énormément (pour exemple, dans le cas extrême où les conducteurs sont quasiment à l'arrêt à cause d'un embouteillage, les besoins en renfort seront quasiment nuls). Le flux des sources SHP ne pouvant être que peu gradé, les éclairages de renforcement en zones d'entrée et de transition doivent être surdimensionnés lorsqu'ils sont équipés de ce type de luminaires afin d'assurer des conditions de sécurité adéquates dans le cas le plus défavorable (vitesse maximum et luminosité en zone d'accès très importante). A contrario, l'utilisation des LEDs permet d'adapter le flux des luminaires de manière très précise aux conditions de vitesse et de luminosité et ainsi d'éviter un surdimensionnement de l'éclairage de renforcement. Les économies d'énergie pouvant être obtenues en utilisant un éclairage LED adaptatif ont été mises en évidence par de nombreux travaux. Certaines de ces études ont été menées par calcul ou par simulation informatique (Shuguang 2015; Salata et al. 2016; J. Zhao, Feng, et Yang 2021; Peeling et al. 2016) et d'autres directement sur le terrain (Zeng et al. 2011). Salata, à l'aide d'un travail de modélisation, mit notamment en évidence le fait que les principales baisses de coûts en termes de dépenses énergétiques venaient plus du pilotage qui était fait des sources LEDs que de la simple installation des luminaires.

Spectre des sources LEDs

Du fait de leur nature, les LEDs peuvent avoir de très nombreux spectres différents, contrairement aux sources traditionnelles qui ne présentent que très peu de variations possibles dans leur contenu spectral. Cette pluralité de possibilités a donc poussé la communauté scientifique à s'interroger sur un impact potentiel du spectre sur la visibilité ou l'éblouissement. De nombreuses études ont ainsi cherché à prouver l'existence de cet impact et à le caractériser le cas échéant. La plupart de ces études ont été réalisées en éclairage routier classique et un nombre bien moindre en éclairage de tunnel.

Les premières études d'impact du spectre sur la visibilité se sont intéressées au champ de vision périphérique, et plus particulièrement aux performances de détection des observateurs en périphérie de leur champ visuel pour des niveaux de luminance faibles. Bullough (Bullough et Rea 2000) et Lin (Lin et al. 2004) montrèrent notamment, en utilisant des filtres colorés, que lorsque la quantité d'énergie spectrale mesurée pour les courtes longueurs d'onde augmentait, les performances visuelles des observateurs s'amélioraient dans leur champ de vision périphérique (meilleure détection de cibles ou champ visuel plus étendu). Cette affirmation fût prouvée pour des niveaux de luminance relativement faibles (<10 cd/m²). Bullough montra également que cette amélioration des performances visuelles était d'autant plus importante que les niveaux de luminance mesurés dans le champ de vision de l'observateur étaient faibles. Ces études ont fait partie d'une longue suite de recherches sur l'impact de la vision mésopique en éclairage routier, ce phénomène sera plus amplement

détaillé en section **1.4.2.1 Vision mésopique**. Ces constatations s'appliquent à l'éclairage des tunnels de nuit, voire à l'éclairage de certaines sections courantes de jour, dont les niveaux de luminance de chaussée sont relativement faibles. Ces résultats militent pour l'installation de sources LEDs présentant des valeurs de températures de couleur les plus élevées possibles (associées à une quantité d'énergie spectrale plus importante dans les courtes longueurs d'onde) dans les zones mentionnées précédemment afin d'améliorer les performances visuelles des usagers et, par extension, la sécurité du tunnel. Lewis montra également au travers de 3 expériences que les performances visuelles des observateurs s'amélioraient lorsque le spectre qu'il percevait était enrichi dans les courtes longueurs d'onde (Lewis 1999). Cette constatation était vraie pour des niveaux de luminance très faibles ($<1 \text{ cd/m}^2$). Les tâches demandées ne nécessitaient pas une résolution uniquement fovéale, mais elles impliquaient à la fois le champ de vision central de l'observateur et son champ de vision périphérique proche.

Ainsi, il apparaît que pour des niveaux de luminance faibles (tunnels éclairés de nuit ou sections courantes de tunnels éclairés de jour), l'utilisation de sources LEDs présentant une forte densité énergétique dans les courtes longueurs d'onde (et, généralement, par extension une température de couleur élevée) peut permettre d'obtenir de meilleures performances visuelles que pour les sources SHP notamment. Il est à noter que les expériences menées sur le sujet s'intéressaient principalement au champ de vision périphérique des observateurs. Cette amélioration des performances visuelles des usagers va de pair avec une amélioration des conditions de sécurité pour les conducteurs. Cette dernière est évidente pour une application en éclairage routier classique, puisque les détections d'obstacles potentiels en champ de vision périphérique seront essentielles pour éviter les accidents (animaux traversant la chaussée par exemple). Elle l'est un peu moins pour une application en éclairage de tunnel, puisque les conducteurs sont bien moins susceptibles de rencontrer des obstacles provenant de leur champ de vision périphérique dans cet environnement clos.

He mena une étude plus complète concernant l'impact direct du spectre sur la visibilité en tunnel (S. Y. He et al. 2017) en étendant notamment la gamme de niveaux de luminance habituellement prise en compte. Ainsi, He développa un protocole expérimental reproduisant les baisses de luminance progressives rencontrées par un observateur lors de la traversée d'un tunnel de jour. Il modélisa donc une zone d'accès, une zone d'entrée, de transition et une section courante. L'étude ne portait que sur la zone de transition et la section courante, les zones d'accès et d'entrée étaient uniquement là pour assurer une modélisation fidèle des phénomènes visuels rencontrés par un conducteur lors de la traversée d'un tunnel de jour. L'expérience consistait en une détection de cibles apparaissant en périphérie du champ de vision de l'observateur. Ces cibles étaient modélisées sur un fond dont la distribution spectrale pouvait être changée. Les résultats obtenus pour la section courante étaient en accord avec ceux collectés lors des expériences présentées ci-dessus : les performances de détection étaient meilleures lorsque le spectre du fond présentait une forte densité énergétique dans les courtes longueurs d'onde. De plus, la même constatation a été faite pour la zone de

transition et donc pour des niveaux de luminance bien plus élevés (environ 25 cd/m²). Les résultats obtenus en zone de transition et en section courante sont donc similaires. En revanche, selon l'auteur, les phénomènes physiologiques qui les expliquent ne sont pas les mêmes. Ces derniers seront plus amplement détaillés en section **1.4.2.1 Vision mésopique**. Un autre point intéressant mis en lumière par He est que les performances visuelles des observateurs étaient meilleures en section courante qu'en zone de transition. Cette constatation va à l'encontre d'un principe communément admis en éclairage routier selon laquelle les performances visuelles augmentent avec les niveaux de luminance. Ce résultat montre donc que le phénomène d'adaptation à des niveaux de luminance plus faibles a un fort impact sur les performances visuelles d'un individu : l'augmentation des niveaux de luminance par un facteur 5 ne suffit pas à pallier cet effet négatif. Il convient donc d'optimiser la méthode de réduction des niveaux lumineux en zone de transition afin d'améliorer la sécurité des usagers.

Ainsi, il apparaît que les bénéfices en termes de visibilité obtenus pour des sources LEDs présentant une forte densité énergétique dans les courtes longueurs d'onde, ne sont pas seulement applicables aux sections courantes, mais également aux zones de transition (pour le champ de vision périphérique tout du moins). Dans ces zones, le remplacement des sources SHP par des sources LEDs permettrait d'améliorer les conditions de visibilité des usagers tout en conservant des niveaux de luminance de chaussée similaires à ceux de la situation initiale. Les critères actuellement utilisés en éclairage de tunnel (notamment les niveaux de luminance de chaussée) ne permettent donc pas de rendre compte précisément du ressenti visuel des usagers.

Les impacts directs du spectre en termes de visibilité ont été présentés ci-dessus. Des chercheurs se sont également intéressés à un impact indirect du spectre sur les performances visuelles des usagers : l'indice de rendu des couleurs. Djokic utilisa ainsi simplement des cibles colorées lors d'une expérience dynamique de visibilité en éclairage routier et compara les performances de détection des conducteurs sous un éclairage LED (IRC généralement supérieur à 70) et sous un éclairage SHP (IRC aux alentours de 25) (Djokic, Cabarkapa, et Djuretic 2018). Les résultats montrèrent logiquement que les sources LEDs permettaient d'offrir de meilleures performances de détection dans ce cas précis de cibles colorées. Il est à noter que la perception de la couleur d'un obstacle permet de l'identifier plus facilement et offre donc au conducteur la possibilité d'adapter sa réaction en fonction de la nature de celui-ci. A contrario, si le conducteur ne peut distinguer qu'une masse sombre au milieu de la chaussée, il pourrait s'inquiéter sans que cela ne soit nécessaire et avoir un comportement pouvant le mettre en danger lui et les autres usagers.

Zhang s'intéressa également à l'impact de l'indice de rendu des couleurs sur la visibilité des usagers, mais en utilisant une cible achromatique cette fois (cas plus fréquent en tunnel que des cibles colorées). Les résultats obtenus montrèrent que les performances visuelles des observateurs s'amélioraient avec l'augmentation de l'indice de rendu des couleurs de la

source (Zhang et al. 2017). Les conditions expérimentales de Zhang mettaient en œuvre des niveaux de luminance faibles ($<5 \text{ cd/m}^2$).

L'amélioration de l'indice de rendu des couleurs des sources permet d'améliorer les performances visuelles des conducteurs :

- Pour tous les niveaux de luminance dans le cas des cibles colorées ;
- Pour les niveaux de luminance propres aux sections courantes ou à l'éclairage des tunnels de nuit dans le cas des cibles achromatiques.

En ce qui concerne l'éblouissement d'incapacité (voir **annexe C : Critères complémentaires pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage**), aucun impact du spectre des sources n'a été mis en évidence par les études menées sur le sujet (CIE 146/147 2002; Wooten et Geri 1987; IJspeert et al. 1990).

Pour ce qui est de l'éblouissement d'inconfort en revanche, des études menées en éclairage routier classique ont mis en évidence un impact du spectre sur la sensation de gêne expérimentée par les observateurs. Les résultats obtenus par les chercheurs ont montré que les sources présentant une forte densité énergétique spectrale dans les courtes longueurs d'onde suscitaient un éblouissement d'inconfort plus important (Bullough 2009; Sivak et al. 2005). Ces résultats montrent donc qu'on a des effets antagonistes des courtes longueurs d'onde sur la visibilité et l'éblouissement d'inconfort. Il convient donc de trouver un compromis entre performances visuelles et confort des conducteurs. Actuellement, la plupart des nouvelles installations LEDs qui se font en tunnel routier en France utilise des sources à 4000 K afin de limiter l'éblouissement d'inconfort occasionné. Ce choix s'est fait de manière relativement arbitraire, conforté toutefois par des retours d'expérience.

Ainsi, il apparaît que le spectre des sources influe sur les performances visuelles et sur le confort des conducteurs. Le développement des règles utilisées aujourd'hui s'appuyant sur des expériences ne faisant pas cas de ce paramètre spectral, cela implique donc que les critères de dimensionnement utilisés actuellement ne permettent pas de retranscrire fidèlement le ressenti des observateurs.

Il est à noter que les évolutions technologiques liées aux LEDs ont impulsé des changements chez les organismes de recommandations, et notamment chez la CIE, puisque le Technical Committee 4-53 « Tunnel Lighting Evolution » travaille actuellement sur une nouvelle publication du document 88 :2004 « Guide for the lighting of road tunnels and underpasses ». De la même façon le document du CEN et le dossier pilote du CETU sont également en cours de révision.

1.4.2 Evolutions liées aux connaissances

Les caractéristiques des LEDs et les améliorations technologiques dans le domaine de l'éclairage interrogent sur la pertinence des critères actuellement utilisés pour le dimensionnement des installations. A ces améliorations technologiques viennent également s'ajouter des découvertes sur le système visuel humain qui remettent en cause certains principes de dimensionnement jusqu'alors utilisés. Parmi ces découvertes relativement récentes, on compte notamment la vision mésopique et le rôle des CGRips dans le processus de vision direct.

1.4.2.1 Vision mésopique

Comme mentionné en introduction, le système visuel humain fait intervenir plusieurs photorécepteurs et ces derniers induisent différents types de vision en fonction de la quantité de lumière perçue par l'œil. La vision mésopique correspond à un état transitoire entre les visions photopique et scotopique pour lequel les cônes et les bâtonnets sont sollicités simultanément. Les niveaux de luminance pour lesquels ce type de vision entre en jeu sont indiqués dans l'introduction (des valeurs comprises entre 0.003 et 0.01 cd/m^2 pour la limite basse, et entre 3.2 et 10 cd/m^2 pour la limite haute, selon les études). Le rapport CIE 191 2010 « Recommended system for mesopic photometry based on visual performance » fixe la limite basse du domaine mésopique à 0.005 cd/m^2 et la limite haute à 5 cd/m^2 (CIE 191 2010).

Les fonctions d'efficacité lumineuse spectrale photopique et scotopique (respectivement notée $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$) découlent directement de la sensibilité des photorécepteurs sollicités dans le processus de vision, à savoir les cônes S, M et L pour la vision photopique et les bâtonnets pour la vision scotopique. Les courbes correspondant à ces fonctions sont rappelées en Figure 1-14.

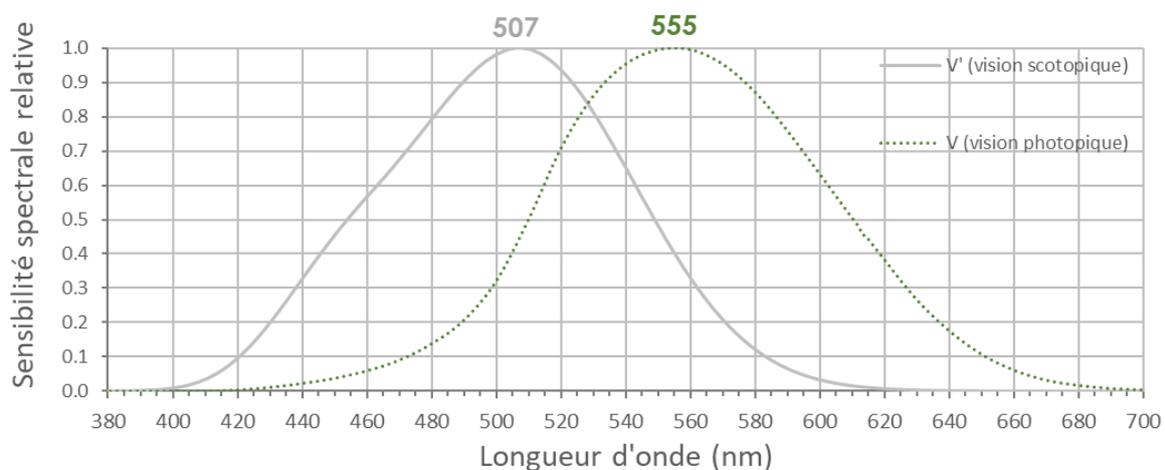


Figure 1-14 Fonctions d'efficacité lumineuse spectrale photopique et scotopique. Les nombres indiqués donnent la longueur d'onde (en nm) correspondant à la sensibilité maximum de la courbe.

Le domaine mésopique a fait l'objet de plusieurs modèles cherchant à exprimer la sensibilité spectrale de l'œil, ou encore à préciser la notion de luminance mésopique, en fonction des domaines photopique et scotopique. Le modèle X fut développé par Rea en 2004 (Rea et al. 2004), il fut suivi du modèle MOVE, créé à partir des expériences menées dans le cadre du projet éponyme en 2005 (Eloholma et Halonen 2005). Ce dernier réunissait 6 universités et laboratoires de recherche, et s'appuya sur une approche multicritère (prenant en compte le seuil de différence de luminance, le temps de réaction, ou encore la capacité de reconnaissance et d'identification de la nature de la cible) pour générer des données sur les fonctions de visibilité mésopiques. Cette approche a donc nécessité la mise en place de très nombreuses expériences afin de tester de plusieurs façons possibles les différents critères d'étude. L'association de plusieurs organismes de recherches et les multiples expériences menées sur différents critères de visibilité permirent de fournir des bases solides pour développer un modèle communément admis de sensibilité spectrale dans le domaine mésopique. Ce modèle MOVE fut ensuite modifié en 2008 par Viikari (Viikari et al. 2008). Puis, en 2010, la CIE publia un système mésopique à son tour (CIE 191 2010). Il est à noter que la forme mathématique générale prise par ces systèmes n'a pas réellement évolué au fil des années, les modifications apportées résidant plutôt dans les limites haute et basse de luminances fixées par les modèles et dans les valeurs des paramètres utilisés pour les calculs.

Le modèle proposé pour la fonction d'efficacité lumineuse spectrale mésopique (notée $V_{mes}(\lambda)$) est une combinaison linéaire des fonctions photopique et scotopique (Eloholma et Halonen 2005; CIE 191 2010).

$$M(m)V_{mes}(\lambda) = m V(\lambda) + (1 - m) V'(\lambda) \text{ pour } 0 \leq m \leq 1 \quad [1-29]$$

Avec λ la longueur d'onde (nm) ;

$V_{mes}(\lambda)$ la fonction d'efficacité lumineuse spectrale mésopique sous les conditions données ;

m (compris entre 0 et 1) un coefficient dont la valeur dépend des conditions d'adaptation visuelle (CIE 191 2010) ;

$M(m)$ une fonction de normalisation telle que $V_{mes}(\lambda)$ atteint une valeur maximale de 1.

La luminance mésopique peut ensuite être calculée en se servant de la fonction $V_{mes}(\lambda)$ et en appliquant la formule suivante (CIE 191 2010), inspirée de la formule utilisée pour calculer une luminance photopique.

$$L_{mes} = \frac{K_m}{V_{mes}(\lambda_0)} \int V_{mes}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad [1-30]$$

Avec L_{mes} la luminance mésopique (cd.m^{-2}) ;

K_m l'efficacité lumineuse spectrale maximale (égale à 683 lm.W^{-1} ici) ;

λ_0 égal à 555 nm ;

$L_e(\lambda)$ la radiance spectrale ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$).

$V_{mes}(\lambda_0)$ peut prendre toutes les valeurs comprises entre 1 (valeur obtenue lorsque la fonction d'efficacité lumineuse spectrale mésopique est égale à celle du domaine photopique) et 0.4 (valeur obtenue lorsque la fonction d'efficacité lumineuse spectrale mésopique est égale à celle du domaine scotopique), ainsi le coefficient multiplicateur $\frac{K_m}{V_{mes}(\lambda_0)}$ devant l'intégrale peut prendre toutes les valeurs comprises entre 683 et 1699 lm.W^{-1} (valeurs des efficacités lumineuses spectrales maximales photopique et scotopique).

En pratique, la CIE (CIE 191 2010) propose une méthode itérative pour calculer une valeur de luminance mésopique (équation [1-31]). La première étape fixe $m = 0.5$ (le système visuel est à mi-chemin entre le domaine photopique et le domaine scotopique), puis le calcul de la luminance mésopique est mené selon l'équation [1-31] (ligne 1) en utilisant cette première valeur de m . A partir de cette valeur de luminance mésopique, une nouvelle valeur de m est calculée, ce qui correspond à une nouvelle itération dans la méthode.

$$\begin{cases} L_{mes,n} = \frac{m_{n-1} L_p + (1-m_{n-1}) L_s V'(\lambda_0)}{m_{n-1} + (1-m_{n-1}) V'(\lambda_0)} \\ m_n = 0.767 + 0.3334 \log(L_{mes,n}) \text{ avec } 0 \leq m_n \leq 1 \end{cases} \quad [1-31]$$

Avec $L_{mes,n}$ la luminance mésopique calculée au rang n de l'itération (cd.m^{-2}) ;

m_n le coefficient d'adaptation calculé au rang n de l'itération ;

L_p la luminance photopique (cd.m^{-2}) ;

L_s la luminance scotopique (cd.m^{-2}).

Généralement, la caractérisation des performances d'une source de lumière dans les domaines mésopique et scotopique se fait en utilisant le ratio S/P qui a été brièvement présenté en introduction. L'équation [1-32] donne son expression générale.

$$S/P = \frac{\phi_s}{\phi_p} \quad [1-32]$$

Avec ϕ_s le flux scotopique de la source (lm) ;

ϕ_p le flux photopique de la source (lm).

Ainsi, plus le ratio S/P d'une source sera élevée, plus ses performances s'amélioreront dans les domaines mésopique et scotopique. A contrario, si le ratio S/P est faible, les performances de la source diminueront dans ces domaines.

Au vu de l'équation [1-30], on voit donc que la luminance mésopique augmente lorsque la courbe de distribution énergétique spectrale de la source présente des valeurs élevées sur le domaine de longueur d'onde pour lequel la fonction d'efficacité spectrale mésopique est non nulle. Comme mentionné en introduction, le spectre typique des LEDs prend la forme d'un pic d'énergie dans les courtes longueurs d'onde (généralement aux alentours de 450 nm, voir

Figure 2-6), absorbé partiellement par une couche de phosphore et réémis sur une plus vaste portion du spectre visible. Si l'on compare ce spectre avec celui d'une source SHP, ou d'un tube fluorescent (voir Figure 1-15), on s'aperçoit qu'il présente une bien plus grande quantité d'énergie dans le domaine de longueur d'onde pour lequel la fonction d'efficacité spectrale scotopique est non nulle. La déduction logique de cette constatation est que les LEDs ont potentiellement une efficacité lumineuse dans le domaine scotopique bien plus élevée que celle des sources SHP et des tubes fluorescents. Elles ont, par conséquent, une efficacité lumineuse potentiellement plus élevée dans le domaine mésopique également : cette affirmation étant d'autant plus vraie que la courbe de sensibilité du domaine mésopique considéré se rapproche de celle du domaine scotopique. Si le dimensionnement d'une installation d'éclairage pour un tunnel long se fait en réalisant des mesures de luminance photopique, la perception lumineuse des usagers dans l'ouvrage achevé ne sera pas fidèle à ce qui pouvait être attendu lors de la phase de conception. Ainsi, les installations LEDs seront globalement surdimensionnées, tandis que les installations SHP (et tubes fluorescents dans une moindre mesure) seront plutôt sous-dimensionnées.

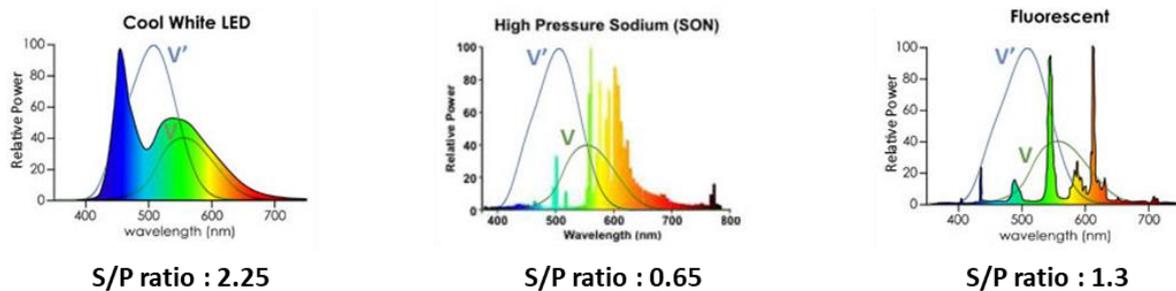


Figure 1-15 Spectres et ratios S/P typiques d'une source LED "blanc froid", d'une source SHP et d'un tube fluorescent

Pour rappel, la vision mésopique est un état intermédiaire entre visions photopique et scotopique : elle fait donc intervenir conjointement les cônes et les bâtonnets dans le processus de vision. La densité de bâtonnets augmentant avec l'excentricité rétinienne (jusqu'à un certain point, voir Figure 0-2), on peut en déduire que les gains de visibilité liés à la prise en compte du domaine mésopique se feront principalement ressentir en périphérie du champ de vision : on retrouve ici les résultats obtenus par Bullough et Lin (voir section **1.4.1.2 Contrôle du flux lumineux et choix des spectres**) lors de leurs expérimentations sur le sujet.

En ce qui concerne l'applicabilité de ce modèle de luminance mésopique au domaine des tunnels routiers, il convient de distinguer deux situations :

- En éclairage diurne de tunnel, la notion de vision mésopique reste moins pertinente qu'en éclairage routier classique, les niveaux de luminance étant plus élevés et l'adaptation du système visuel étant incomplète. Pour certaines sections courantes

longues présentant des niveaux de luminance relativement faibles, il semble néanmoins nécessaire de s'intéresser à ce phénomène.

- En éclairage nocturne de tunnel, le phénomène de vision mésopique est plus susceptible d'être observé, mais il reste néanmoins moins intéressant qu'en éclairage routier classique. En effet, le principal intérêt d'augmenter la quantité d'énergie spectrale dans les courtes longueurs d'onde pour les sources, est d'améliorer les performances visuelles des usagers dans leur champ de vision périphérique : l'objectif en éclairage routier classique est donc de permettre d'améliorer la détection des éventuels dangers sur le côté de la route (piéton ou animal traversant la chaussée). Cet objectif est moins pertinent en tunnel puisqu'on a affaire à un environnement contrôlé dans lequel très peu d'obstacles peuvent surgir du champ de vision périphérique des usagers du fait de la présence des piédroits.

Il serait toutefois intéressant de caractériser, s'ils existent, les impacts du domaine mésopique sur la vision centrale afin de déterminer si la prise en compte de la vision mésopique est pertinente en tunnel ou non.

1.4.2.2 Cellules à mélanopsine

On a pu voir précédemment que le processus de vision chez l'être humain était régi principalement par 4 types de photorécepteurs : les 3 types de cônes et les bâtonnets. Plus récemment, la présence d'un potentiel cinquième type de photorécepteur dans l'œil humain a été considérée : les Cellules Ganglionnaires Rétiniennes intrinsèquement photosensibles (CGRips), qui ont été découvertes il y a seulement 20 ans (Berson, Dunn, et Takao 2002). Ces cellules étaient jusqu'alors connues pour leurs effets non visuels (régulation des cycles circadiens notamment) mais leur impact direct sur le processus de vision semble devenir de plus en plus évident (influence sur le réflexe pupillaire et sur la perception de luminosité) (Mure 2021).

Ces cellules particulières contiennent un photopigment appelé mélanopsine, c'est l'excitation de cette protéine qui induit les effets, visuels ou non, cités précédemment. La mélanopsine présente une courbe de sensibilité spectrale propre, tout comme les cônes ou les bâtonnets (Figure 1-16).

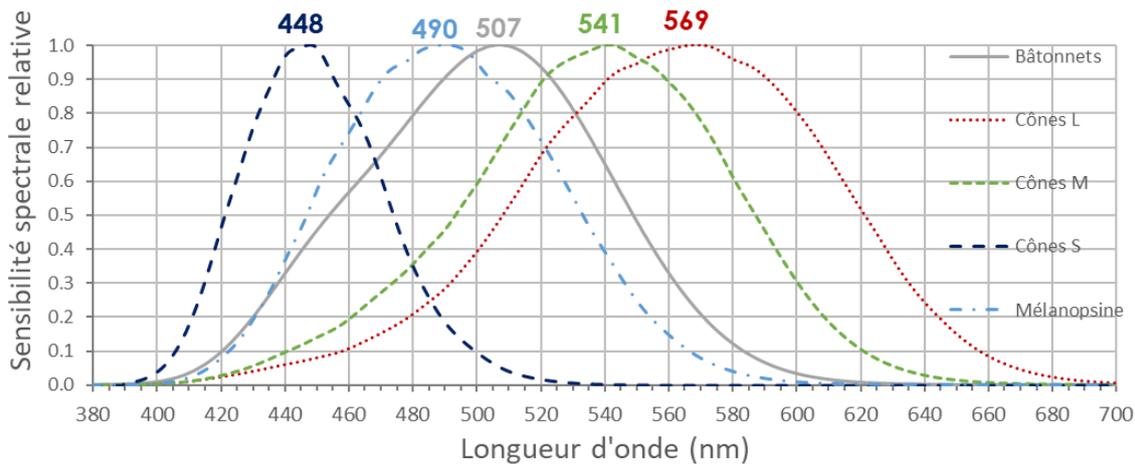


Figure 1-16 Sensibilités spectrales relatives des photorécepteurs humains visuels et non visuels (CIE S 026 2018). Les nombres indiqués donnent la longueur d'onde (en nm) correspondant à la sensibilité maximum de la courbe.

Les CGRips peuvent être classées en différents sous types avec des caractéristiques morphologiques et physiologiques propres (Ecker et al. 2010). Pour l'être humain, aucune classification associant les différents sous types de cellules à des fonctions particulières n'a encore été acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique (Hannibal et al. 2017).

Ces cellules sont situées dans la couche des cellules ganglionnaires, c'est-à-dire dans la rétine, juste sous la membrane limitante interne et la couche des fibres optiques (Figure 1-17). Elles interagissent avec de nombreux éléments du système visuel humain, que ce soit dans la rétine ou dans le cerveau. La communauté scientifique s'interroge encore sur la nature de ces interactions en se posant notamment la question de savoir lesquelles participent à la perception de luminosité.

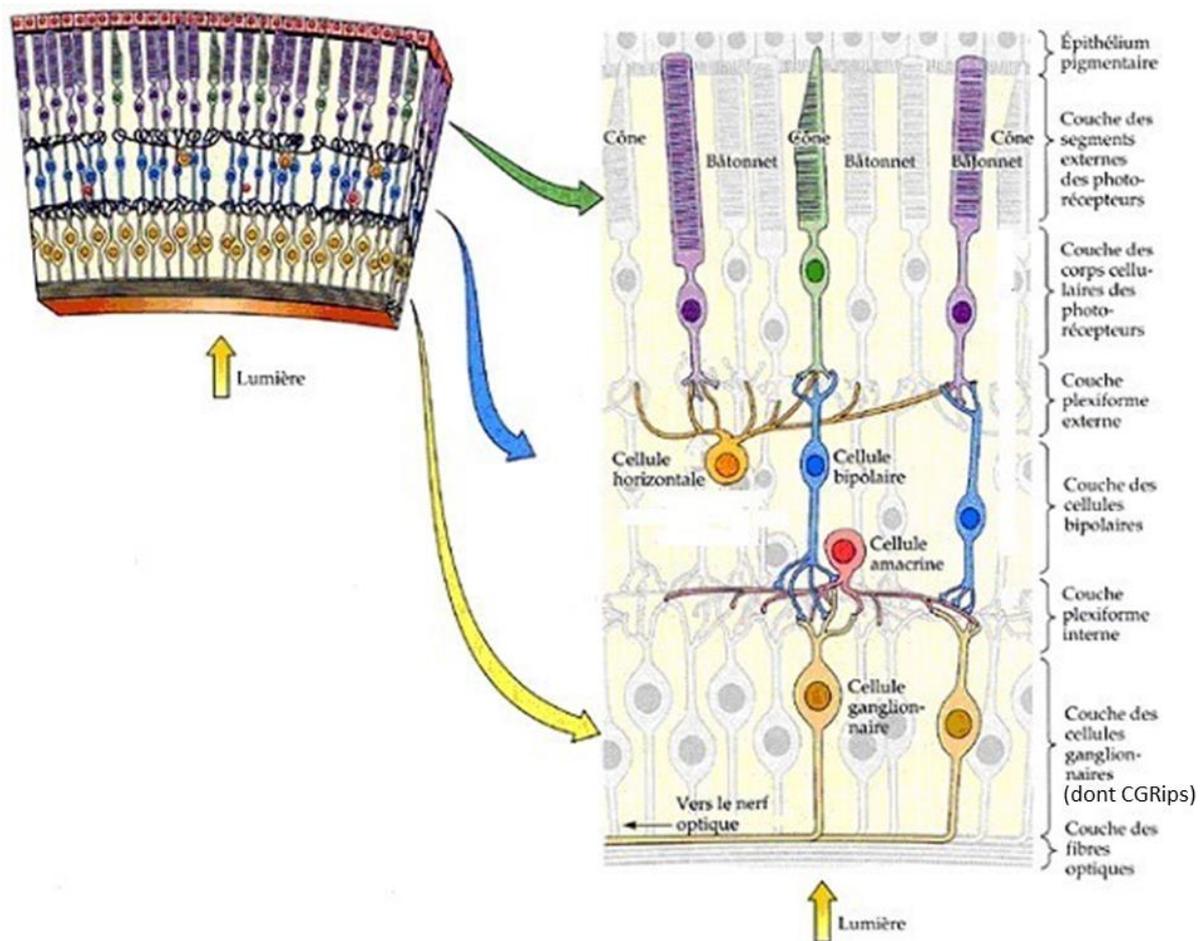


Figure 1-17 Position des cellules ganglionnaires dans les différentes couches de la rétine (source : <http://perceptioncouleurs.free.fr/lanatomie.htm>)

Les premières expériences menées sur l'impact des CGRips sur le processus de vision ont montré que l'état stable de la constriction pupillaire en réponse à un stimulus lumineux était principalement dû à l'excitation des CGRips (Gamlin et al. 2007). Certains tests ont été menés avec des personnes aveugles et ont montré que ces dernières étaient capables de détecter un stimulus monochromatique à 481 nm : cela a été un des premiers éléments semblant indiquer que les CGRips jouaient un rôle direct dans le processus de vision (Zaidi et al. 2007). Plus tard, des résultats complémentaires sont venus étoffer ceux obtenus par Gamlin en 2007 concernant le rôle des CGRips dans le réflexe pupillaire humain : il apparaît que la contribution de la mélanopsine ne se fait ressentir que pour des stimuli durant plus de 15 secondes (McDougal et Gamlin 2010), ce photopigment contribue donc à moduler graduellement et durablement la taille de la pupille, tandis que les cônes participent à des réponses beaucoup plus rapides (Brown et al. 2012). Plus récemment, les expériences menées sur le sujet se sont plutôt orientées vers l'impact de ces cellules sur la perception de luminosité. Deux méthodes principales ont été utilisées dans ce but : la méthode de « silent substitution » (Estévez et Spekreijse 1982) et celle des « spectres métamères » (Brown et al. 2012). La première méthode vise à supprimer les réponses de tous les autres photorécepteurs afin de ne

considérer que celles liées à la mélanopsine. La deuxième méthode consiste à comparer deux stimuli lumineux présentant des températures de couleur et des indices de rendu des couleurs identiques (soit l'indice de rendu des couleurs R_a (CIE 13-3 1995), soit l'indice de fidélité des couleurs R_f (CIE 224 2017)), mais des contenus mélanopiques différents. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes ont montré que l'augmentation de l'exposition à la mélanopsine entraînait une perception de luminosité accrue (Brown et al. 2012; Zele, Adhikari, et al. 2018). Ils ont également montré que les CGRips impactaient principalement le champ de vision périphérique (Esquiva et al. 2017; Zele, Feigl, et al. 2018) ; et finalement, que la perception de luminosité était le résultat d'interactions entre les signaux émis par les cônes, et ceux émis par les CGRips (Zele, Adhikari, et al. 2018). Il est à noter que les études qui ont montré des différences significatives dans la perception de la luminosité liées à l'exposition mélanopique, se sont concentrées sur le domaine photopique avec des luminances d'adaptation supérieures à 180 cd/m^2 (Brown et al. 2012; Zele, Adhikari, et al. 2018). Mure a indiqué que les CGRips ne semblaient pas réagir à des niveaux lumineux en dessous du domaine photopique, même après une adaptation au noir de l'observateur (Mure 2021). Enfin, Barrionuevo a étudié la contribution des cônes, des bâtonnets et des CGRips sur le réflexe pupillaire sous des conditions mésopiques et photopiques, et a trouvé que la contribution de la mélanopsine était inexistante pour des luminances d'adaptation inférieures à 1 cd/m^2 (Barrionuevo et al. 2014). L'étude de l'impact potentiel de la mélanopsine sur la vision en tunnel reste donc intéressante, puisque les niveaux de luminance en zone d'entrée peuvent dépasser les 180 cd/m^2 , et que les niveaux en section courante sont rarement inférieurs à la limite basse d'activation de la réponse mélanopique de 1 cd/m^2 .

Pour conclure, les fonctions d'efficacité lumineuse photopique et scotopique ont des supports physiologiques connus et définis, tandis que le cheminement neurobiologique propre à la vision induite par la mélanopsine est bien moins clair et nécessite des études supplémentaires. Certains chercheurs pensent même que ce photopigment jouerait un rôle dans la vision mésopique (Zele et al. 2020).

1.5 Conclusion du chapitre

On a vu que la plupart des règles de dimensionnement utilisées aujourd'hui se basent sur des expériences relativement anciennes et ne tiennent donc pas nécessairement compte des découvertes récentes sur le système visuel humain, ou des évolutions technologiques des sources de lumière. Plusieurs études plus récentes mettent en lumière des éléments qui ne sont pas pris en compte dans ces méthodes de dimensionnement. Toutes ces constatations nous amènent donc à remarquer que les caractéristiques des sources LEDs ne sont pas pleinement exploitées avec les règles de dimensionnement actuelles. Il convient ainsi de déterminer dans quelle mesure les scénarios d'éclairage actuels peuvent être adaptés afin de tenir compte des évolutions des connaissances et des technologies liées à l'éclairage.

Tout d'abord, on a notamment pu voir que l'efficacité lumineuse des luminaires LEDs permettait déjà de réaliser des économies d'énergie, simplement en les utilisant plutôt que des sources traditionnelles.

Ensuite, un des éléments non pris en compte par les règles de dimensionnement et qui semble avoir un impact non négligeable sur les conditions de visibilité des conducteurs, est le spectre des sources de lumière. Cet impact de la distribution spectrale sur les performances visuelles des conducteurs a été étudié dans plusieurs expériences relativement récentes. La plupart de ces expériences ont approché la question sous l'angle de la vision mésopique et ont donc considéré l'impact du spectre sur la visibilité en champ de vision périphérique. Cependant, comme mentionné précédemment, le critère de détection périphérique est moins pertinent en tunnel qu'en éclairage routier classique : nous avons donc décidé d'approcher cette dimension spectrale en prenant en compte le champ de vision central. Nous avons également décidé d'étudier le potentiel impact de la sollicitation des CGRips dans le processus visuel, cet aspect n'ayant encore jamais été étudié en éclairage routier.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à un autre aspect particulièrement intéressant des sources LEDs détaillé dans ce chapitre, à savoir la possibilité de gradation de leur flux lumineux. Notre réflexion a porté sur l'établissement de scénarios d'éclairages dynamiques tenant compte des conditions climatiques et de trafic pour assurer des niveaux de luminance de chaussée adaptés au besoin réel, et non pas dimensionnés pour un cas de figure particulièrement défavorable.

Enfin, d'autres caractéristiques propres aux LEDs, ainsi que leurs potentiels impacts sur les pratiques d'éclairage en tunnel ont été identifiés dans ce chapitre (la compacité, le lien entre uniformités et niveaux de luminance requis, la directivité de la source, ...). Ces aspects nous ont paru moins impactants que les deux principaux cités précédemment (spectre et contrôle du flux) et n'ont pas été traité dans ce travail de thèse.

Chapitre 2 : Contenu spectral et visibilité

2.1 Objectifs et démarche

2.1.1 Contexte

Ce chapitre vise à déterminer si le spectre des sources de lumière utilisées en tunnel peut influencer sur la visibilité des cibles par les conducteurs. De nombreuses études menées par des chercheurs, tant en éclairage routier classique qu'en éclairage spécifique aux tunnels, semblent abonder en ce sens (voir section **1.4.2 Evolutions liées aux connaissances**). Cependant, ces études de l'impact du spectre sur la visibilité s'appuient la plupart du temps sur la théorie de la vision mésopique (voir section **1.4.2.1 Vision mésopique**) et considèrent des cibles situées dans le champ de vision périphérique des conducteurs, c'est-à-dire là où les bâtonnets peuvent être sollicités en complément des cônes pour accroître les chances de détection d'une cible. Seuls ces deux types de photorécepteurs sont considérés dans ces études. De plus, le terme de visibilité utilisé est en fait associé à une notion de détection d'une cible et plus particulièrement à la caractérisation d'un seuil de détection. Ainsi, la notion de reconnaissance de la cible n'est pas nécessairement prise en compte et la visibilité supraliminaires n'est pas considérée : l'approche de la visibilité est binaire.

Les résultats des études menées selon les modalités décrites ci-dessus ont montré que les spectres des sources présentant une plus grande quantité d'énergie dans les courtes longueurs d'onde permettaient une meilleure détection des cibles situées dans le champ de vision périphérique du conducteur. L'explication principale donnée à ce phénomène est la sollicitation des bâtonnets dans le processus de détection du fait des faibles valeurs de luminance observées en tunnel ou en éclairage routier classique. La courbe de sensibilité de l'œil se décale donc vers les courtes longueurs d'onde lorsque les niveaux lumineux diminuent, alors que le dimensionnement ne prend pas en compte cet effet et se base sur la courbe photopique $V(\lambda)$ établie par la CIE en 1924 pour un champ de vision de 2°.

Notre approche se base sur une expérimentation psycho-visuelle et diffère de celle présentée plus haut et classiquement mise en place pour tester l'impact du spectre sur la visibilité. Tout d'abord, la cible prise en compte dans notre expérience est placée dans le champ de vision central de l'observateur. Ensuite, la caractérisation de la visibilité n'est pas binaire mais associée à une échelle mettant en exergue différents seuils de détection et de reconnaissance de la cible : cette méthode permet d'apporter des nuances dans la caractérisation de la visibilité (cible détectée, forme de la cible identifiée, ...). Enfin, le travail considère un 3^{ème} type de photorécepteurs et porte donc également sur le rôle des CGRips dans le processus de vision (voir section **1.4.2.2 Cellules à mélanopsine**).

2.1.2 Expériences sur la visibilité

Comme présenté ci-dessus, la plupart des études menées sur l'impact du spectre de la lumière sur la visibilité des conducteurs en éclairage routier se sont faites au travers du prisme de l'influence de la vision mésopique. Ces études considéraient donc généralement des cibles placées en vision périphérique des conducteurs, apparaissant brièvement dans leur champ de vision pendant qu'ils fixaient une scène ou participaient à une simulation de conduite (Bullough et Rea 2000; Akashi, Rea, et Bullough 2007; Eloholma et Halonen 2005).

L'impact de ce spectre en champ de vision central a été moins souvent investigué dans la littérature. On retrouve néanmoins quelques études s'y intéressant.

Górczewska mena une étude portant sur la reconnaissance de cible en champ de vision central (Górczewska, Mroczkowska, et Skrzypczak 2013). Pour cette expérience, elle compara l'impact de sources LEDs (6500 K) et de sources SHP (2200 K) sur la visibilité des cibles. Son expérience se basait sur une approche binaire : les participants devaient spécifier s'ils pouvaient détecter ou non différentes cibles placées dans leur champ de vision central. Ces dernières pouvant présenter 3 valeurs de contrastes photopiques différentes. Les résultats obtenus montrèrent que la source LED permettait d'avoir de meilleurs résultats que la source SHP. Une autre étude menée par Zhang (Zhang et al. 2017), spécifiquement montée pour étudier l'éclairage de tunnel cette fois, consistait à cacher une cible achromatique derrière un rideau, puis à lever ce rideau et à mesurer le temps que mettait l'observateur pour reconnaître la cible. Ce temps de reconnaissance correspondait également à une performance visuelle. L'expérience de Zhang s'intéressait à l'impact de la température de couleur sur les capacités de visibilité, mais également à celui de l'indice de rendu des couleurs (pour une cible achromatique). Liu et al. (Liu et al. 2021) ont testé l'impact de sources LEDs présentant des températures de couleur allant de 1900 K à 5100 K sur les performances de visibilité d'observateurs dans leur champ de vision central. La conclusion tirée de cette expérience était que la source à 3800 K permettait d'atteindre les meilleures performances visuelles. Les résultats de Górczewska montrent qu'une température de couleur plus élevée implique une meilleure performance visuelle, tandis que l'étude de Zhang n'apporte aucune conclusion quant à l'impact de la température de couleur sur la visibilité. Il conclut néanmoins qu'une amélioration de l'indice de rendu des couleurs pour une température de couleur constante permet d'améliorer les performances visuelles des observateurs. De la même façon, l'expérience de Liu indique que les meilleures performances visuelles sont obtenues pour une température de couleur intermédiaire, et non pas pour celles aux extrémités de la gamme testée. Enfin, une expérience de Bisketzis (Bisketzis, Bouroussis, et Topalis 2009) se basant sur le ratio S/P de sources (voir section **1.4.2.1 Vision mésopique**) et non pas sur la température de couleur (autre manière de prendre en compte le spectre) a également été menée. Il testa l'impact de 4 sources présentant des ratios S/P allant de 0.90 à 1.62 et trouva que l'acuité visuelle en champ de vision central était plus faible lorsque ce ratio augmentait. Il est à noter qu'en pratique, l'augmentation du ratio S/P va généralement de pair avec une augmentation de la température de couleur : le résultat obtenu par Bisketzis semble donc aller à l'encontre de

celui obtenu par Górczewska. Ainsi, les conclusions sur l'impact du spectre en champ de vision central semblent moins tranchées que celles établies pour le champ de vision périphérique.

Cette approche par performance visuelle n'était pas aussi exclusive qu'en champ de vision périphérique. En effet, plusieurs études de visibilité en champ de vision central ont choisi de caractériser la visibilité de manière subjective sous la forme d'une échelle de notation. Certaines de ces expériences visaient à lier le ressenti des observateurs avec les grandeurs photométriques mesurées (notamment le contraste de la cible avec son environnement de fond) (Ménard et Cariou 1994; Bozorg Chenani et al. 2016; 2017). D'autres consistaient, comme pour les études par performances visuelles, à comparer les résultats obtenus pour des sources LEDs et pour des sources plus traditionnelles (Kimura et al. 2013). Les résultats obtenus par Kimura nous intéressent moins ici puisqu'ils investiguent l'impact de l'uniformité de la distribution de la lumière et non pas celui du spectre de la source.

Ces deux approches différentes nous ont paru intéressantes pour caractériser la visibilité des observateurs en champ de vision central. L'approche binaire (détection ou non d'une cible) permet de limiter l'influence du jugement de l'individu, tandis que l'approche par échelle de notation permet de considérer la visibilité comme une notion plus complexe et nuancée.

2.1.3 Axes de recherche

Finalement, il apparaît que la plupart des recherches menées en éclairage routier sur l'impact du spectre des sources de lumière sur les performances visuelles des conducteurs se sont intéressées au rôle de la vision mésopique et ont privilégié une détection de cibles en champ de vision périphérique. La caractérisation de la visibilité en champ de vision central a été moins investiguée et les résultats des études sont moins unanimes que ceux collectés en champ de vision périphérique.

De la même manière, l'impact potentiel des CGRips sur la visibilité en éclairage routier n'a jamais été étudié à notre connaissance. Notre étude se propose donc de s'intéresser à ces deux points en particulier : l'impact du passage de sources SHP à des sources LEDs (dont on peut choisir la température de couleur) sur la visibilité des conducteurs en champ de vision central, ainsi que l'impact de l'excitation des CGRips sur la visibilité des conducteurs. Au vu des quelques études recensées menées en champ de vision central, notre approche se propose de caractériser la visibilité via une échelle de notation, afin de ne pas binariser cette notion.

Enfin, au vu des résultats obtenus pour les deux premières problématiques citées ci-dessus, on pourra se demander s'il est possible d'optimiser le spectre des LEDs en section courante de tunnel afin d'offrir de bonnes conditions de visibilité aux conducteurs tout en réalisant des économies d'énergie pour les exploitants.

2.2 Expérimentation

2.2.1 Objectifs

2.2.1.1 Sources traditionnelles / LEDs

Comme expliqué précédemment, le passage de sources traditionnelles à des sources LEDs soulèvent de nombreuses interrogations quant à la validité des règles de dimensionnement utilisées jusqu'alors en éclairage de tunnel routier. Les différences existant notamment entre les spectres de ces sources traditionnelles et celui des LEDs, et plus particulièrement entre les sources SHP et les sources LEDs, font partie de ces questionnements.

Cet impact a été caractérisé à plusieurs reprises en champ de vision périphérique, notamment lors d'études menées pour de l'éclairage routier classique. Cette caractérisation des performances visuelles des conducteurs en champ de vision périphérique est extrêmement importante en éclairage routier classique afin de juger de la sécurité des usagers. En effet, lorsque le conducteur roule sur une route à l'air libre, des dangers peuvent surgir de l'environnement proche et la capacité de détection de ces dangers sera associée aux performances visuelles du conducteur dans son champ de vision périphérique. Lorsque l'on s'intéresse à l'éclairage de tunnel, ces performances visuelles en champ de vision périphérique sont beaucoup moins intéressantes puisque le conducteur évolue dans un environnement clos et relativement contrôlé. Il y a peu de chance que les dangers qu'il pourra rencontrer apparaissent dans son champ de vision périphérique et il sera par conséquent beaucoup plus intéressant de tester l'impact du spectre sur la visibilité en champ de vision central pour le cas de figure du tunnel.

Un des objectifs de cette expérience est donc de déterminer l'impact du passage d'un spectre de source Sodium Haute Pression à un spectre de LED sur la visibilité des cibles situées en champ de vision central.

L'expérience devra donc permettre de comparer la visibilité d'une cible offerte par des sources LEDs et par une source SHP.

Il est à noter que cette expérience se focalise sur l'éclairage de section courante. En effet, le matériel utilisé ne permettait pas d'atteindre les niveaux de luminance caractéristiques de la zone d'entrée.

2.2.1.2 Choix des températures de couleur

Les sources SHP utilisées en tunnel présentent sensiblement toutes les mêmes caractéristiques spectrales. Ce n'est cependant pas le cas des sources LEDs qui peuvent offrir de nombreuses températures de couleur différentes. Généralement, ces températures de couleur sont comprises entre 3000 K et 5000 K. Quelques tunnels sont équipés avec des sources présentant des températures de couleur pouvant aller jusqu'à 6000 K, mais les retours des conducteurs tendent généralement à affirmer que des températures de couleur aussi

élevées sont très inconfortables du fait qu'elles apparaissent comme plus éblouissantes aux yeux des conducteurs (Bullough 2009).

Pour cette expérience, il a donc été choisi de tester 3 spectres spécifiquement conçus pour déterminer l'impact du passage d'une source SHP à des sources LEDs sur la visibilité des conducteurs en champ de vision central :

- Un spectre reproduisant la température de couleur d'une source Sodium Haute Pression, mais réalisé avec des LEDs (température de couleur de 2000 K) ;
- Un spectre de LED blanche à 3000 K ;
- Un spectre de LED blanche à 5000 K.

La prise en compte de deux LEDs blanches différentes permet de couvrir de nombreux cas de figure d'installations d'éclairage utilisées actuellement en tunnel. L'usage de températures de couleur supérieures à 5000 K restant très marginale, nous avons choisi de ne pas nous y intéresser durant cette expérimentation.

2.2.1.3 Influence des CGRips

Toutes les études menées sur la visibilité en éclairage routier se sont concentrées sur les deux types de photorécepteurs de l'œil humain connus pour jouer un rôle direct dans le processus de vision : les cônes et les bâtonnets. Cependant, comme on a pu le voir dans le chapitre 1 en section **1.4.2.2 Cellules à mélanopsine**, un type de photorécepteur jusqu'alors connu pour ses effets non visuels pourrait potentiellement jouer également un rôle direct dans le processus de vision : les CGRips. L'impact potentiel de ces cellules sur la visibilité n'a donc pas encore été étudié. Un deuxième objectif de cette expérience se propose ainsi de tester l'impact de l'excitation de la mélanopsine (le photopigment contenu dans les CGRips et supposé responsable des effets visuels que ces dernières suscitent) sur la visibilité des conducteurs en champ de vision central.

Afin de caractériser cet impact, il nous faut pouvoir comparer des spectres similaires mais dont l'excitation mélanopique diffère significativement. Pour ce faire, nous avons décidé d'utiliser la méthode des spectres métamères, mise en exergue notamment dans l'étude de Brown (Brown et al. 2012). Il a donc été décidé de reprendre nos trois spectres de base définis par la problématique précédente et de créer pour chacun d'eux un spectre métamère qui va reproduire les valeurs de températures de couleur, de coordonnées trichromatiques et d'indice de fidélité des couleurs R_f de sa version classique, tout en maximisant son excitation mélanopique (calculée en pratique via le « Daylight Efficacy Ratio » mélanopique, présenté en section **2.3.3 Caractéristiques des spectres reçus par les observateurs**, équation [2-24]). Le but de cette méthode de spectres métamères est de faire varier l'excitation mélanopique tout en fixant les autres paramètres (température de couleur, coordonnées trichromatiques, R_f et niveaux d'éclairement) afin de caractériser uniquement l'impact de ce phénomène sur la visibilité. Le total de spectres utilisés pour cette expérience s'élève donc cette fois à 6. On

appellera « High Mela » ou HM les spectres excitant fortement la mélanopsine et « Low Mela » ou LM les spectres excitant peu la mélanopsine (les spectres LM coïncident avec les spectres « classiques » exposés ci-dessus). Les spectres finaux sont les suivants :

- Un spectre de LED à 5000K « Low Mela » (5000 K LM) ;
- Un spectre de LED à 5000K « High Mela » (5000 K HM) ;
- Un spectre de LED à 3000K « Low Mela » (3000 K LM) ;
- Un spectre de LED à 3000K « High Mela » (3000 K HM) ;
- Un spectre de LED à 2000 K (cherchant à reproduire une source SHP) « Low Mela » (2000 K LM) ;
- Un spectre de LED à 2000 K (cherchant à reproduire une source SHP) « High Mela » (2000 K HM).

2.2.1.4 Niveaux de luminance de chaussée

Les niveaux de luminance de chaussée à utiliser pour l'expérience psycho-visuelle doivent représenter les niveaux caractéristiques d'une section courante de tunnel (conditions diurnes ou nocturnes). Ces niveaux de luminance devront donc au minimum couvrir la plage 1 cd/m^2 - 6 cd/m^2 , si l'on considère les recommandations du CETU. Dans l'idéal, il faudrait pouvoir couvrir la plage 1 cd/m^2 - 15 cd/m^2 afin d'englober toutes les recommandations étudiées au chapitre 1.

2.2.1.5 Hypothèses

Comme mentionné précédemment, cette expérience de visibilité se démarque de celles menées plus classiquement sur plusieurs points :

- Le champ de vision central est considéré ;
- La visibilité est abordée comme une notion plus complexe qu'une simple donnée binaire ;
- L'impact des CGRips sur la visibilité est pris en compte.

De nombreuses études tendent à montrer que le passage d'un spectre de SHP à un spectre de LED, donc un enrichissement énergétique du spectre dans les courtes longueurs d'onde, permet d'améliorer les performances visuelles des conducteurs dans le champ de vision périphérique (à niveau de luminance photopique constant). Les expérimentations menées en champ de vision central ont montré que les deux facteurs impactant principalement les performances visuelles des conducteurs étaient le niveau de luminance général dans le champ de vision du conducteur, et le contraste de la cible avec son environnement de fond. Dans notre expérience, les niveaux de luminance photopique sont constants d'une distribution spectrale relative à l'autre pour chaque palier d'éclairage (voir section **2.2.2.4 Tests pilotes et création des spectres théoriques**), c'est donc le contraste de luminance entre la cible et son environnement de fond qui va déterminer les performances de détection des

observateurs. La vision mésopique n'intervient pas (ou très peu) en champ de vision central, le calcul du contraste se basant sur les luminances photopiques semble donc adapté pour retranscrire les perceptions des observateurs. Ainsi, en ne considérant que les photorécepteurs « classiques » et les résultats des études menées jusqu'alors sur la visibilité en champ de vision central, le passage d'un spectre de SHP à un spectre de LED ne devrait pas avoir d'impact sur la visibilité des conducteurs. Cependant, le rôle encore ambigu que jouent les CGRips dans le processus de vision (détaillé en section **1.4.2.2 Cellules à mélanopsine**) pourrait impacter la perception du contraste qu'ont les participants, notamment du fait qu'une excitation mélanopique importante engendre une impression de luminosité accrue chez les observateurs, selon plusieurs études. L'impact que pourrait avoir les CGRips sur le contraste n'est pas clairement défini, puisque cette impression de luminosité accrue devrait impacter à la fois la perception de la cible et celle de son environnement de fond. Certaines études précisent même que l'impact des CGRips se fait principalement ressentir en champ de vision périphérique, tout comme pour les bâtonnets (Esquiva et al. 2017). Dans ce cas de figure, ces cellules pourraient augmenter très légèrement la luminance de voile perçue par l'observateur sans modifier la sensation de luminosité de la cible et de son environnement de fond direct, ce qui résulterait en une dégradation du contraste perçu. Le rôle direct des CGRips dans le processus de vision n'étant pas encore tout à fait caractérisé par la communauté scientifique, les résultats attendus ne sont pas figés.

2.2.2 Matériel et méthode

Trois objectifs sont recherchés ici :

- Déterminer l'impact du passage d'un spectre de source Sodium Haute Pression à un spectre de LED sur la visibilité des cibles en champ de vision central ;
- Déterminer l'impact de l'excitation de la mélanopsine sur la visibilité des conducteurs en champ de vision central ;
- Déduire, à partir des réponses apportées aux deux premières problématiques, s'il est possible d'éclairer une section courante de tunnel en consommant moins d'énergie tout en assurant des conditions de visibilité adéquates, en jouant sur le spectre.

Ce dernier objectif est également recherché dans les expériences de visibilité classiques sur le champ de vision périphérique et les résultats de notre travail permettront notamment de tester si les observations faites pour la détection périphérique sont applicables au champ de vision central.

2.2.2.1 Maquette

L'expérience se déroule en laboratoire sur une maquette de tunnel à l'échelle 1/20. La maquette représente un tube unidirectionnel à deux voies et de section rectangulaire. La largeur de la chaussée est prise égale à 10 m et la hauteur des luminaires (hauteur de la

section) est de 5 m. La vitesse limite est choisie à 90 km/h et la distance d'arrêt associée, qui sera également la distance d'observation, est donnée par l'équation [2-1].

$$DA = v t_0 + \frac{v^2}{2g(f \pm s)} \quad [2-1]$$

Avec DA la distance d'arrêt (m) ;

v la vitesse du véhicule avant que le conducteur ne commence à freiner ($m.s^{-1}$) ;

t_0 le temps de réaction du conducteur (s) ;

g l'accélération de pesanteur (généralement prise égale à $9.81 m.s^{-2}$) ;

f le coefficient de friction du revêtement (fonction de la vitesse et du caractère sec/mouillé du revêtement) ;

s la pente de la route (égale à 0% dans ce cas).

Les équations [2-2] et [2-3] donnent les coefficients de friction pour chaussée sèche et pour chaussée mouillée. Elles ont été établies en modélisant les fonctions à partir des données proposées par la CIE (CIE 88 2004). La Figure 2-1 montre le comportement de ces fonctions.

$$\begin{cases} f_s = -0.00008 v^2 + 0.0077 v + 0.4838 & \text{si } v \leq 60 \text{ km/h} \\ f_s = (0.47 - 0.66) \frac{v-60}{140-60} + 0.66 & \text{si } v > 60 \text{ km/h} \end{cases} \quad [2-2]$$

$$f_m = -6.702 \times 10^{-8} v^3 + 3.407 \times 10^{-5} v^2 - 0.005694 v + 0.6059 \quad [2-3]$$

Avec f_s le coefficient de friction pour chaussée sèche ;

v la vitesse ($km.h^{-1}$) ;

f_m le coefficient de friction pour chaussée mouillée.

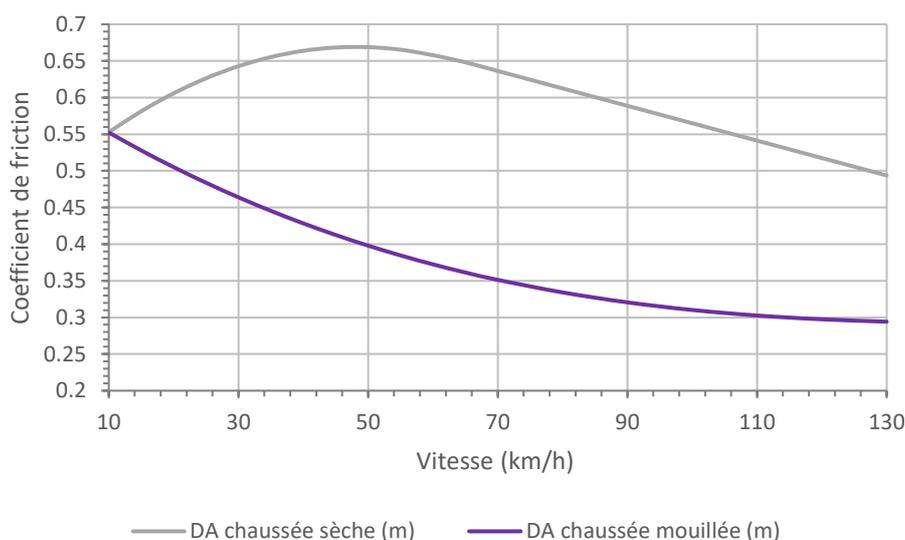


Figure 2-1 Représentation graphique des coefficients de friction pour chaussée sèche et chaussée mouillée en fonction de la vitesse

En considérant un temps de réaction moyen du conducteur de 1 s, un revêtement de chaussée sec, et une vitesse de référence de 90 km/h, on obtient une distance d'arrêt de 82 m. A l'échelle 1/20, on convertit cette distance en 410 cm, qui sera la distance entre la cible et l'entrée de la maquette pour le déroulement de l'expérience.

La hauteur d'œil du conducteur est prise égale à 1.5 m. La cible considérée dans cette étude est une cible classiquement utilisée dans des expériences de visibilité, c'est également la cible de référence dans la méthode de dimensionnement STV (Small Target Visibility). Il s'agit donc d'un carré gris de 20 cm de côté et de facteur de réflexion de 0.23.

Toutes les distances (maquette et ouvrage théorique) sont résumées en Tableau 2-1.

Tableau 2-1 Dimensions de la maquette et de l'ouvrage théorique correspondant

	Mesures sur ouvrage théorique	Mesures sur la maquette (échelle 1/20)
Hauteur d'œil	1.5 m	7.5 cm
Distance d'observation	82 m	4.1 m
Taille de la cible carrée	20 cm	1 cm
Largeur de la section du tunnel	10 m	50 cm
Hauteur de la section du tunnel	5 m	25 cm
Longueur du tunnel	100 m	5 m
Distance longitudinale entre deux luminaires (centre à centre)	8 m	40 cm
Distance transversale entre deux luminaires (centre à centre)	4.3 m	21.5 cm

Le modèle est réalisé à l'aide d'armatures en aluminium sur lesquels des panneaux de bois peints sont apposés afin de modéliser les piédroits, la chaussée et le « plafond ». Ce dernier est peint avec une peinture acrylique noire mate de la marque TOLLENS, les piédroits sont partagés en deux zones dans le sens de la hauteur : la moitié basse est peinte avec du gris de Munsell N7 et la moitié haute avec la même peinture que celle du « plafond », et la chaussée est peinte avec un mélange de noir (même peinture que le « plafond » et les piédroits) et de blanc (peinture acrylique blanche mate de la marque TOLLENS). Ces surfaces peintes ont été considérées comme parfaitement diffusantes du fait du caractère mat de la peinture utilisée. Cette hypothèse implique que la loi de Lambert peut être appliquée à ces surfaces, cette dernière est rappelée en équation [2-4].

$$\rho(\lambda) E_e(\lambda) = \pi L_e(\lambda) \quad [2-4]$$

Avec $\rho(\lambda)$ le facteur de réflexion spectral d'un matériau pour une longueur d'onde λ donnée ;

$E_e(\lambda)$ l'éclairement énergétique pour une longueur d'onde λ donnée (W.m^{-2}) ;

$L_e(\lambda)$ la radiance pour une longueur d'onde λ donnée ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$).

L'utilisation de cette loi (présentée ici sous sa forme spectrale) nous a permis de caractériser les facteurs de réflexion spectraux des différentes surfaces utilisées dans notre maquette. Pour ce faire, nous avons eu recours au spectroradiomètre (présenté ci-après en section **2.2.2.2 LEDs Chips On Board (COBs)**) afin de mesurer, sous des conditions d'éclairage identique, la radiance obtenue pour notre matériau et pour un échantillon de blanc de référence (matériau diffusant standard BN R98 SQ de Gigahertz Optik) dont les propriétés de réflexion spectrale sont connues (facteur de réflexion égal à 0.98 pour toutes les longueurs d'onde du spectre du visible). L'équation [2-4] (loi de Lambert) est donc valable pour les deux surfaces considérées (blanc de référence et bois peint), en divisant l'une de ces relations par l'autre, on obtient :

$$\frac{\rho_{ref}(\lambda) E_{e_{ref}}(\lambda)}{\rho_m(\lambda) E_{e_m}(\lambda)} = \frac{L_{e_{ref}}(\lambda)}{L_{e_m}(\lambda)} \quad [2-5]$$

Avec $\rho_{ref}(\lambda)$ le facteur de réflexion spectral du blanc de référence pour une longueur d'onde λ donnée (toujours égal à 0.98) ;

$\rho_m(\lambda)$ le facteur de réflexion spectral du matériau que l'on cherche à caractériser pour une longueur d'onde λ donnée ;

$E_{e_{ref}}(\lambda)$ l'éclairement énergétique reçu par le blanc de référence pour une longueur d'onde λ donnée (W.m^{-2}) ;

$E_{e_m}(\lambda)$ l'éclairement énergétique reçu par le matériau à caractériser pour une longueur d'onde λ donnée (W.m^{-2}) ;

$L_{e_{ref}}(\lambda)$ la radiance mesurée sur le blanc de référence pour une longueur d'onde λ donnée ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$) ;

$L_{e_m}(\lambda)$ la radiance mesurée sur le matériau à caractériser pour une longueur d'onde λ donnée ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$).

Les conditions d'éclairage étant les mêmes lors des deux mesures, l'éclairement énergétique reçu par le blanc de référence est égal à celui reçu par le matériau à caractériser pour tous λ , donc $E_{e_{ref}}(\lambda) = E_{e_m}(\lambda)$. De plus, $\rho_{ref}(\lambda)$ est connu (égal à 0.98 pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible) et les valeurs de $L_{e_{ref}}(\lambda)$ et de $L_{e_m}(\lambda)$ sont mesurées pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible à l'aide du spectroradiomètre : on obtient donc $\rho_m(\lambda)$ pour tous λ compris entre 380 nm et 780 nm.

$$\rho_m(\lambda) = 0.98 \frac{L_{e_m}(\lambda)}{L_{e_{ref}}(\lambda)} \quad [2-6]$$

Les valeurs obtenues pour les différentes surfaces utilisées dans la maquette sont présentées en Figure 2-2.

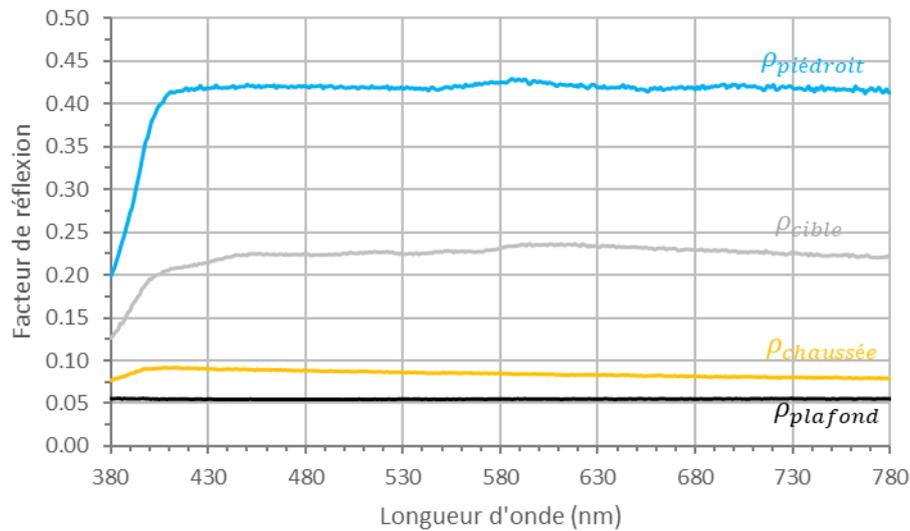


Figure 2-2 Facteurs de réflexion spectraux des différents matériaux présents dans la maquette

A partir de ces facteurs de réflexion spectraux, il est possible de calculer un facteur de réflexion photopique moyen pour le matériau considéré, en utilisant l'équation [2-7].

$$\rho_{\text{moy}} = \frac{\int \rho_m(\lambda) V(\lambda) s_{\text{source}}(\lambda) d\lambda}{\int V(\lambda) s_{\text{source}}(\lambda) d\lambda} \quad [2-7]$$

Avec ρ_{moy} le facteur de réflexion photopique moyen du matériau considéré ;

$s_{\text{source}}(\lambda)$ le spectre de la source de lumière considéré : le facteur de réflexion photopique moyen dépend donc de la source de lumière choisi pour le calcul ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) ;

Le calcul du facteur de réflexion photopique moyen de chacun des matériaux présents dans la maquette a donc été réalisé pour les 6 spectres de source utilisés dans l'expérience et présentés ci-après dans ce chapitre (voir section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairément**), ainsi que pour le spectre de l'illuminant D65 de la CIE (CIE 204 2013). Les résultats obtenus pour un même matériau en changeant simplement le spectre de la source étaient très similaires (écart-type maximal de 0.12%), une valeur moyennée pour tous les spectres de source a donc été retenue pour chacun de ces matériaux. Les facteurs de réflexion photopiques moyens retenus finalement sont donc : 0.054 pour le plafond et le haut des piédroits, 0.085 pour la chaussée, 0.231 pour la cible, et 0.422 pour le bas des piédroits.

Le panneau de bois sur la face supérieure du parallélépipède est percé d'orifices circulaires au-dessus desquels sont disposées des LEDs Chips On Board (COBs) qui font office de luminaires. Les caractéristiques techniques de ces LEDs sont présentées dans la section suivante **2.2.2.2 LEDs Chips On Board (COBs)**. Les orifices ont un diamètre de 7.3 cm, sont écartés de 40 cm dans le sens de la longueur et sont répartis en deux files écartées de 21.5 cm dans le sens de la largeur. Les mesures sont données de centre à centre. La maquette

comporte donc deux files de 12 luminaires. Les deux premiers luminaires sont situés à 69 cm de l'observateur afin d'éviter un éblouissement trop important. Une photographie de l'extérieur de la maquette est présentée en Figure 2-3.



Figure 2-3 Photographie de l'extérieur de la maquette, prise de vue depuis la position de l'observateur

L'observateur est placé à une extrémité de la maquette, il est assis sur une chaise type Zaisu et regarde directement à l'intérieur du tunnel. Les conditions de vision de la cible sont définies en suivant les recommandations de la CIE pour des tunnels réels (CIE 88 2004). Le centre de l'œil de l'observateur est situé à environ 7.5 cm au-dessus de la surface de la chaussée, ce qui correspond aux 1.5 m recommandés par la CIE. Cette valeur est maintenue constante grâce à une mentonnière. L'observateur doit repérer une cible pouvant prendre différentes formes (carré, rond, triangle ou étoile), grise, de 1 cm² de surface (cible classiquement utilisée en expérience de visibilité et mise à l'échelle 1/20). La cible est présentée juste au-dessus de la chaussée, au milieu de la largeur et à une distance de 410 cm. Cette distance correspond aux 82 m de distance d'arrêt calculés précédemment. La taille angulaire de la cible vue par les observateurs est de 8.4 minutes d'angle (soit 0.14°). Toutes les cibles sont achromatiques et peintes avec deux couches de peinture gris mat (gris de Munsell N5) pour un facteur de réflexion photopique moyen de 0.23. Les propriétés de la cible sont donc relativement proches des recommandations CIE (cible carrée de 20 cm de côté avec un facteur de réflexion de 0.20 (CIE 88 2004)). Les 4 cibles sont positionnées tous les 90° sur un moteur pas à pas qui

est fixé sous la maquette (voir Figure 2-5) et contrôlé à distance afin de pouvoir choisir quelle cible est présentée dans le tunnel. Il est possible de ne montrer aucune cible (position intermédiaire entre deux cibles). La Figure 2-4 montre le moteur pas à pas (1) et l'apparence de la cible carrée à l'intérieur de la maquette (2).

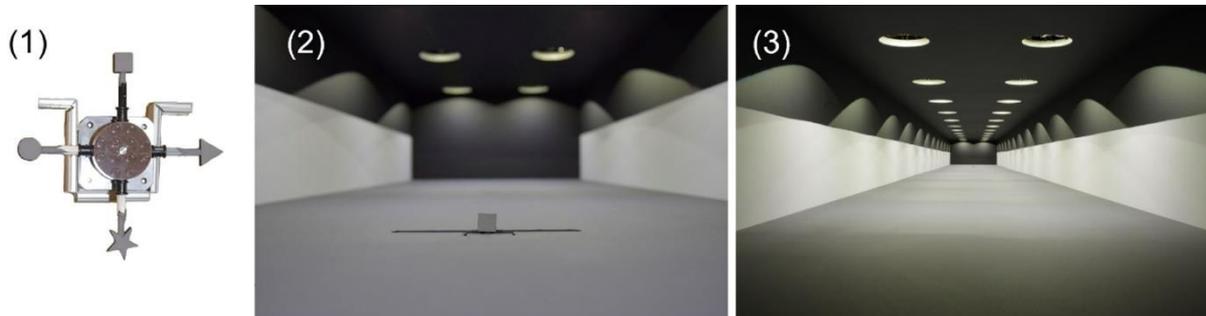


Figure 2-4 (1) Photographie des 4 cibles utilisées dans l'expérience ; (2) Vue proche de la cible carrée dans le tunnel (photographie) ; (3) Vue depuis la position de l'observateur (photographie)

Durant le déroulement de l'expérience, toutes les sources de lumière de la salle sont éteintes, seules les COBs sont allumées. Le dispositif expérimental est résumé en Figure 2-5.

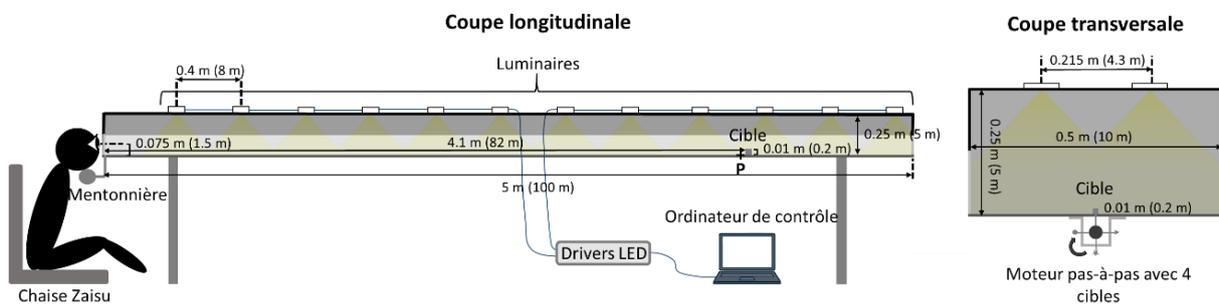


Figure 2-5 Dispositif expérimental. Les dimensions sont données pour la maquette à l'échelle 1/20 (les dimensions réelles théoriques sont données entre parenthèses)

2.2.2.2 LEDs Chips On Board (COBs)

Les sources utilisées pour cette maquette sont des LEDs LZ7-04M100 de la marque LED ENGIN. Chaque orifice est équipé d'une de ces LEDs qui font office de luminaires. La maquette est donc éclairée par 24 COBs au total.

Chacune de ces COBs comporte 7 puces LEDs différentes qui, par combinaison, permettent de créer une grande variété de spectres à des intensités lumineuses différentes. Les LEDs sont les suivantes : rouge, verte, bleue, ambre, blanche à 6500 K, cyan et violette. Leurs spectres sont présentés en Figure 2-6. Ces derniers sont obtenus en mesurant l'irradiance spectrale avec un spectroradiomètre JETI Specbos 1211 UV (SN°2011273, calibré l'année de l'expérimentation).

Le point de référence (P) pour les mesures est situé sur la chaussée juste devant la cible (voir Figure 2-5). Un trou circulaire est pratiqué dans le panneau de bois de la chaussée juste devant la cible, et la tête du spectroradiomètre équipée de son diffuseur est insérée dans cet orifice jusqu'à ce qu'elle atteigne le niveau de la chaussée. Pendant l'expérience, le spectroradiomètre est retiré et le trou est rebouché à l'aide d'un morceau de medium paint comme la chaussée.

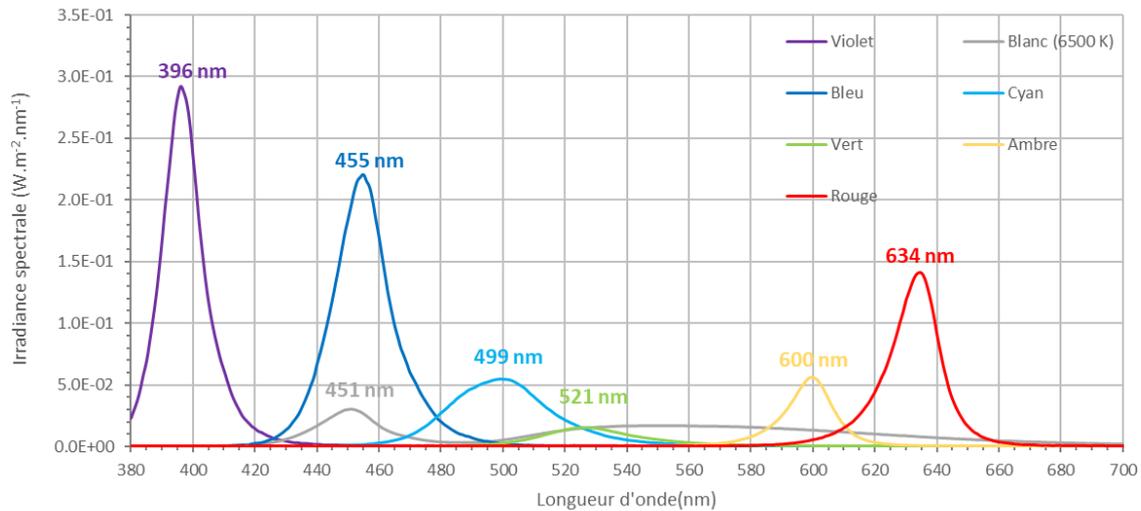


Figure 2-6 Irradiance spectrale mesurée, sur la chaussée, juste devant la cible, pour chacune des 7 puces LEDs à puissance maximale

Le contrôle des LEDs se fait par un codage DMX, via des drivers POWERdrive 106/A de la marque eldoLED. En pratique, les 24 LZ7 sont divisées en deux circuits différents pour chaque type de puce. Chacun de ces circuits est composé de 12 puces montées en série. Les deux circuits sont contrôlés par le même driver. On a donc 7 drivers en tout qui permettent chacun de contrôler toutes les puces d'un même type à l'intérieur du tunnel. L'intensité de chaque type de LED est ainsi codée par une valeur de 0 à 255 sur 7 canaux différents (un canal permet de contrôler simultanément toutes les LEDs d'un même type, par exemple une valeur de 255 sur le canal 1 va permettre d'allumer toutes les LEDs rouge de la maquette à leur intensité maximale). Le système ne dispose donc pas d'un canal d'intensité générale et les mélanges doivent ainsi être retravaillés si l'on souhaite baisser ou augmenter le niveau lumineux général à l'intérieur de la maquette.

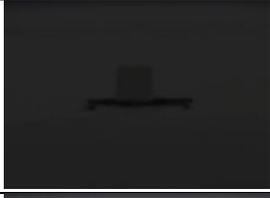
Les spectres finalement retenus pour l'expérimentation sont plus amplement détaillés en section **2.2.2.5 Choix de la méthode et des spectres**.

2.2.2.3 Détermination de l'échelle de visibilité

Le but de l'expérience est de comparer les performances visuelles des observateurs sous les 6 spectres de lumière évoqués précédemment. Ces performances visuelles sont mesurées grâce à une échelle de visibilité. L'utilisation d'une échelle offre une prise en compte plus subjective de la visibilité que les expériences classiquement menées pour déterminer l'impact de la vision mésopique, puisqu'on la considère ici non pas comme un phénomène binaire, mais plutôt en tant que processus évolutif à plusieurs étapes. L'idée est de couvrir un domaine allant de l'absence totale de visibilité à une visibilité parfaite de l'obstacle. Pour ce faire, 5 seuils de visibilité ont été définis en s'appuyant sur des études précédentes. Les seuils 1 et 2 indiquent la capacité de l'observateur à répondre à la question « la cible peut-elle être vue ? » (le seuil 1 sans que l'observateur soit totalement sûr et le seuil 2 lorsque l'observateur est totalement sûr). Le seuil 1, et plus particulièrement le seuil 2 donnent le niveau d'éclairement correspondant au seuil de détection de la cible achromatique par l'observateur (Adrian 1989; Freiding et al. 2007). Les seuils 3 et 4 indiquent la capacité de l'observateur à répondre à la question « quelle est la forme de la cible ? » (le seuil 3 sans que l'observateur soit totalement sûr et le seuil 4 lorsque l'observateur est totalement sûr). Le seuil 3, et plus particulièrement le seuil 4, donnent le niveau d'éclairement correspondant au seuil de discrimination de la cible achromatique par l'observateur (Várady et al. 2007). Finalement, le seuil 5 correspond à la situation où l'observateur considère que la visibilité de la cible est excellente et a même atteint un plateau. L'objectif est que chaque observateur caractérise ces différents seuils de visibilité pour les 6 spectres de l'expérience en gradation ascendante et en gradation descendante (une gradation de chaque type pour les 6 spectres présentés plus haut). Ces deux types de gradation sont appelées respectivement « montées » et « descentes » dans la suite. Le fait de présenter aux observateurs chaque spectre en montées et en descente permet de limiter l'éventuel impact d'un biais d'ancrage sur les résultats (CIE 212 2014). Typiquement, ce biais signifie que les seuils pour les descentes seront obtenus pour des niveaux lumineux plus élevés que les seuils pour les montées.

L'échelle finale est présentée dans le Tableau 2-2. Comme on peut le voir, les textes décrivant les différents seuils ont été adaptés pour les montées et les descentes. Pour exemple, le seuil 1 correspond à « cible juste perceptible » en montée car c'est le moment à partir duquel l'observateur va commencer à distinguer un point singulier sur la chaussée, tandis qu'il est intitulé « disparition de la cible » en descente car c'est le moment à partir duquel, à l'inverse, ce point singulier va disparaître.

Tableau 2-2 Echelle de visibilité utilisée dans l'expérience

Seuil de visibilité	Intitulés des seuils en montées	Description détaillée des seuils en montées	Modèle conceptuel correspondant à la perception visuelle théorique des observateurs	Intitulés des seuils en descentes	Description détaillée des seuils en descentes
Seuil 1	Cible juste perceptible	L'observateur distingue un point singulier sur la chaussée mais ne peut affirmer avec précision qu'il s'agit d'un obstacle		Disparition de la cible	L'observateur ne voit plus du tout la cible.
Seuil 2	Cible discernable	L'observateur est certain que le point singulier cité précédemment s'avère être un obstacle		Présence incertaine de la cible	L'observateur ne peut affirmer avec certitude que le point singulier qu'il distingue est un objet
Seuil 3	Cible reconnaissable	L'observateur pense reconnaître la forme de l'objet, il n'en est cependant pas sûr à 100%		Forme non reconnaissable	L'observateur ne parvient plus à identifier la forme de l'objet
Seuil 4	Bonne visibilité de la cible	La forme de l'objet est formellement identifiée par l'observateur, il n'y a pas de doute possible		Conditions de visibilité dégradées	L'observateur n'est plus sûr et certain de la forme de l'objet, mais il pense la distinguer tout de même
Seuil 5	Excellente visibilité de la cible	L'observateur distingue bien tous les détails de la scène, sa visibilité est excellente et un apport de lumière ne lui semble pas nécessaire (puisque ce dernier n'apporterait pas grand-chose en termes de visibilité)		Bonne visibilité de la cible	L'observateur perd son excellente visibilité, il sent que quelques détails de la scène lui échappent

2.2.2.4 Tests pilotes et création des spectres théoriques

L'expérience réalisée porte donc sur les conditions de visibilité d'une cible en section courante de tunnel, comme cela a été énoncé plus haut.

Les premiers tests pilotes ont été réalisés sur trois personnes du laboratoire, le choix a été fait de donner peu d'indications à ces personnes afin de voir leur appréciation spontanée de la visibilité. Les résultats donnés par ces personnes ont ensuite été comparés à nos propres ressentis vis-à-vis de l'expérience et à l'échelle de visibilité présentée en Tableau 2-2.

Deux objectifs spécifiques étaient recherchés au travers de ces premiers tests :

- Vérifier que les seuils de visibilité proposés dans l'échelle de notation étaient globalement en accord avec le ressenti des observateurs ;
- Déterminer grossièrement les valeurs de luminance de chaussée nécessaires pour atteindre chacun de ces seuils.

Ces premiers tests ont simplement consisté à augmenter progressivement les valeurs de DMX de la LED blanche et de la LED ambre des COBs ou à diminuer progressivement les valeurs DMX de la LED ambre, en demandant aux participants d'indiquer à l'opérateur lorsqu'ils estimaient que les conditions de visibilité de la cible changeaient. Aucune indication particulière de seuil ne leur était donnée afin de collecter leur ressenti brut vis-à-vis de l'évolution des conditions de visibilité de la cible. Les résultats ont permis de faire émerger 5 seuils de visibilité pour l'augmentation progressive des niveaux lumineux à l'intérieur de la maquette et 4 seuils pour la diminution. Les 5 seuils de visibilité obtenus en montées correspondent globalement à ceux établis dans l'échelle de notation (Tableau 2-2). Pour la descente, seul l'équivalent des 4 premiers seuils (dans l'ordre présenté dans le Tableau 2-2) ont été mis en évidence par les experts, la perte de l'excellente visibilité n'a pas été indiquée. Les seuils déterminés lors de la gradation ascendante étaient plus intuitifs que ceux jalonnant la gradation descendante selon les participants. Par souci de simplicité, nous souhaitions avoir une unique échelle valable à la fois pour l'augmentation et la diminution des niveaux lumineux à l'intérieur de la maquette : il a donc été décidé de conserver les résultats obtenus pour l'échelle montante comme référence (voir Tableau 2-2) et de lui définir un équivalent pour la diminution. Cet équivalent consiste simplement à déterminer les niveaux à partir desquels les conditions décrites pour chaque seuil ne sont plus atteintes. L'objectif de cette première approche était de s'assurer que les niveaux lumineux proposés suffisaient à couvrir un domaine allant de l'absence de visibilité de la cible, jusqu'à une visibilité parfaite de la cible. Les seuils de visibilité qui ont été mis en évidence par le panel d'expert sont les suivants : seuil 1 « je pense qu'il y a un obstacle sans en être sûr » ; seuil 2 « je suis sûr qu'il y a un obstacle » ; seuil 3 « je pense reconnaître la forme de l'obstacle sans en être sûr » ; seuil 4 « je suis sûr de la forme de l'obstacle » ; seuil 5 « ma visibilité est parfaite, l'augmentation de luminosité n'est plus nécessaire », qui correspondent bien aux seuils préétablis dans l'échelle de notation. En pratique, Les niveaux DMX pour lesquels les seuils étaient atteints étaient enregistrés. Des mesures préalablement réalisées dans la maquette ont permis d'établir des fonctions de correspondance entre niveaux DMX et valeurs d'éclairement sur la chaussée : ainsi, les niveaux d'éclairement correspondant aux seuils de visibilité déterminés par les participants étaient caractérisés, puis convertis en niveaux de luminance de chaussée selon la méthode détaillée ci-après en section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairement**. Les résultats sont présentés en Figure 2-7.

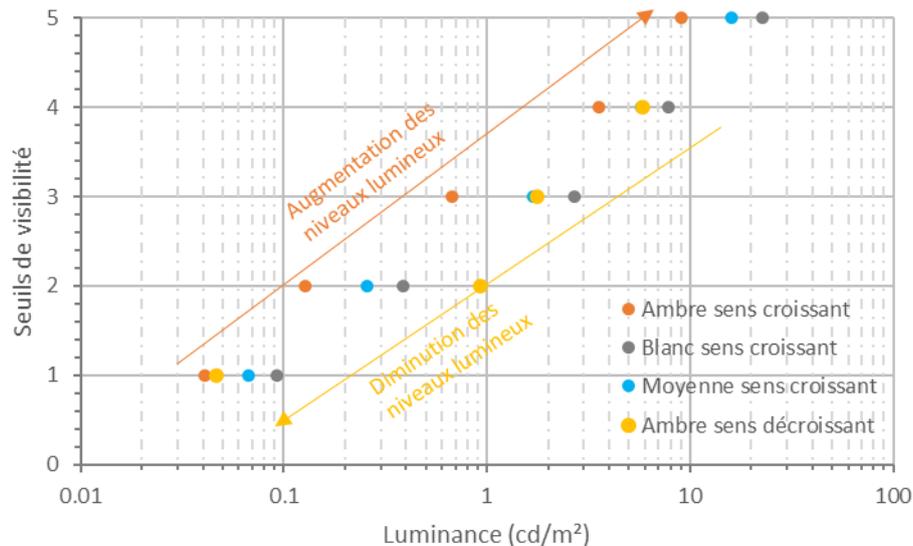


Figure 2-7 Niveaux de luminance de chaussée choisis par le panel d'expert pour caractériser les transitions d'état de visibilité de la cible pour la LED ambre et la LED blanche. Les flèches de couleur indiquent si les niveaux lumineux pour la LED ambre augmentent ou diminuent pour la série de données considérées. La série « Moyenne sens croissant » correspond à une moyenne arithmétique des résultats obtenus pour l'ambre et le blanc dans le sens croissant.

Comme mentionné en section **2.2.1.3 Influence des CGRips**, cette expérience vise à comparer les conditions de visibilité offertes par 6 spectres différents. Ces premières estimations des niveaux de luminance de chaussée nécessaires pour chaque seuil de visibilité ont donc pu être utilisées pour la conception de ces 6 spectres théoriques. La création de ces spectres s'est appuyée sur un programme d'optimisation codé sous Matlab et utilisant la fonction « fmincon ». Le programme prenait comme arguments d'entrée les distributions spectrales d'éclairage des 7 types de LEDs pour différentes valeurs de DMX, ainsi que les coordonnées trichromatiques, l'indice de fidélité des couleurs R_f et l'éclairage mélanopique souhaités pour le spectre final (le calcul de ce dernier est indiqué en équation [2-8] (CIE S 026 2018)).

$$E_{e,mel} = \int E_e(\lambda) s_{mel}(\lambda) d\lambda \quad [2-8]$$

Avec $E_{e,mel}$ l'irradiance mélanopique ($W \cdot m^{-2}$) ;

$E_e(\lambda)$ l'irradiance spectrale (=l'éclairage énergétique) mesurée ($W \cdot m^{-2}$) ;

$s_{mel}(\lambda)$ la sensibilité mélanopique relative telle que définie par la CIE (CIE S 026 2018).

Le programme testait ensuite différentes proportions d'intensité des 7 types de LEDs en cherchant à obtenir la valeur de R_f renseignée et en respectant les contraintes de coordonnées trichromatiques et d'éclairage mélanopique. Si la fonction parvenait à établir une solution à ce problème d'optimisation, elle indiquait en sortie les proportions d'intensité de chacune des LEDs nécessaires pour obtenir le spectre souhaité. Une fonction de correspondance entre ces proportions et les valeurs DMX correspondantes permettait de recréer le spectre avec les COBs, ce dernier étant associé à une valeur d'éclairage définie.

Le système ne disposait pas d'un canal d'intensité général et les gradations ascendantes et descendantes ont du par conséquent être réalisées de manière discrète (par paliers). Deux choix s'offraient alors à nous pour satisfaire cette contrainte :

- Recréer un spectre spécifique à l'aide du programme d'optimisation pour chacun des paliers d'éclairage choisis ;
- Créer un spectre de référence à un niveau de luminance donné (converti ensuite en éclairage), récupérer les proportions d'éclairage apportées par chacun des 7 types de LEDs et utiliser la fonction de correspondance entre éclairage et valeurs DMX pour recréer les spectres à différents paliers d'éclairage.

C'est finalement la deuxième méthode qui a été retenue, notamment par souci de temps et également pour éviter le risque que le programme d'optimisation propose des spectres totalement différents entre le palier minimum et le palier maximum. En effet, notre objectif étant de caractériser l'impact du spectre sur la visibilité, il est nécessaire que la distribution spectrale reste sensiblement la même tout au long d'une gradation.

Le choix du niveau de luminance pour le spectre de référence s'est appuyé sur les résultats des tests pilotes. La valeur de 1 cd/m^2 a été retenue au vu des valeurs obtenues pour le seuil 3 sur la gradation ascendante et pour les seuils 2 et 3 sur la gradation descendante (Seuils intermédiaires). Cette approximation nous assure que les décalages éventuels du spectre seront peu marqués pour les seuils proches du seuil intermédiaire et les données collectées seront donc moins susceptibles d'être faussées. Le programme d'optimisation fonctionnant avec des valeurs d'éclairage, la valeur de luminance de 1 cd/m^2 a donc été convertie en éclairage en utilisant la loi de Lambert (la méthode détaillée est présentée ci-après en section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairage**). La valeur d'éclairage finalement retenue pour la création du spectre de référence sous Matlab est ainsi de 36.4 lux. 6 spectres de référence ont donc été conçus, puis les autres paliers d'éclairage ont été déduits à partir de la proportion d'éclairage de chacun des 7 types de LEDs dans le mélange de référence. Une fois ces proportions déterminées, elles peuvent être appliquées pour n'importe quels paliers d'éclairage, ces derniers ne devaient donc pas nécessairement être établis d'emblée.

Ainsi, le choix final des paliers d'éclairage est venu plus tard et sera donc détaillé en section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairage**.

Une fois tous ces spectres théoriques établis, des vérifications pratiques ont dû être réalisées afin de s'assurer que la mise en application se conformait aux données tirées du programme d'optimisation.

2.2.2.5 Choix de la méthode et des spectres

Plusieurs spectres différents sont utilisés afin de répondre aux objectifs de recherche que l'on s'est fixés. L'influence du spectre sur la visibilité devant être caractérisée, les autres facteurs pouvant impacter cette dernière doivent varier le moins possible d'un stimulus à l'autre.

Comme on l'a vu dans la section précédente, le choix de la méthode retenue a porté sur une échelle d'estimation de visibilité comportant différents seuils de visibilité que l'observateur devait caractériser. Pour rappel, 6 spectres différents ont été conçus pour cette expérimentation. 3 d'entre eux sont des spectres « classiques » pouvant être rencontrés en tunnel ou en éclairage routier traditionnel, les 3 autres sont des métamères permettant d'étudier l'impact des CGRips sur la visibilité. On appelle « Low Mela » ou LM les spectres excitant peu la mélanopsine et « High Mela » ou HM les spectres excitant fortement la mélanopsine. On rappelle les 6 spectres finaux utilisés dans l'expérience :

- Un spectre de LED à 5000K « Low Mela » ;
- Un spectre de LED à 5000K « High Mela » ;
- Un spectre de LED à 3000K « Low Mela » ;
- Un spectre de LED à 3000K « High Mela » ;
- Un spectre de SHP (LED à 2000K en pratique) « Low Mela » ;
- Un spectre de SHP (LED à 2000K en pratique) « High Mela ».

La méthode de calibrage de ces spectres est présentée en section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairage**.

Les spectres sont définis pour différentes intensités lumineuses. En pratique, un stimulus soumis aux observateurs consiste en une gradation d'un spectre de niveaux de luminance faibles vers des niveaux élevés, ou inversement. Une échelle de visibilité, présentée en Tableau 2-2 est donnée à l'observateur au début de l'expérience et doit lui servir de référence tout au long de la procédure. Cette échelle comporte différents seuils de visibilité allant du seuil 1 « Cible juste perceptible », jusqu'au seuil 5 « Très bonne visibilité de la cible ». Comme expliqué en section **2.2.2.3 Détermination de l'échelle de visibilité**, le choix de ces seuils s'est fait en se basant sur des études précédentes, et a été confirmé suite aux tests pilotes réalisés avec les chercheurs du laboratoire.

En pratique, une cible est associée à une gradation. En prenant l'exemple d'une montée, lorsque cette dernière démarre, le moteur appliquera la rotation nécessaire pour que la cible voulue soit placée à l'intérieur du tunnel. Cette cible ne changera pas avant que la montée ne soit terminée. De la même manière, une cible est assignée à chaque descente et ne change pas avant que cette dernière ne se termine. Afin de limiter les biais liés à la forme de la cible, et étant donné que les résultats par spectre seront à terme moyennés sur la montée et la descente, une même forme est assignée pour les montées et les descentes présentant le même spectre. Ainsi, si le sujet 3 voit l'étoile pour le spectre 5000K HM en montée, alors la descente sur le spectre 5000K HM sera également associée à l'étoile. La présentation des formes de cibles en fonction des spectres est contrebalancée sur l'ensemble des observateurs afin de limiter l'impact de la forme de la cible sur les résultats.

A l'origine, chaque observateur était censé voir 6 montées et 6 descentes (une montée et une descente pour chaque spectre), mais nous avons apporté deux modifications à ce postulat de base : l'ajout d'une montée sans cible pour chaque observateur, ainsi que l'ajout à la toute fin

de l'expérience d'une montée répétitive qui est exactement la même que la première montée avec cible vue par l'observateur. La première modification permet de vérifier que l'observateur n'indique pas détecter un objet quand il n'y a rien dans le tunnel. La deuxième modification permet de tester la cohérence des résultats entre le début et la fin de l'expérience, et de mettre éventuellement en exergue un effet d'entraînement ou de fatigue. On peut ainsi déterminer si les résultats d'un observateur peuvent être reproduits. L'observateur voyait donc 8 montées et 6 descentes pendant l'expérience en elle-même, et à ces 14 stimuli venaient s'ajouter une montée et une descente d'entraînement jouées avant le début de l'expérimentation pour familiariser l'observateur avec la procédure. Cette montée et cette descente d'entraînement étaient réalisées avec la LED blanche des COBs pour des niveaux de luminance sensiblement identiques à ceux utilisés dans l'expérience.

L'ordre de passage des différentes gradations est contrebalancé afin que chaque observateur voie ces stimuli dans un ordre différent et que les biais associés soient ainsi limités, tout en gardant la contrainte de commencer par une montée pour chaque observateur et d'alterner une montée et une descente, comme mentionné précédemment. Cette précaution permet d'assurer à la fois une meilleure adaptation aux niveaux de luminance et une meilleure adaptation chromatique avant de débiter un autre stimulus. En effet, une fois une gradation ascendante complétée et donc l'œil de l'observateur adapté aux conditions lumineuses du maximum d'intensité d'un spectre, il suffit de passer au maximum d'un autre spectre, qui présente les mêmes niveaux de luminance que le précédent, et seule une période d'adaptation chromatique est nécessaire avant d'entamer la gradation descendante pour ce nouveau spectre. Cette descente s'achève dans le noir et, après une période d'adaptation au noir, un nouveau spectre peut être présenté sous forme de montée. Cet enchaînement se poursuit jusqu'à ce que l'observateur ait vu les 6 montées et les 6 descentes originales de l'expérience, ainsi que la montée sans cible. Il se termine par une montée, après laquelle la dernière montée de l'expérience (copie de la première montée avec cible) est jouée. On a ainsi caractérisé les 5 seuils de visibilité de l'échelle pour chacun des 6 spectres, une fois en gradation ascendante et une fois en gradation descendante, ce qui permet de limiter les biais liés au fait que l'adaptation de l'œil ne se fait pas de la même façon lorsque les niveaux lumineux augmentent que lorsqu'ils diminuent. On a également testé le fait que l'observateur ne se trompe pas sur la détection de l'objet avec la montée sans cible, et on a finalement investigué un éventuel impact de l'entraînement ou de la fatigue avec la dernière montée répétitive.

2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairement

La contrainte imposée par une telle expérience pour les gradations des spectres est que ces derniers doivent parcourir exactement les mêmes plages de luminance afin d'éliminer l'influence de ce paramètre dans les résultats et de ne considérer que l'impact spectral. En pratique, les réglages ont été effectués sur la base de l'éclairement énergétique mesuré sur la chaussée devant la cible. La tête diffusante du spectroradiomètre était passée à travers un

regard de visite pratiqué à travers la chaussée et se trouvait donc juste devant la cible, au même niveau que la surface de la route (Figure 2-8 (2)). La position de mesure correspond à celle du point P dans la Figure 2-5.

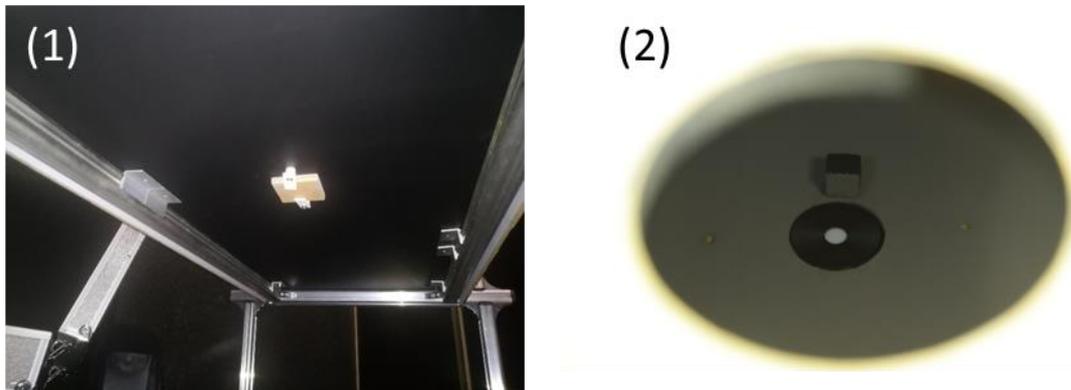


Figure 2-8 (1) Vue du dessous de la maquette, position de mesure du spectroradiomètre bouchée par le substitut en medium utilisé pendant les expériences ; (2) Vue de l'intérieur de la maquette depuis un orifice pratiqué dans le plafond, tête du spectroradiomètre équipée de son diffuseur et placée au niveau de la chaussée (point P) pour réaliser des mesures

La conversion des valeurs d'éclairement énergétique en niveaux de luminance énergétique s'est faite en utilisant la loi de Lambert en première approximation, rappelée en équation [2-4], les facteurs de réflexion spectraux des différentes surfaces ayant été préalablement calculés (voir section **2.2.2.1 Maquette**). Une fois ces luminances énergétiques déterminées, la valeur de luminance photopique associée est calculée grâce à l'équation [2-9].

$$L = K_m \int_{380}^{780} L_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad [2-9]$$

Avec K_m l'efficacité lumineuse spectrale maximale, prise égale à 683 lm.W^{-1} ici puisqu'on s'intéresse à des grandeurs photopiques ;

$L_e(\lambda)$ la radiance pour une longueur d'onde λ donnée ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$) ;

$V(\lambda)$ la fonction de sensibilité relative spectrale photopique établie par la CIE.

En ce qui concerne les plages de luminance retenues pour les gradations des spectres, l'objectif était de couvrir les valeurs de luminance pouvant être typiquement observées par les conducteurs en section courante de tunnel, que ce soit en conditions diurnes ou en conditions nocturnes. Le minimum théorique a été fixé à 0 cd/m^2 et le maximum théorique a été choisi en prenant les possibilités maximales que nous offraient les LEDs pour tous les spectres de l'expérience. L'objectif recherché était d'atteindre les niveaux de luminance de chaussée maximaux recommandés par les organismes normatifs (CIE, CEN, CETU), à savoir 15 cd/m^2 (CEN 2006).

L'utilisation des COBs ne nous permettait pas d'avoir un canal d'intensité générale. Ainsi, les variations d'intensité pour un même spectre devaient faire l'objet d'un recalcul des proportions de LEDs nécessaires. Il était donc impossible de grader les spectres de manière

continue. Le choix a donc été fait de réaliser cette gradation par paliers. En pratique, les 6 spectres ont tout d'abord été créés pour donner un éclairage de 36.4 lux (arrondi à 37 lux) au niveau du point de référence P (voir section **2.2.2.4 Tests pilotes et création des spectres théoriques**). Le spectre 2000K LM a été conçu en essayant d'obtenir les coordonnées trichromatiques d'un corps noir à 2000 K ($X=47.2$, $Y=37.0$, $Z=5.3$), un indice de fidélité des couleurs R_f (CIE 224 2017) de 25 (typique d'une source SHP), et une irradiance mélanopique la plus faible possible (voir équation [2-8]). Les spectres 3000K LM et 5000K LM ont été conçus pour obtenir les coordonnées trichromatiques de corps noirs à 3000 K ($X=40.0$, $Y=37.0$, $Z=14.6$) et 5000 K ($X=36.3$, $Y=37.0$, $Z=31.9$) respectivement, un R_f de 70 (typique de LEDs blanches utilisées en tunnel), et une irradiance mélanopique la plus faible possible. 2000K HM, 3000K HM et 5000K HM ont été créés pour obtenir les mêmes coordonnées trichromatiques et les mêmes indices de rendu des couleurs que leur équivalent LM, mais une irradiance mélanopique la plus élevée possible. Comme mentionné précédemment, la fonction « fmincon » permettait de trouver la fraction de puissance des 7 puces de couleur des LZ7 à utiliser pour produire le spectre satisfaisant les contraintes énoncées ci-dessus. On a ainsi pu récupérer la contribution théorique de chaque puce à l'irradiance totale du spectre considéré (Tableau 2-3).

Tableau 2-3 Contribution théorique de chaque puce de couleur à l'irradiance totale des 6 spectres

Spectres	Violet	Blanc 6500K	Bleu	Cyan	Vert	Ambre	Rouge
2000K LM	38.7%	2.0%	0.3%	0.4%	8.8%	42.3%	7.5%
2000K HM	33.5%	0.0%	0.0%	0.0%	17.9%	0.7%	47.8%
3000K LM	16.7%	7.8%	6.7%	2.7%	22.0%	32.8%	11.2%
3000K HM	1.9%	22.7%	0.9%	27.4%	2.7%	15.7%	28.7%
5000K LM	55.4%	23.6%	2.4%	1.2%	7.5%	2.9%	7.2%
5000K HM	20.2%	12.1%	9.4%	29.5%	1.0%	14.6%	13.2%

Ensuite pour chacun des spectres de l'expérience, nous avons testé l'éclairage maximum atteignable en gardant à peu près constantes les contributions de chacune des puces de couleur (afin de conserver une distribution spectrale identique). Le minimum de ces 6 éclairages maximaux a été retenu comme le niveau maximal auquel les 6 spectres seraient présentés aux observateurs. Les 6 spectres au niveau d'éclairage maximal (~410 lux au point P) sont présentés en Figure 2-9. Le Tableau 2-4 donne les TC (Températures de couleur), X , Y , Z , x , y , R_f et $E_{e,mel}$ (irradiance ou éclairage mélanopique) des 6 spectres pour cet éclairage maximal. L'irradiance mélanopique est donnée par l'équation [2-8] (CIE S 026 2018). Les expressions de X , Y , Z , x et y sont rappelées en équations [2-10], [2-11], [2-12], [2-13] et [2-14]. Enfin, la Figure 2-10 montre le rendu visuel à l'intérieur de la maquette pour chacun de ces spectres au palier d'éclairage maximum.

$$X = K_m \int E_e(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad [2-10]$$

$$Y = K_m \int E_e(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad [2-11]$$

$$Z = K_m \int E_e(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad [2-12]$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad [2-13]$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad [2-14]$$

Avec $E_e(\lambda)$ l'éclairement énergétique pour une longueur d'onde donnée ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) ;

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ les fonctions colorimétriques de l'observateur CIE 1931 de référence. Elles sont présentées en **annexe E : Fonctions colorimétriques de l'observateur CIE 1931 de référence**.

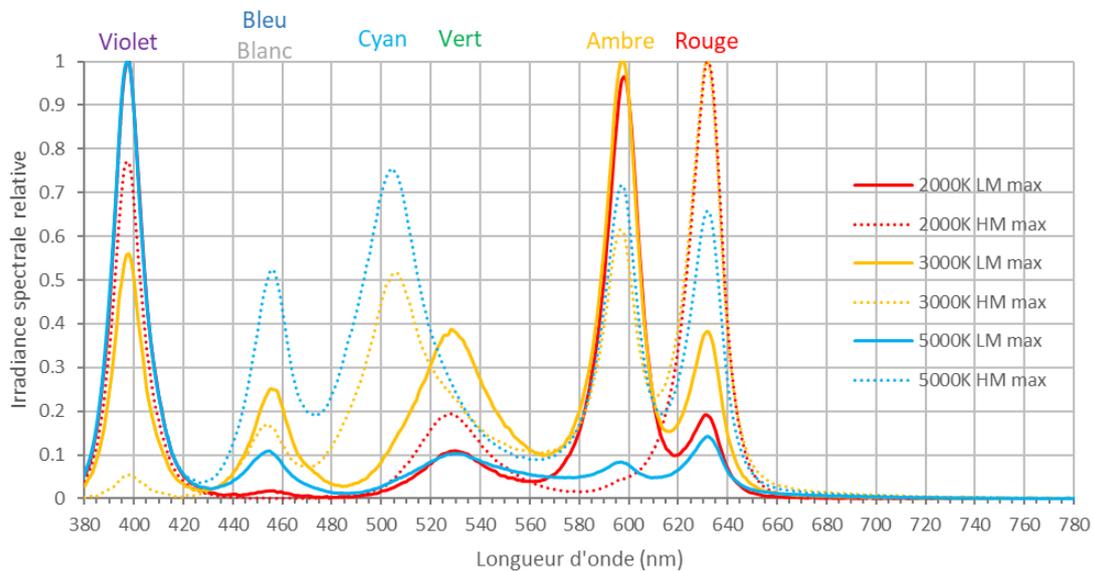


Figure 2-9 Irradiance spectrale relative des 6 spectres à leur niveau maximal (#45), mesuré sur la chaussée, devant la cible (point P)

Tableau 2-4 TC, X, Y, Z, x, y, R_f et $E_{e, mel}$ pour les 6 spectres à leur niveau maximal (#45) calculés à partir de l'irradiance spectrale mesurée sur la route, devant la cible (point P)

Spectres	TC (K)	X (lm/m^2)	Y (lux)	Z (lm/m^2)	x	y	R_f	$E_{e, mel}$ (mW/m^2)
2000K LM	1878	541.6	408.2	64.9	0.534	0.402	26	103
2000K HM	1976	535.5	415.7	67.3	0.526	0.408	23	213
3000K LM	3147	427.8	405.5	161.2	0.430	0.408	80	260
3000K HM	3039	443.7	410.2	171.5	0.433	0.400	64	415
5000K LM	5217	399.8	404.6	374.8	0.339	0.343	75	390
5000K HM	5172	413.3	411.4	391.4	0.340	0.338	64	643

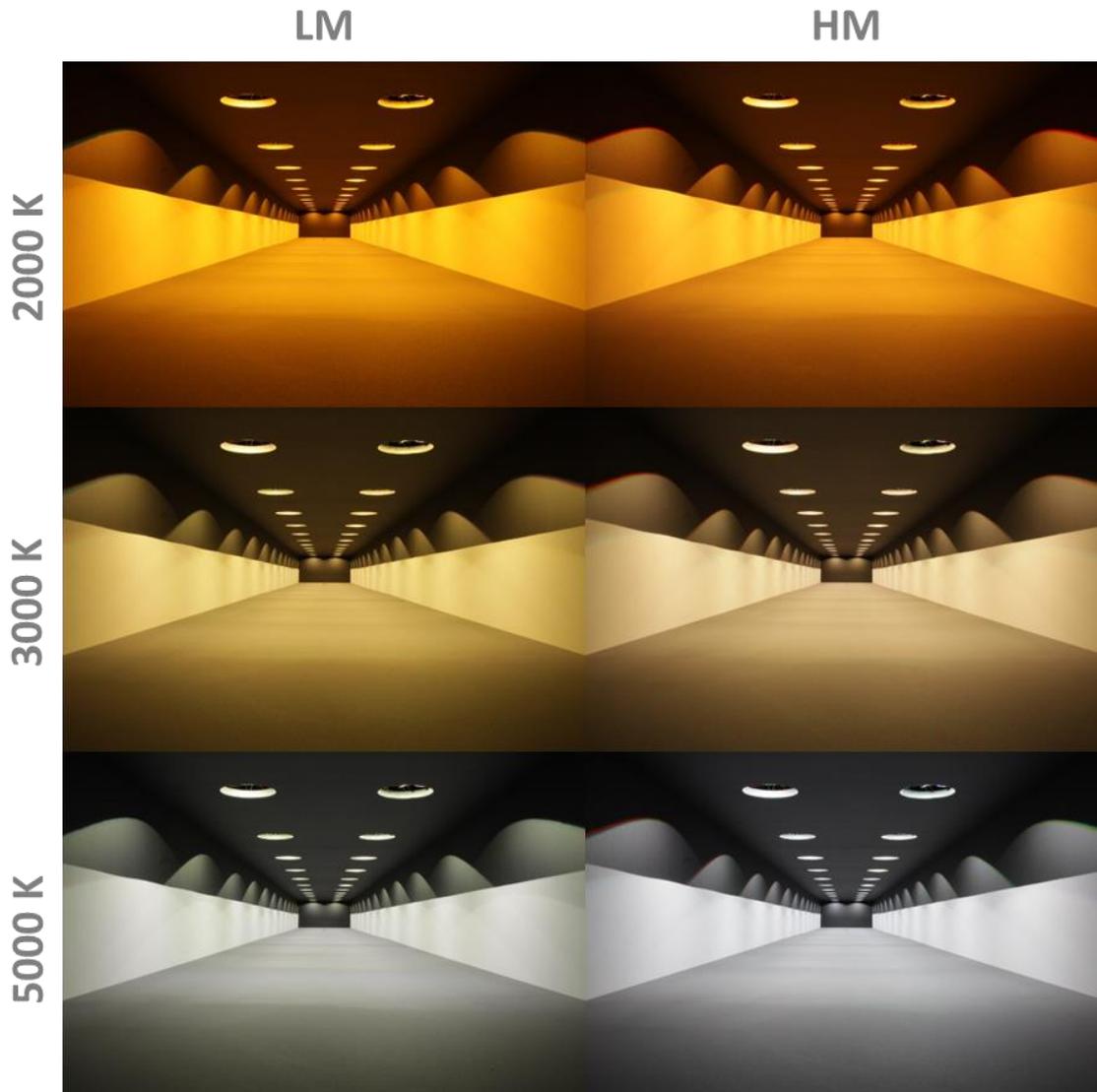


Figure 2-10 Rendu visuel des 6 spectres de l'expérience à l'intérieur de la maquette, pour le palier d'éclairage maximum

En sachant que les limites haute et basse pour l'éclairage de la chaussée étaient respectivement de 410 lux et 0 lux, nous avons ensuite créé 43 paliers d'éclairage intermédiaires définissant une échelle logarithmique entre la limite basse et la limite haute afin de concorder avec la perception du système visuel humain. En conséquence, les drivers ont été réglés sur le mode de gradation logarithmique : une augmentation linéaire des valeurs DMX correspondait à une augmentation logarithmique de l'irradiance fournie par la puce correspondante. La contribution relative de chaque puce pour un spectre donné (Tableau 2-3) a été gardée constante et leur irradiance individuelle a été ajustée afin d'atteindre le niveau d'éclairage requis pour le palier considéré. Ensuite, les 45 paliers d'éclairage de chaque spectre ont été reproduits dans la maquette et ont fait l'objet d'une mesure d'irradiance spectrale au niveau du point P à l'aide du spectroradiomètre. Les coordonnées trichromatiques X, Y, Z, ainsi que l'indice de fidélité des couleurs R_f ainsi obtenus par la

mesure ont été confrontés à leurs valeurs attendues. Si besoin, les réglages DMX ont été ajustés de 1 ou 2 unités afin d'obtenir des valeurs plus proches de celles théoriques. Le Tableau 2-5 présente pour chaque spectre les moyennes et les écarts-types obtenus sur les 45 paliers d'éclairage pour les paramètres « constants » qui caractérisent les 6 spectres : la température de couleur, x , y , R_f et les ratios S/P (le calcul est rappelé en équation [2-15]). L'irradiance mélanopique varie de 0 au palier 1 à la valeur indiquée dans le Tableau 2-4 pour chaque spectre pour le palier 45.

$$S/P = \frac{1699 \int E_e(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{683 \int E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad [2-15]$$

Tableau 2-5 Moyennes et écarts-types (ET) pour la température de couleur, x , y , R_f et les ratios S/P, sur tous les paliers d'éclairage de chacun des 6 spectres (mesures sur la chaussée devant la cible, au niveau du point P)

SPD	TC (K)	x	y	R_f	S/P ratio
2000K LM	1964 (ET=76)	0.534 (ET=0.009)	0.417 (ET=0.010)	32 (ET=7.0)	0.66 (ET=0.05)
2000K HM	1838 (ET=158)	0.544 (ET=0.019)	0.408 (ET=0.007)	29 (ET=4.8)	1.07 (ET=0.10)
3000K LM	2871 (ET=225)	0.444 (ET=0.011)	0.401 (ET=0.009)	71 (ET=7.8)	1.27 (ET=0.09)
3000K HM	3115 (ET=235)	0.434 (ET=0.013)	0.410 (ET=0.005)	65 (ET=3.0)	1.95 (ET=0.11)
5000K LM	4883 (ET=243)	0.348 (ET=0.007)	0.349 (ET=0.007)	78 (ET=2.2)	1.88 (ET=0.05)
5000K HM	4719 (ET=242)	0.353 (ET=0.007)	0.352 (ET=0.010)	68 (ET=3.8)	2.56 (ET=0.13)

Une fois tous les paliers d'éclairage constitués (un total de 270, pour 6 spectres déclinés chacun en 45 paliers d'éclairage), nous avons mesuré la distribution de luminance vue par les observateurs pour chacun d'entre eux. Cette mesure a été réalisée à l'aide d'un vidéophotomètre LMK-5L-5MP (SN°TTF8625, calibré l'année de l'expérience) de la marque TechnoTeam. L'appareil était placé sur un trépied à la même position que l'œil de l'observateur pendant la phase d'observation de ce dernier, et pointait en direction de la cible. Les cartes de luminance photopique produites par le LMK ont été ensuite utilisées pour calculer la luminance moyenne de la chaussée située juste devant la cible (9 pixels pris en compte, pour une zone correspondante de 20 cm²). Dans la suite, ces valeurs moyennes sont considérées comme les luminances de chaussée vues par les observateurs. Sur les 270 éclairages créés, la valeur de luminance moyenne varie de 0 à 22.7 cd/m². Cela couvre finalement plus que la plage de luminances de chaussée (1 à 15 cd/m²) recommandées par les différents organismes étudiés (CIE 88 2004; CETU 2000; CEN 2006).

2.2.2.7 Méthode de gradation et caractérisation des seuils

La gradation du spectre (ascendante ou descendante) durant le déroulement de l'expérience n'était donc pas continue mais discrète et se faisait en passant d'un palier d'éclairement à l'autre. Dans les faits, les temporisations étaient les suivantes :

- L'observateur avait une minute d'adaptation avant chaque gradation (soit au noir pour une montée, soit au niveau maximal du spectre pour une descente) ;
- Après cette minute, la gradation débutait et chaque palier d'éclairement était maintenu pendant 4 secondes avant de passer au palier suivant.

Les temporisations utilisées pendant l'expérience sont résumées en Figure 2-11.

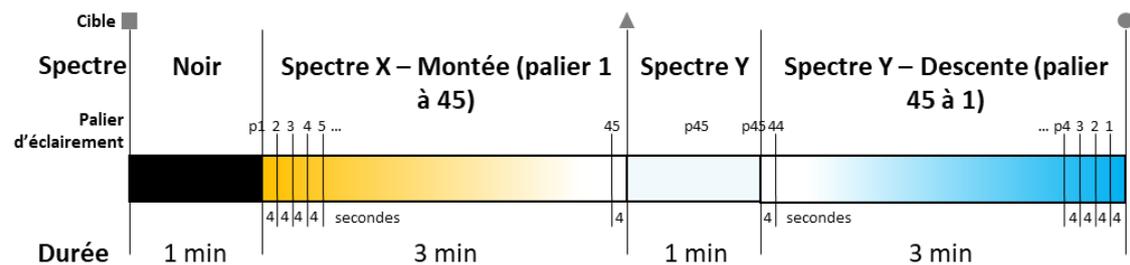


Figure 2-11 Temporisations pour un cycle de montée / descente

Lorsqu'un observateur estimait avoir franchi un des seuils de visibilité, il l'indiquait verbalement à l'opérateur qui mettait en pause la gradation en cours. Une fois la pause effectuée sur le palier d'éclairement en cours de lecture, l'observateur avait la possibilité de dire à l'opérateur si ce palier correspondait bien au seuil de visibilité qu'il était censé détecter. Si ce n'était pas le cas, l'opérateur pouvait changer manuellement de paliers (augmenter ou diminuer le niveau lumineux) jusqu'à ce que l'observateur juge avoir effectivement atteint le seuil de visibilité escompté. L'opérateur notait alors le niveau d'éclairement correspondant, ainsi que toutes remarques potentielles de l'observateur. Une fois ces données enregistrées, la gradation reprenait son cours, en rejouant entièrement le palier sur lequel l'observateur avait arrêté son choix.

2.2.2.8 Résumé du déroulement de l'expérience

L'expérience se déroulait en trois temps : l'accueil de l'observateur, l'expérience en elle-même et le compte-rendu de cette dernière.

L'accueil de l'observateur consistait à soumettre ce dernier à un test d'Ishihara, afin de s'assurer de sa bonne vision des couleurs, et à un test d'acuité visuelle (test en condition photopique à 3.5 m de distance, échelle de Parinaud pour illettrés). Tous les observateurs sollicités ont passé ces tests et aucun n'a été refusé à leur issue. Une brève description de l'expérience lui était ensuite présentée, avec une remise en contexte (éclairage pour tunnel

roucier). Enfin, un entraînement était réalisé afin de familiariser l'observateur avec la procédure. Ce test consistait en une montée et une descente de 45 paliers d'éclairément (niveaux similaires à ceux utilisés pendant l'expérience en elle-même) réalisées avec la LED blanche des COBs. La cible placée dans le tunnel pour ce test était la cible carrée.

Le déroulement de l'expérience consistait à présenter à l'observateur les 6 spectres d'étude, une fois en gradation ascendante et une fois en gradation descendante. A ces 12 stimuli venaient s'ajouter une montée sans cible et une copie de la première montée avec cible vue par l'observateur (14 stimuli au total). Afin de raccourcir l'expérience et d'assurer une adaptation de l'œil de l'observateur optimale, les gradations ascendantes et descendantes étaient alternées (exception faite de la fin de l'expérience où deux montées de suite étaient jouées). Chaque observateur devait caractériser 5 seuils de visibilité différents (rappelés en Tableau 2-2) pour chacun des 14 stimuli. Ces stimuli consistaient en un enchaînement de scénarios d'éclairage présentant sensiblement le même spectre mais des niveaux d'éclairément, et donc de luminance, différents : on parle donc de paliers d'éclairément pour un spectre. Chaque spectre comptait 45 paliers (le noir complet étant compris dedans) qui étaient identiques en gradation ascendante et descendante. Pour ce qui est des temporisations, les adaptations en début de stimulus duraient 1 minute, que ce soit pour le noir complet ou pour le niveau maximal d'un spectre, puis chaque palier durait 4 secondes.

Le compte-rendu de l'expérience visait à collecter le ressenti de l'observateur vis-à-vis de l'expérience et notamment à prendre en compte les remarques sur l'état de fatigue généré, le confort de la position, ... Les participants se voyaient également remettre un chèque cadeau d'une valeur de 15 €.

La Figure 2-12 résume schématiquement le déroulement complet de l'expérience.

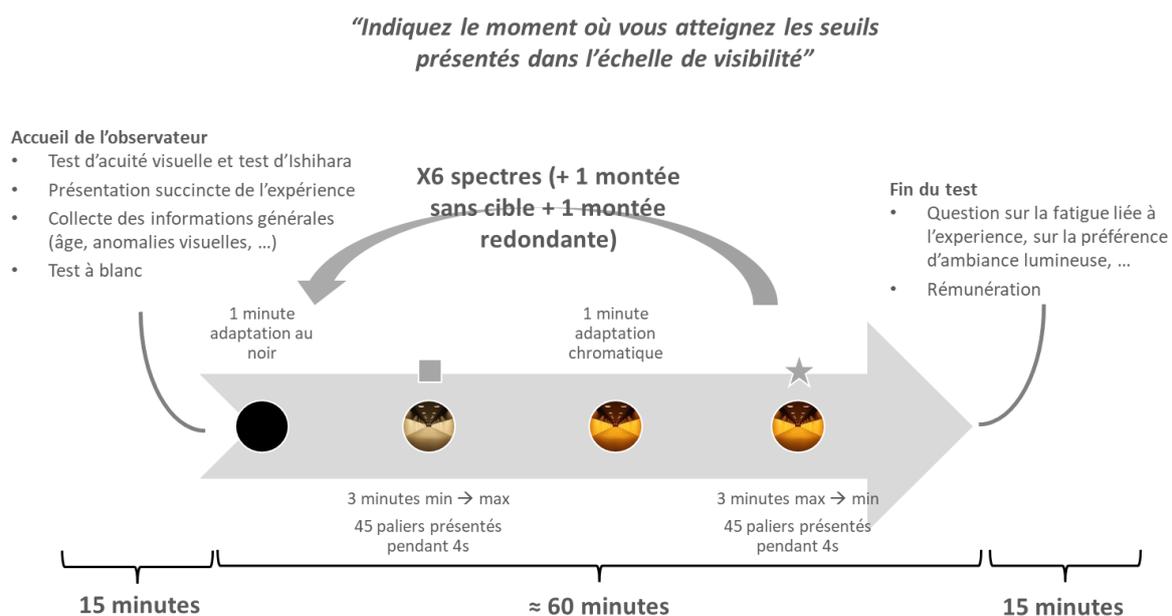


Figure 2-12 Résumé schématique du déroulement du passage d'un observateur

2.3 Résultats expérimentaux

2.3.1 Caractéristiques des observateurs

48 observateurs ont pris part à cette expérimentation (23 hommes et 25 femmes). Ces derniers étaient âgés de 19 à 29 ans (moyenne d'âge de 22.2 ans, écart-type de 2.6 ans). 31 observateurs présentaient un défaut visuel (corrigé pendant l'expérience) : 1 personne était astigmatique, 8 personnes étaient astigmatiques et myopes, 16 personnes étaient myopes et 6 personnes étaient hypermétropes. Au début de l'expérience, 17 participants ont indiqué être fatigués, 28 ont indiqué être dans un état normal, et 3 ont indiqué être particulièrement en forme.

2.3.2 Mesure et calcul du contraste cible / chaussée

Afin d'avoir une meilleure compréhension des résultats obtenus, les valeurs de contraste entre la cible et la chaussée ont été calculées selon la loi de Weber (CIE 95 1992). Les cartes de luminance produites par le LMK n'ont pas pu être utilisées pour ce calcul car la résolution de l'appareil n'était pas suffisante pour avoir une vision claire de la cible. Il a donc été décidé de calculer le contraste en appliquant la loi de Lambert à la chaussée et à la cible, du fait que ces dernières sont peintes avec une peinture mate et peuvent donc être approximées comme des surfaces diffusantes. On peut donc réécrire le contraste selon l'équation [2-16].

$$C_{int} = \left| \frac{L_{obj_{int}} - L_{f_{int}}}{L_{f_{int}}} \right| = \left| \frac{\pi L_{obj_{int}}}{\pi L_{f_{int}}} - 1 \right| = \left| \frac{\rho_{obj} E_v}{\rho_{ch} E_h} - 1 \right| \quad [2-16]$$

Avec C_{int} le contraste intrinsèque entre l'objet et son environnement de fond (ici la chaussée) ;

$L_{obj_{int}}$ la luminance de l'objet (ici la cible, $cd.m^{-2}$) ;

$L_{f_{int}}$ la luminance de l'environnement de fond (ici la chaussée, $cd.m^{-2}$) ;

ρ_{obj} le facteur de réflexion de la cible (0.231, voir section **2.2.2.1 Maquette**) ;

ρ_{ch} le facteur de réflexion de la chaussée (0.085) ;

E_v l'éclairement vertical mesuré au niveau de la cible (lx) ;

E_h l'éclairement horizontal mesuré sur la chaussée juste devant la cible au niveau du point P (lx).

Les deux éclairagements ont été mesurés en utilisant une puce AS7261 de la marque AMS montée sur un circuit imprimé. Cette puce a été choisie du fait de la taille compacte du kit complet (puce et circuit imprimé) : hauteur de 4 mm, longueur de 21 mm et largeur de 15 mm, ce qui nous a permis de la placer précisément aux endroits désirés à l'intérieur de la

maquette. La puce en elle-même permet de mesurer les coordonnées trichromatiques X, Y, Z du stimulus lumineux qui atteint son capteur. Néanmoins, elle n'a un angle d'ouverture que de 20.5°, ce qui ne permet pas de mesurer un éclairage provenant de tout un hémisphère. Pour pallier ce problème, la puce a été équipée d'un diffuseur PTFE. Ensuite, la valeur Y mesurée pour la puce (éclairage) a été confrontée à celle mesurée par le spectroradiomètre pour différents stimuli lumineux afin de calibrer le dispositif (les étapes de calibration et le résultat final obtenu sont plus amplement détaillés en **annexe F : Dispositifs de mesure**). Une fois la calibration achevée, le dispositif a été placé à l'intérieur de la maquette, tout d'abord sur la chaussée, puis à la place de la cible pour mesurer les éclairages verticaux et horizontaux. Pour un spectre donné, il n'y avait à priori pas de raison pour que la distribution de lumière à l'intérieur de la maquette change en fonction du palier d'éclairage choisi. On pouvait s'attendre néanmoins à ce que cela change légèrement d'un spectre à l'autre du fait que les différentes puces de couleur des COBs ne sont pas toutes à la même position. Ainsi, les éclairages verticaux et horizontaux ont été mesurés pour chaque spectre, seulement pour le palier d'éclairage maximal (#45). La valeur moyenne obtenue pour le contraste sur les 6 spectres était de 0.35, avec un écart-type de 0.017.

2.3.3 Caractéristiques des spectres reçus par les observateurs

Jusqu'alors, les stimuli lumineux ont été caractérisés par l'irradiance spectrale mesurée au point P sur la chaussée, ou par la luminance mesurée avec le LMK. Ces mesures nous ont permis de nous assurer que les spectres permettaient bien de couvrir les plages de luminance recommandées par les différents documents étudiés pour les sections courantes de tunnel. Cependant, les performances visuelles des observateurs sont directement impactées par les caractéristiques de la lumière atteignant leurs yeux. Ainsi, de nouvelles mesures d'irradiances spectrales ont été réalisées grâce au spectroradiomètre, mais en plaçant la tête de l'appareil dans le plan de l'œil des observateurs cette fois, et ce pour les 45 paliers d'éclairage des 6 spectres.

Ces irradiances spectrales ont été utilisées pour calculer : l'éclairage photopique reçu au niveau de l'œil ($E_{v,oeil}$), la luminance photopique équivalente uniforme de fond ($L_{v,oeil}$), le ratio S/P au niveau de l'œil (S/P_{oeil}), le coefficient d'adaptation du modèle mésopique de la CIE (m), et la luminance mésopique associée ($L_{mes,oeil}$). $L_{v,oeil}$ correspond à la luminance d'adaptation de l'observateur. Les équations [2-17] à [2-21] donnent les formules utilisées pour le calcul des variables présentées ci-dessus. Le modèle mésopique de la CIE (présenté en section **1.4.2.1 Vision mésopique** (CIE 191 2010)) décrit la fonction d'efficacité lumineuse spectrale $V_{mes}(\lambda)$, valable dans le domaine mésopique, comme une combinaison linéaire des fonctions photopique $V(\lambda)$ et scotopique $V'(\lambda)$, établissant ainsi une transition graduelle entre le domaine photopique et le domaine scotopique (équation [2-20]).

$$E_{v,oeil} = 683 \int E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad [2-17]$$

Avec $E_e(\lambda)$ l'irradiance spectrale mesurée dans le plan de l'œil de l'observateur (W.m^{-2}).

$$L_{v,oeil} = \frac{E_{v,oeil}}{\pi} \quad [2-18]$$

$$S/P_{oeil} = \frac{1699 \int E_e(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{683 \int E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad [2-19]$$

$$M(m) V_{mes}(\lambda) = m V(\lambda) + (1 - m) V'(\lambda) \quad [2-20]$$

Avec m le coefficient d'adaptation du modèle mésopique de la CIE ;

$M(m)$ est une fonction de normalisation qui permet à $V_{mes}(\lambda)$ d'atteindre une valeur maximale de 1.

Afin de calculer le coefficient d'adaptation m correspondant aux conditions de luminosité auxquelles est soumis l'observateur, le modèle CIE utilise une approche itérative, comme on l'a vu au chapitre 1. Les équations sont rappelées ci-dessous (équation [2-21]). 20 itérations ont été réalisées dans nos calculs, afin de s'assurer que le coefficient d'adaptation et la luminance mésopique atteignaient une précision de 4 décimales.

$$\begin{cases} L_{mes,oeil,n} = \frac{m_{n-1} L_{v,oeil} + (1-m_{n-1}) \frac{683}{1699} S/P_{oeil} L_{v,oeil}}{m_{n-1} + (1-m_{n-1}) \frac{683}{1699}} \\ m_n = 0.767 + 0.3334 \log(L_{mes,oeil,n}) \text{ avec } 0 \leq m_n \leq 1 \end{cases} \quad [2-21]$$

Afin de caractériser l'impact des stimuli lumineux sur chacun des 5 types de photorécepteurs, plusieurs quantités recommandées par la CIE (CIE S 026 2018) ont été calculées. Dans la suite, le terme α est générique et désigne un des types de photorécepteurs (α peut être remplacé par rh pour les bâtonnets, lc pour les cônes-L, mc pour les cônes M, sc pour les cônes S ou mel pour les CGRips). Dans un premier temps, les irradiances α -opiques ($E_{e,\alpha,oeil}$) des stimuli lumineux ont été calculées. Ensuite, les ratios entre les irradiances α -opiques et l'éclairement photopique ont également pu être obtenus, donnant ainsi les efficacités α -opiques ($K_{\alpha,v,oeil}$). Finalement, les « Daylight Efficacy Ratio » α -opiques (αDER_{oeil}) ont été calculés en divisant les efficacités α -opiques par celles de l'illuminant D65 de la CIE (les valeurs sont données par la CIE (CIE S 026 2018)).

$$E_{e,\alpha,oeil} = \int E_e(\lambda) s_\alpha(\lambda) d\lambda \quad [2-22]$$

Avec $E_{e,\alpha,oeil}$ l'irradiance α -opique (W.m^{-2}) ;

$s_\alpha(\lambda)$ la fonction de sensibilité du photorécepteur considéré (donnée par la CIE (CIE S 026 2018)).

$$K_{\alpha,v,oeil} = \frac{E_{e,\alpha,oeil}}{E_{v,oeil}} = \frac{\int E_{e,\lambda}(\lambda) s_\alpha(\lambda) d\lambda}{683 \int E_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad [2-23]$$

Avec $K_{\alpha,v,oeil}$ l'efficacité α -opique (W.lm^{-1}).

$$\alpha DER_{oeil} = \frac{K_{\alpha,v,oeil}}{K_{\alpha,v}^{D65}} \quad [2-24]$$

Avec αDER_{oeil} le « Daylight Efficacy Ratio » α -opique ;

$K_{\alpha,v}^{D65}$ l'efficacité α -opique de l'illuminant D65 ($\text{W}\cdot\text{lm}^{-1}$).

On notera qu'il existe une relation linéaire simple entre $rhDER$ et le ratio S/P.

$$\alpha DER_{oeil} = \frac{S/P_{oeil}}{1699} \frac{1}{K_{rh,v}^{D65}} = 0.406 S/P_{oeil} \quad [2-25]$$

Avec $K_{rh,v}^{D65}$ l'efficacité rhodopique de l'illuminant D65 ($1.4497\text{e-}3 \text{ W}\cdot\text{lm}^{-1}$).

2.3.4 Traitement des résultats

2.3.4.1 Organisation des données

Les résultats de cette expérience psycho-visuelle sont présentés sous forme de variables dans un tableau. Chaque ligne de ce tableau désigne une observation, c'est-à-dire les résultats obtenus pour une montée ou une descente. La première variable est intitulée « Sujet » et indique le numéro associé à l'observateur considéré. La seconde est la variable « Mélanopsine » et indique si le spectre est de type « High Mela » (forte excitation mélanopique) ou « Low Mela » (faible excitation mélanopique). La troisième est appelée « Température de couleur » et peut prendre les valeurs 2000K, 3000K ou 5000K. La quatrième est la variable « Montée / Descente » et indique si le spectre a été vu en gradation ascendante ou descendante. La cinquième variable est intitulée « Cible » et précise la nature de la forme de la cible placée dans le tunnel pendant l'observation. Enfin, les 5 dernières variables sont appelées respectivement « Seuil 1 », « Seuil 2 », « Seuil 3 », « Seuil 4 » et « Seuil 5 » et indique, pour chacune d'elle, le numéro du palier d'éclairement pour lequel l'observateur a atteint le seuil de visibilité considéré.

Ce fichier ne peut être exploité en l'état pour produire des statistiques sur les résultats et pour analyser la significativité de l'impact des différentes variables. En effet, les luminances de chaussée ou les niveaux d'éclairement pour un palier donné ne sont pas exactement les mêmes en fonction du spectre considéré et en associant le même numéro de palier indépendamment des spectres, on fausse les résultats de l'analyse statistique.

L'objectif a donc été dans un premier temps de convertir les numéros de paliers obtenus comme résultats en valeurs de luminance de chaussée devant la cible. Pour ce faire, les valeurs collectées à partir des mesures effectuées avec le LMK ont été utilisées (voir section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairement**).

2.3.4.2 Analyse statistique

Modalités d'analyse

Pour conduire cette analyse statistique, nous nous sommes appuyés sur un modèle mixte (χ^2 de type II de Wald) (Knoblauch et Maloney 2012), qui nous a permis d'évaluer la significativité de l'impact des différentes variables sur la valeur de luminance de chaussée à laquelle les seuils de visibilité ont été atteints par les observateurs. Un test post hoc de Tukey a ensuite été mené pour investiguer la significativité des écarts de résultats constatés entre deux modalités d'une même variable. Les éléments présentés ci-dessus nous ont donc permis d'établir la significativité de l'impact d'une variable sur les résultats obtenus, ils ne nous ont cependant pas permis de déterminer si l'impact en question était fort ou faible. La taille d'effet est l'indicateur qui nous a permis de répondre à cette question, en désignant « à quel degré un phénomène donné est présent dans la population » (Iodice 2020). Les deux analyses étaient donc complémentaires : on a identifié les variables ayant un impact significatif sur les résultats dans un premier temps, puis on a caractérisé la force de cet impact dans un second temps. La taille d'effet est analysée selon deux approches dans la suite. Une première approche consiste à considérer une taille d'effet globale représentant le pourcentage de variabilité des données expliqué par le modèle. L'indice global permettant de caractériser la taille d'effet utilisé dans cette analyse statistique est le Ω^2 de Xu (Xu 2003). La seconde approche est de détailler la taille d'effet de chaque variable, à partir des données de chacun des stimuli présentant les modalités de cette variable (pour chaque modalité des autres variables). Par exemple, la taille d'effet de la variable A est calculée à partir des sous-échantillons de données d'évaluation des modalités A1 et A2, pour une modalité fixée B1 de la variable B (Iodice 2020). L'indice de taille d'effet utilisé ici est le d de Cohen (Cohen 1988), dont le Tableau 2-6 donne la signification des valeurs trouvées.

Tableau 2-6 Correspondance entre valeur calculée du d de Cohen et taille d'effet

Taille d'effet	d
Très faible	0.01
Faible	0.20
Moyen	0.50
Important	0.80
Très important	1.20
Immense	2.0

L'analyse statistique a été menée avec le logiciel R.

En pratique, une analyse statistique a été menée pour chaque seuil de visibilité : la variable « Seuil » était la variable à expliquer, les variables « Température de couleur », « Montée /

Descente » et « Mélanopsine », ainsi que les variables d'interaction associées, étaient les variables explicatives à effets fixes, et la variable « Sujet » était la variable explicative à effets aléatoires. La variable « Cible » n'était pas utilisée dans l'analyse étant donné qu'il s'agissait simplement d'une variable de contrôle. Comme mentionné précédemment, les cartes de luminance obtenues grâce au LMK ont été utilisées pour convertir les numéros des paliers d'éclairage en luminance de chaussée. En pratique, l'objectif était que les fichiers de données exploités dans l'analyse statistique présentent deux observations par spectre et par sujet (une observation en montée et une observation en descente). Ainsi, Les montées sans cible n'étaient pas présentées dans ces fichiers et étaient traitées indépendamment. De plus, deux méthodes différentes ont été utilisées pour exploiter les données issues de la dernière montée redondante présentée à chaque observateur. Dans une première analyse statistique, les données présentées pour le spectre correspondant à la dernière montée redondante vue par l'observateur, consistaient en une moyenne des valeurs obtenues sur la première montée avec cible vue par l'observateur et la dernière (pour rappel : même spectre et même cible). Dans une seconde analyse, seules les données obtenues pour la dernière montée redondante étaient conservées dans le fichier de traitement final pour le spectre correspondant : les données de la première montée avec cible n'étaient pas prises en compte. Pour exemple : si la première montée vue par le sujet 3 était le spectre 5000K HM pour la cible ronde, alors la dernière montée était exactement la même. Dans la première analyse, une valeur moyenne entre la première et la dernière montée était prise en compte pour chaque seuil de visibilité et indiquée dans le fichier sur la ligne sujet 3 / 5000K / HM / montée. Dans la deuxième analyse, seules les valeurs collectées pour la dernière montée étaient indiquées sur cette ligne. Ces deux analyses ont donné des résultats identiques en termes de significativité d'impact des différentes variables, ainsi qu'en termes de tailles d'effet de ces mêmes variables. Les résultats présentés ci-après sont ceux correspondant à la deuxième analyse (suppression des données de la première montée avec cible dans le fichier final) : cette analyse nous a semblé plus justifiée du fait que les données obtenues pour la première montée avec cible chez certains observateurs semblaient incohérentes par rapport au reste des résultats que ces derniers ont donné par la suite. Cette observation était particulièrement vraie pour les sujets ayant eu du mal à détecter les différents seuils de visibilité lors de la phase d'entraînement. Il est probable que ceux-ci aient finalisé leur compréhension de l'expérience lors de la première montée et que les résultats ainsi obtenus ne soient pas nécessairement fiables. Encore une fois, le choix de la méthode d'analyse n'influe pas sur les résultats obtenus en termes de significativité et de taille d'effet.

Résultats de l'analyse

Dans un premier temps, nous avons examiné les données qui permettent de vérifier la cohérence des réponses des observateurs, c'est-à-dire les résultats obtenus pour les montées sans cible, et ceux obtenus pour les deux montées répétitives (même spectre, même cible, la première est présentée au tout début de l'expérience, la seconde est présentée à la toute fin).

En ce qui concerne les montées sans cible, les observateurs n'ont fait aucune erreur et n'ont donc jamais indiqué avoir détecté un objet alors qu'il n'y avait rien. Pour ce qui est des deux montées répétitives, pour chaque observateur et chaque seuil de visibilité, nous avons comparé le niveau de luminance choisi par l'observateur lors de la première montée et celui choisi lors de la seconde montée. En pratique, le calcul mené a été le suivant :

$$E_{1 \rightarrow 2} = \frac{|L_2 - L_1|}{L_1} \times 100 \quad [2-26]$$

Avec $E_{1 \rightarrow 2}$ le pourcentage d'écart entre le niveau de luminance choisi par l'observateur lors de la montée 1 (montée au début de l'expérience) et celui choisi lors de la montée 2 (montée à la fin de l'expérience) pour un seuil de visibilité donné ;

L_2 le niveau de luminance choisi par l'observateur lors de la montée 2 pour un seuil de visibilité donné (cd.m^{-2}) ;

L_1 le niveau de luminance choisi par l'observateur lors de la montée 1 pour un seuil de visibilité donné (cd.m^{-2}).

Ensuite, pour chaque observateur, nous avons calculé la valeur moyenne des écarts obtenus sur les 5 seuils de visibilité. Sur les 48 observateurs sollicités pour l'expérience, la valeur moyenne obtenue est de -10.4% et son écart-type est de 33.8%, menant à un intervalle de confiance à 95% de [-20%, -0.8%]. Cela montre que, à la fin de l'expérience, probablement à cause d'un effet d'entraînement, les observateurs ont atteint un seuil de visibilité donné à un niveau de luminance plus faible d'en moyenne 10% par rapport au début de l'expérience. Cela fait partie de l'effet d'ordre identifié par la CIE (CIE 212 2014), que nous avons limité en présentant les spectres dans un ordre contrebalancé. Comme on l'a vu plus haut, seuls les résultats obtenus sur la deuxième montée répétitive ont été pris en compte dans la suite de l'analyse.

Tous les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 2-7 et le Tableau 2-8. Les cases gris foncé indiquent que le test post hoc n'est pas pertinent pour la variable considérée, ou que la p-value obtenue n'indique pas un impact significatif sur les résultats.

Tableau 2-7 Variables ayant un impact sur le niveau de luminance de chaussée sélectionné par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité (p-value < 0.001 (***) et p-value < 0.01 (**))

Seuil de visibilité	Variable	Significativité du modèle mixte (p-value)	Comparaisons du test post hoc	Significativité du test post hoc (p-value)	
Seuil 1	Température de couleur	2.02e-05 (***)	2000 K – 3000 K	8e-03 (**)	
			2000 K – 5000 K	<1e-04 (***)	
			3000 K – 5000 K	0.26	
Seuil 2	Température de couleur	4.03e-05 (***)	2000 K – 3000 K	4.5e-03 (**)	
			2000 K – 5000 K	<1e-04 (***)	
			3000 K – 5000 K	0.48	
Seuil 3	Température de couleur	5.68e-03 (**)	2000 K – 3000 K	0.11	
			2000 K – 5000 K	4.4e-03 (**)	
			3000 K – 5000 K	0.47	
Seuil 4	Température de couleur	0.13	2000 K – 3000 K	0.32	
			2000 K – 5000 K	0.12	
			3000 K – 5000 K	0.85	
Seuil 5	Température de couleur	0.85	2000 K – 3000 K	0.90	
			2000 K – 5000 K	0.86	
			3000 K – 5000 K	1.00	
Seuil 1	Montée / Descente	2.73e-06 (***)			
			Mélanopsine	0.47	
Seuil 2	Montée / Descente	5.61e-08 (***)			
			Mélanopsine	0.21	
Seuil 3	Montée / Descente	1.68e-10 (***)			
			Mélanopsine	0.66	
Seuil 4	Montée / Descente	1.73e-05 (***)			
			Mélanopsine	0.60	
Seuil 5	Montée / Descente	3.33e-12 (***)			
			Mélanopsine	0.25	

Tableau 2-8 Omega 2 de Xu et d de Cohen calculés pour les variables et les modalités ayant un impact significatif sur les niveaux de luminance de chaussée sélectionné par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité

Seuil de visibilité	Taille d'effet globale (Omega 2 de Xu)	Comparaisons des modalités	Taille d'effet pour chaque comparaison (d de Cohen)
Seuil 1	0.722	Montées – Descentes	0.14 (effet très faible)
		2000 K – 3000 K	0.067 (effet très faible)
		2000 K – 5000 K	0.23 (effet faible)
Seuil 2	0.59	Montées – Descentes	0.12 (effet très faible)
		2000 K – 3000 K	0.048 (effet très faible)
		2000 K – 5000 K	0.19 (effet très faible)
Seuil 3	0.581	Montées – Descentes	0.27 (effet faible)
		2000 K – 5000 K	0.23 (effet faible)
Seuil 4	0.53	Montées – Descentes	0.26 (effet faible)
Seuil 5	0.499	Montées – Descentes	0.34 (effet faible)

L'analyse statistique pour le premier seuil de visibilité a montré un impact significatif des variables « Température de couleur » et « Montée / Descente » sur les résultats (p-values respectives de $2.02e-05$ et $2.73e-06$). Le test post hoc a montré une différence significative entre les résultats obtenus pour les spectres 2000 K et ceux obtenus pour les spectres de LEDs blanches (3000 K et 5000K). Néanmoins, il n'a pas montré de différence significative pour le couple 3000 K – 5000 K. La p-value associée à la comparaison 2000 K – 3000 K est $8e-03$ et celle associée à la comparaison 2000 K – 5000 K est inférieure à $1e-04$. Pour ce qui est de la taille d'effet globale, on a $\Omega^2 = 0.722$. Et enfin, en ce qui concerne les d de Cohen, pour la comparaison des modalités de la variable « Montée / Descente » on a $d=0.14$, qui traduit un effet très faible. Pour la comparaison des modalités 2000 K – 3000 K pour la variable « Température de couleur », on a $d=0.067$ qui traduit un effet très faible, et pour la comparaison 2000 K – 5000 K on a $d=0.23$ qui traduit un effet faible.

Les mêmes significativités ont été obtenues pour le deuxième seuil de visibilité (« Température de couleur », p-value= $4.03e-05$; « Montée / Descente », p-value= $5.61e-08$; 2000 K vs 3000 K, p-value = $4.5e-03$; 2000 K vs 5000 K, p-value $<1e-04$). Pour les tailles d'effet on a $\Omega^2 = 0.59$, et pour les d de Cohen, on a $d=0.12$ pour la comparaison des modalités de la variable « Montée / Descente », qui traduit un effet très faible. Pour la comparaison 2000 K – 3000 K, on a $d=0.048$ qui traduit un effet très faible, et pour la comparaison 2000 K – 5000 K on a $d=0.19$ qui traduit un effet très faible également (la limite de l'effet faible étant fixée à 0.2 dans l'interprétation des d de Cohen).

L'impact des variables « Température de couleur » et « Montée / Descente » a également été significatif pour le troisième seuil de visibilité (p-values respectives de $5.68e-03$ et $1.68e-10$). Cependant, le test post hoc n'a montré une différence significative que pour la comparaison 2000 K – 5000 K cette fois (p-value= $4.4e-03$). Il n'y avait pas d'écarts significatifs mis en évidence pour les comparaisons 2000 K – 3000 K et 3000 K – 5000 K. Pour les tailles d'effet, on a $\Omega^2 = 0.581$, et pour les d de Cohen, on a $d=0.27$ pour la comparaison des modalités de la variable « Montée / Descente », qui traduit un effet faible. Pour la comparaison 2000 K – 5000 K on a $d=0.23$ qui traduit un effet faible.

Enfin, pour les deux derniers seuils de visibilité, seule la variable « Montée / Descente » a eu un impact significatif sur les résultats obtenus (4ème seuil de visibilité, p-value= $1.73e-05$; 5ème seuil de visibilité, p-value= $3.33e-12$). Pour le quatrième seuil de visibilité, on a $\Omega^2 = 0.53$ et la comparaison des modalités de la variable donne $d=0.26$ pour les d de Cohen, valeur qui traduit un effet faible. Pour le cinquième seuil de visibilité, on a $\Omega^2 = 0.499$ et la comparaison des modalités de la variable « Montée / Descente » donne $d=0.34$ pour les d de Cohen, valeur qui traduit un effet faible également.

On constate au vu de l'analyse statistique que la variable « Mélanopsine » n'a pas montré d'impact significatif sur les résultats, et ce pour aucun des seuils des seuils de visibilité. De plus, l'analyse des résultats du test post hoc pour la variable d'interaction « Mélanopsine | Température de couleur » n'a pas montré de différence significative pour les comparaisons

des spectres LM et HM pour chaque catégorie de température de couleur (exemple : comparaison de 5000K LM et 5000K HM).

2.3.5 Interprétation des résultats

L'impact de la variable « Montée / Descente » était attendu puisque cette variable est directement liée au biais expérimental appelée « effet d'ancre » (anchor effect) identifié par la CIE dans les procédures d'ajustement (CIE 212 2014) : les valeurs de seuil sélectionnées par les observateurs sont plus faibles quand les niveaux lumineux débutent à partir d'une ancre basse (niveaux lumineux faibles), que quand ils débutent à partir d'une ancre haute. Le Tableau 2-9 illustre ce phénomène pour notre expérience : la luminance de chaussée moyenne (pour tous les spectres et tous les observateurs) pour laquelle un seuil de visibilité donné a été sélectionné par les observateurs est toujours plus faible quand les niveaux lumineux augmentent (montées) que quand ils descendent (descentes). La CIE recommande par conséquent d'utiliser une ancre haute ainsi qu'une ancre basse, et de retenir en valeur finale la moyenne obtenue pour les deux procédures, pour le seuil de visibilité étudié. C'est donc pour cette raison que les spectres ont été présentés une fois en ordre ascendant et une fois en ordre descendant. Dans la suite de l'analyse, le niveau lumineux indiqué pour un seuil de visibilité choisi par un sujet pour un spectre donné sera la moyenne des valeurs obtenues pour la montée et la descente.

Tableau 2-9 Moyennes et erreurs types (ErT) des niveaux de luminance de chaussée sélectionnés par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité, sur les 6 spectres, pour les modalités "Montées" et "Descentes" séparées, puis moyennées. Erreur type (ErT) = Ecart-type divisé par la racine carrée du nombre d'observations

Seuils de visibilité	Luminance de chaussée – moyennes et erreurs types ErT (cd/m ²)		
	Montées	Descentes	Montées et Descentes
Seuil 1	0.11 (ErT=0.007)	0.15 (ErT=0.012)	0.13 (ErT=0.007)
Seuil 2	0.36 (ErT=0.023)	0.51 (ErT=0.033)	0.43 (ErT=0.020)
Seuil 3	0.76 (ErT=0.046)	1.09 (ErT=0.061)	0.92 (ErT=0.039)
Seuil 4	1.99 (ErT=0.110)	2.48 (ErT=0.111)	2.23 (ErT=0.079)
Seuil 5	5.29 (ErT=0.255)	6.94 (ErT=0.175)	6.11 (ErT=0.158)

Le Tableau 2-10 présente, pour chaque seuil de visibilité et pour chaque spectre, les moyennes obtenues sur les montées et les descentes pour les 48 observateurs en termes de luminances de chaussée photopiques, de ratios S/P, d'éclairéments photopiques au niveau de l'œil de l'observateur, de luminances photopiques équivalentes uniformes de fond, de luminances mésopiques équivalentes uniformes de fond, de coefficients d'adaptation du modèle

mésopique de la CIE et de contrastes mésopiques de la cible (calculés à partir des valeurs de luminances mésopiques de la cible et de la chaussée).

Tableau 2-10 Valeurs moyennes caractérisant les conditions de luminosité sélectionnées par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité de chaque spectre : Luminance de chaussée photopique ($L_{v,ch}$), ratio S/P du stimulus atteignant l'œil de l'observateur (S/P_{oeil}), éclairage photopique au niveau de l'œil de l'observateur ($E_{v,oeil}$), luminance photopique équivalente uniforme de fond ($L_{v,oeil}$), luminance mésopique équivalente uniforme de fond ($L_{mes,oeil}$), coefficient d'adaptation du modèle mésopique de la CIE (m), contraste mésopique.

Seuils de visibilité	Spectres	$L_{v,ch}$ (cd/m ²)	S/P_{oeil} Ratio	$E_{v,oeil}$ (lux)	$L_{v,oeil}$ (cd/m ²)	$L_{mes,oeil}$ (cd/m ²)	Coefficient mésopique m	Contraste mésopique
Seuil 1	2000 K LM	0.11	0.61	0.045	0.014	0.010	0.10	0.336
	2000 K HM	0.10	0.97	0.035	0.011	0.011	0.11	0.326
	3000 K LM	0.13	1.15	0.059	0.019	0.021	0.21	0.328
	3000 K HM	0.14	1.77	0.049	0.015	0.023	0.22	0.312
	5000 K LM	0.16	1.68	0.036	0.011	0.017	0.17	0.303
	5000 K HM	0.14	2.22	0.063	0.020	0.033	0.27	0.286
Seuil 2	2000 K LM	0.36	0.61	0.157	0.050	0.041	0.30	0.334
	2000 K HM	0.33	0.97	0.113	0.036	0.036	0.28	0.330
	3000 K LM	0.45	1.15	0.183	0.058	0.062	0.36	0.322
	3000 K HM	0.45	1.77	0.199	0.063	0.082	0.40	0.315
	5000 K LM	0.53	1.68	0.175	0.056	0.071	0.38	0.311
	5000 K HM	0.45	2.22	0.168	0.053	0.078	0.40	0.302
Seuil 3	2000 K LM	0.83	0.61	0.331	0.105	0.091	0.42	0.333
	2000 K HM	0.80	1.03	0.304	0.097	0.098	0.43	0.326
	3000 K LM	0.92	1.15	0.360	0.115	0.120	0.46	0.323
	3000 K HM	0.96	1.77	0.384	0.122	0.150	0.49	0.321
	5000 K LM	1.06	1.71	0.399	0.127	0.153	0.50	0.313
	5000 K HM	0.98	2.25	0.397	0.126	0.171	0.51	0.307
Seuil 4	2000 K LM	2.03	0.61	0.861	0.274	0.249	0.57	0.326
	2000 K HM	2.12	1.06	0.863	0.275	0.279	0.58	0.322
	3000 K LM	2.19	1.18	0.876	0.279	0.290	0.59	0.325
	3000 K HM	2.35	1.89	0.940	0.299	0.353	0.62	0.316
	5000 K LM	2.39	1.73	0.914	0.291	0.334	0.61	0.307
	5000 K HM	2.31	2.29	0.917	0.292	0.366	0.62	0.308
Seuil 5	2000 K LM	5.91	0.61	2.567	0.817	0.776	0.73	0.329
	2000 K HM	6.14	1.07	2.499	0.796	0.803	0.74	0.325
	3000 K LM	5.72	1.19	2.388	0.760	0.779	0.73	0.326
	3000 K HM	6.56	1.86	2.636	0.839	0.922	0.76	0.319
	5000 K LM	6.32	1.77	2.451	0.780	0.853	0.74	0.315
	5000 K HM	6.03	2.31	2.418	0.770	0.889	0.75	0.313

Le Tableau 2-11 présente pour chaque spectre, les « Daylight Efficacy Ratios » α -opiques, ainsi que le ratio S/P_{oeil} calculé à partir des mesures effectuées dans le plan de l'œil de l'observateur. Par définition, ces ratios sont indépendants du niveau lumineux et caractérisent un spectre. Dans notre expérience, les spectres changent légèrement selon les paliers d'éclairage (pour exemple, le ratio S/P_{oeil} présenté dans le Tableau 2-10 change en fonction du seuil de visibilité considéré pour un même spectre). Les valeurs présentées dans

le Tableau 2-11 sont des moyennes réalisées sur les valeurs obtenues pour les 5 seuils de visibilité.

$L_{v,oeil}$ (luminance photopique équivalente uniforme de fond) est tracée en fonction de $L_{v,ch}$ (luminance de chaussée) en Figure 2-13. Les valeurs de $L_{v,ch}$ calculées sont comprises entre 0.1 et 6.6 cd/m². Comme attendu, les valeurs augmentent lorsque les performances visuelles augmentent du seuil 1 « Cible juste perceptible » au seuil 5 « Excellente visibilité de la cible ». Les valeurs de $L_{v,oeil}$ vont de 0.01 à 0.84 cd/m², soit approximativement un dixième de la luminance de chaussée, avec laquelle on a une bonne corrélation (coefficient linéaire de 0.129, R² de 0.998). Cela montre deux choses : premièrement la vision mésopique a été sollicitée à tous les seuils de visibilité, même au seuil 5 ; et deuxièmement, la luminance d'adaptation du conducteur ne devrait pas être prise égale à la luminance de chaussée (pour les distributions de luminance typiques d'une section courante de tunnel, cela revient à surestimer la luminance d'adaptation d'un facteur 10). La Figure 2-13 montre également comment les spectres ont impacté les niveaux lumineux sélectionnés par les observateurs pour chaque seuil de visibilité. Les rectangles encadrent les points obtenus pour chaque seuil de visibilité. À l'intérieur de chaque rectangle, les niveaux lumineux nécessaires pour atteindre le seuil de visibilité augmentent lorsque la température de couleur du spectre augmente : les spectres à 2000 K sont toujours associés aux luminances de chaussée les plus faibles, tandis qu'au moins un spectre 5000 K est associé à la luminance de chaussée la plus élevée. La taille des rectangles diminue graduellement du seuil 1 au seuil 5, montrant que l'influence du spectre décroît lorsque le niveau lumineux requis pour atteindre le seuil de visibilité augmente.

La Figure 2-13 illustre le résultat de l'analyse du modèle mixte pour la variable « Température de couleur » qui est la seule variable explicative ayant un impact significatif sur les seuils de visibilité, exception faite de la variable « Montée / Descentes ». Les résultats du test post hoc ont montré une différence très significative (p-value < 0.001) entre 2000 K et 5000 K pour les seuils 1 et 2, et une différence significative (p-value < 0.01) entre 2000 K et 5000 K pour le seuil 3, et entre 2000 K et 3000 K pour les seuils 1 et 2. Il n'y avait pas de différence significative entre 3000 K et 5000 K.

Tableau 2-11 « Daylight Efficacy Ratios » α -opiques et ratios S/P_{oeil} calculés à partir des mesures dans le plan de l'œil de l'observateur, pour chaque spectre

Spectres	$scDER_{oeil}$	$mcDER_{oeil}$	$lcDER_{oeil}$	$rhDER_{oeil}$	$meIDER_{oeil}$	S/P_{oeil} ratio
2000K LM	0.10	0.66	1.05	0.25	0.15	0.61
2000K HM	0.10	0.66	1.05	0.41	0.29	1.02
3000K LM	0.26	0.78	1.02	0.47	0.38	1.16
3000K HM	0.26	0.86	1.03	0.74	0.66	1.81
5000K LM	0.68	0.88	0.99	0.70	0.61	1.72
5000K HM	0.58	0.94	1.03	0.92	0.88	2.26

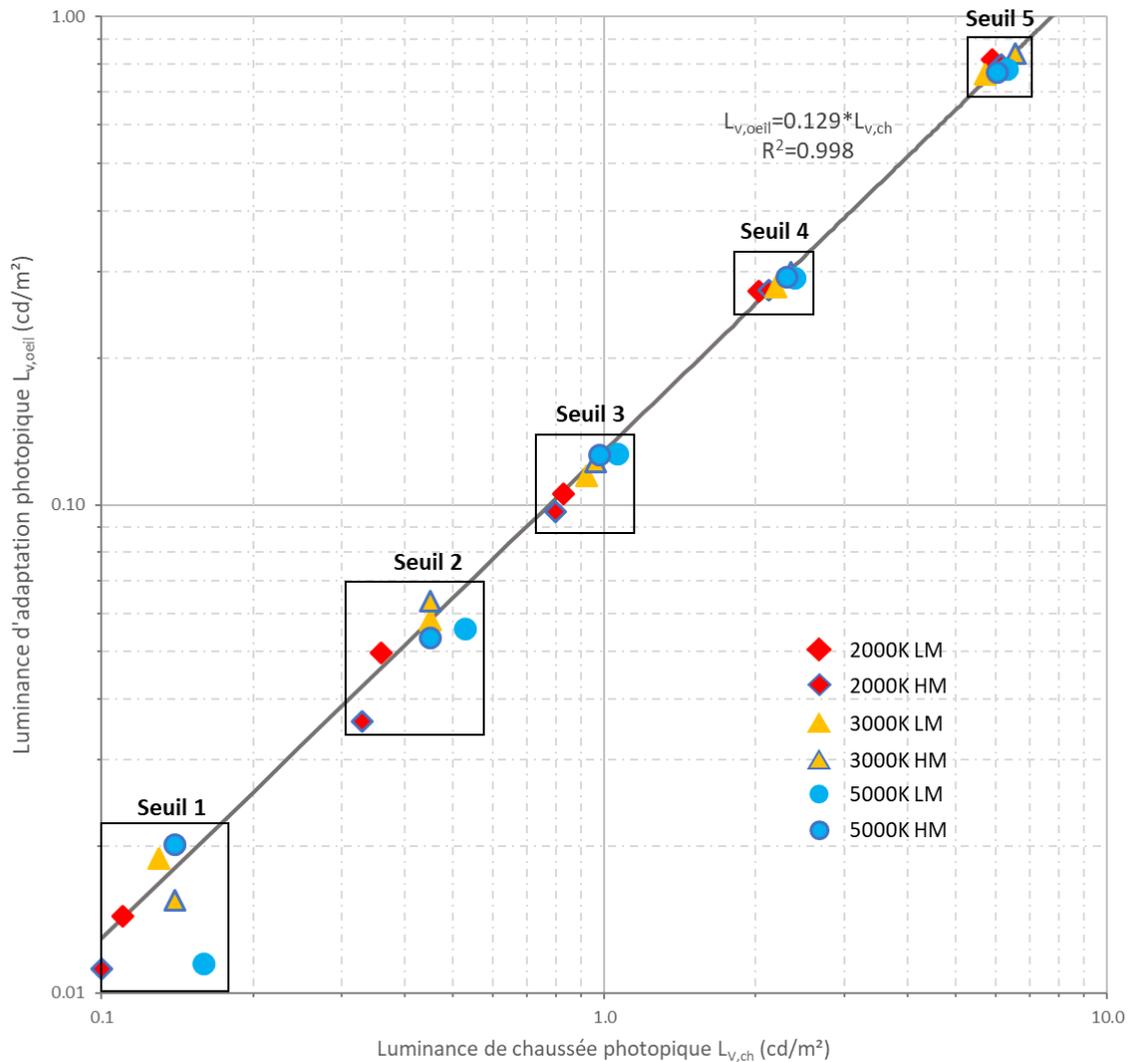


Figure 2-13 Luminance d'adaptation photopique ($L_{v,oeil}$) en fonction de la luminance de chaussée photopique ($L_{v,ch}$) pour les 5 seuils de visibilité et les 6 spectres étudiés

La Figure 2-14 montre, pour chaque spectre, le ratio entre un « Daylight Efficacy Ratio » et sa valeur obtenue pour le spectre 2000 K LM. L'exposition des cônes M et L est quasiment identique d'un spectre à l'autre. L'exposition des cônes S varie beaucoup avec la température de couleur du spectre considéré, mais beaucoup moins avec la mélanopsine (la valeur obtenue pour 3000 K est 2.6 fois plus élevée que pour 2000 K, et la valeur obtenue pour 5000 K est au moins 5.8 fois plus élevée que pour 2000 K). L'exposition des bâtonnets et des CGRips varie à la fois avec la température de couleur et avec la mélanopsine (5000 K HM atteint un ratio de 3.7 pour les bâtonnets et de 5.9 pour les CGRips). La variation avec la mélanopsine diminue avec la température de couleur (le ratio entre HM et LM est de 1.9 pour 2000 K, 1.7 pour 3000 K et 1.4 pour 5000 K). Il est à noter que l'exposition des bâtonnets et des CGRips pour les spectres 3000 K HM et 5000 K LM sont très similaires. Ces résultats montrent que le calcul

systématique des grandeurs α -optiques définies par la CIE (CIE S 026 2018) fournit un angle d'approche très intéressant qui sera utile lors de la discussion sur les résultats.

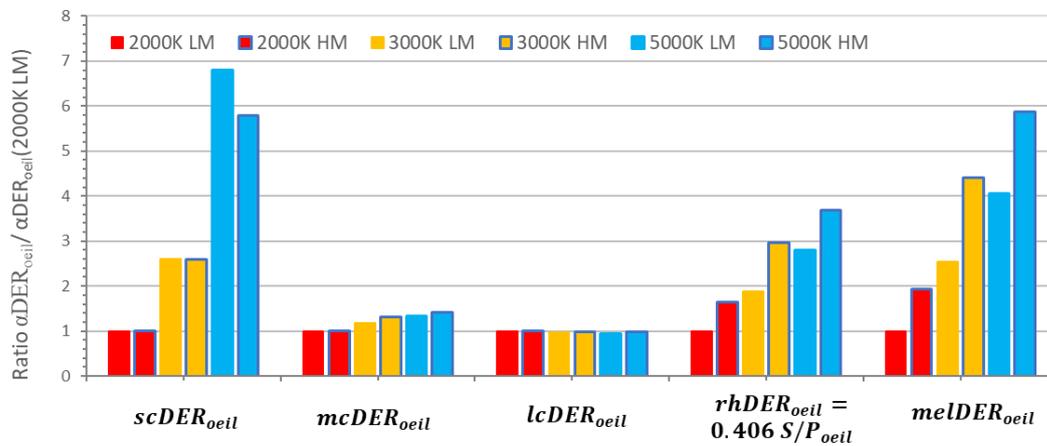


Figure 2-14 Ratios entre une valeur de αDER_{oeil} et sa valeur pour 2000 K LM, pour tous les spectres

Les niveaux lumineux moyens sélectionnés par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité ont ensuite été comparés aux résultats du modèle de visibilité d'Adrian et Blackwell (Adrian 1987). La Figure 2-15 illustre cette comparaison en superposant nos résultats sur la première figure de l'article d'Adrian. Sur ce graphique, l'axe des x (luminance de fond) correspond à notre variable $L_{v,oeil}$, l'axe des y (sensibilité au contraste, CS) correspond à l'inverse du contraste de Weber entre la cible et son environnement de fond (dans notre cas, $C_{int} = 0.35$, soit un CS de 2.86). La taille angulaire de la cible dans notre expérience est 8.4', qui est proche de la courbe à 10' présentée dans la figure d'Adrian. Le seuil 2 correspond à une détection sûre et certaine de la cible par les observateurs. Cela coïncide avec le critère de visibilité utilisé par Adrian dans son modèle. Le seuil 3 va un peu au-delà de ce critère puisqu'il correspond au début de reconnaissance de la forme de la cible par les observateurs. Finalement, les résultats présentés dans la figure d'Adrian sont obtenus pour des observateurs âgés de 20 à 30 ans, ce qui correspond à la tranche d'âge sollicitée dans notre expérience.

La Figure 2-15 montre que nos résultats sont cohérents avec le modèle d'Adrian et Blackwell. Les résultats obtenus pour le seuil de visibilité 2 sont légèrement à gauche de la courbe pour une cible de taille angulaire 10' d'angle, et les résultats pour le seuil 3 sont légèrement à sa droite. Pour le seuil 2, parmi les 6 spectres, les résultats obtenus pour une température de couleur de 3000 K sont les plus proches de la courbe pour une cible de 10'. La température de couleur de la source de lumière utilisée dans l'expérience d'Adrian était de 3200 K. En fait, la seule différence vraiment notable entre notre expérience et celle d'Adrian est le temps d'observation : 4 s dans notre cas, contre 0.2 s pour le modèle. Des temps d'observation de quelques secondes requièrent des niveaux lumineux plus faibles qu'un temps d'observation de 0.2 secondes pour détecter une cible. Cela explique probablement que les niveaux

lumineux enregistrés pour le seuil 2 sont plus faibles que ceux du modèle. Cette comparaison montre également que les seuils de visibilité ont été bien compris par les observateurs.

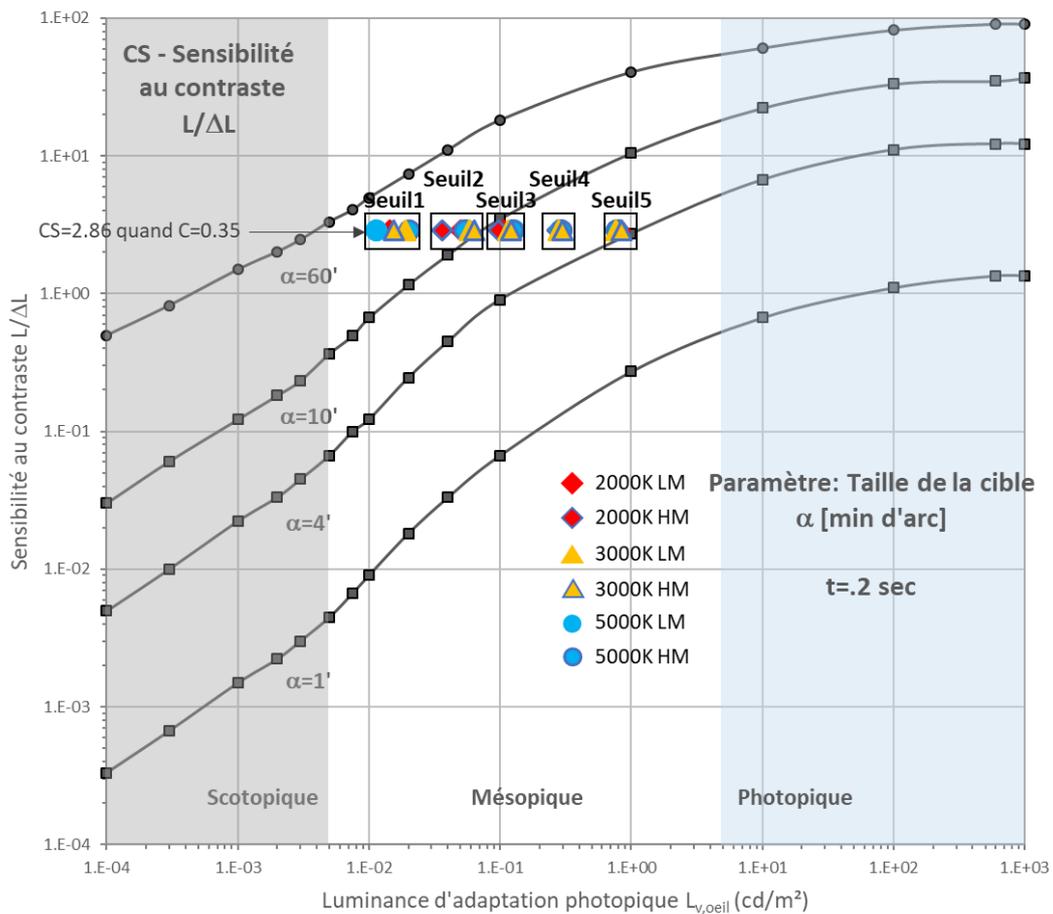


Figure 2-15 Comparaison entre la luminance d'adaptation à laquelle les 5 seuils de visibilité ont été atteints par les observateurs pour les 6 spectres et les résultats présentés dans (Adrian 1987)

A ce stade, certaines réponses peuvent être apportées aux questionnements qui ont dicté cette expérience. Dans un premier temps, on peut conclure que les spectres présentant différentes températures de couleur (et donc le passage de sources SHP à des sources LEDs) impactent bel et bien la visibilité des observateurs dans leur champ de vision central : cet impact dépend néanmoins des niveaux lumineux rencontrés par l'observateur. Pour les niveaux lumineux sélectionnés entre le seuil 1 ($L_{v,ch} = 0.13 \text{ cd/m}^2$ ou $L_{v,oeil} = 0.02 \text{ cd/m}^2$) et le seuil 2 ($L_{v,ch} = 0.93 \text{ cd/m}^2$ ou $L_{v,oeil} = 0.05 \text{ cd/m}^2$), les performances visuelles entre 2000 K et 3000 K ou entre 2000 K et 5000 K sont significativement différentes. Pour les niveaux lumineux correspondant au seuil 3 ($L_{v,ch} = 0.93 \text{ cd/m}^2$ ou $L_{v,oeil} = 0.12 \text{ cd/m}^2$), la différence est significative seulement entre 2000 K et 5000 K. Pour les niveaux lumineux correspondant aux seuils 4 ($L_{v,ch} = 2.23 \text{ cd/m}^2$ ou $L_{v,oeil} = 0.28 \text{ cd/m}^2$) et 5 ($L_{v,ch} = 6.11 \text{ cd/m}^2$ ou $L_{v,oeil} = 0.79 \text{ cd/m}^2$), il n'y a pas de différence significative entre les 3 températures de couleur. Quand la différence de résultats est significative entre les différentes températures de couleur, notre

expérience a montré que les seuils de visibilité sont atteints pour des niveaux lumineux plus faibles à 2000 K qu'à 3000 K, ou qu'à 5000 K. Ainsi, une température de couleur plus faible semble fournir de meilleures conditions de visibilité dans le champ de vision central des observateurs (pour certains niveaux lumineux).

Dans un second temps, nous avons pu conclure que pour les 3 températures de couleur étudiées, une augmentation du contenu mélanopique du spectre n'impacte pas significativement la visibilité des observateurs dans leur champ de vision central. Le passage des spectres LM de notre expérience aux spectres HM permet de multiplier le « Daylight Efficacy Ratio », qui quantifie l'exposition des CGRips, par 1.9 pour 2000 K, 1.7 pour 3000 K et 1.4 pour 5000 K.

Ces résultats seront plus amplement détaillés dans la section **2.3.6 Discussion**.

2.3.6 Discussion

2.3.6.1 Influence des spectres sur la visibilité en champ de vision central

Significativité des résultats et liens avec le modèle mésopique de la CIE

Dans notre expérience, les valeurs prises par $L_{v,oeil}$, la luminance d'adaptation de l'observateur (de 0.01 cd/m² à 0.84 cd/m²) sont incluses dans les limites du domaine mésopique fixées par la CIE (0.005 cd/m² à 5 cd/m²). Les 6 spectres utilisées présentent des ratios S/P_{oeil} allant de 0.61 à 2.26 (voir Tableau 2-11). Les résultats issus de l'analyse statistique ont montré que sous ces conditions, l'impact de la température de couleur (et par conséquent du ratio S/P) est significatif seulement aux niveaux lumineux pour lesquels $L_{v,oeil}$ est inférieur à 0.12 cd/m² (Seuil 3). Cette constatation est vraisemblablement due à l'état d'adaptation des observateurs dans le domaine mésopique. Lorsque les niveaux lumineux augmentent, leur système visuel effectue une transition graduelle entre des conditions d'adaptation scotopique et photopique. Ainsi, l'influence du ratio S/P diminue au fur-et-à-mesure que les conditions d'adaptation du système visuel se rapprochent du domaine photopique. Cela est bien expliqué par le modèle mésopique de la CIE.

La Figure 2-16 présente les iso-valeurs du coefficient d'adaptation m du modèle mésopique de la CIE, tracées pour la luminance d'adaptation $L_{v,oeil}$ en axe des x et le ratio S/P_{oeil} en axe des y. Comme mentionné précédemment, m est le coefficient utilisé pour exprimer la fonction d'efficacité spectrale mésopique $V_{mes}(\lambda)$ comme une combinaison linéaire de la fonction photopique $V(\lambda)$ et de la fonction scotopique $V'(\lambda)$ (voir équation [2-20]). Quand $m = 0$, la vision est purement scotopique, quand $m = 1$ la vision est purement photopique. Les valeurs de m ont été calculées grâce à l'équation [2-21] pour des ratios S/P_{oeil} allant de 0.5 à 2.5 et pour des luminances d'adaptation $L_{v,oeil}$ allant de 0.01 cd/m² à 1 cd/m². Les iso-valeurs ont ensuite été extrapolées à partir de ces valeurs discrètes. Les valeurs de m correspondant à nos 6 spectres pour nos 5 seuils de visibilité ont été rajoutées sur le graphique (voir Tableau 2-10).

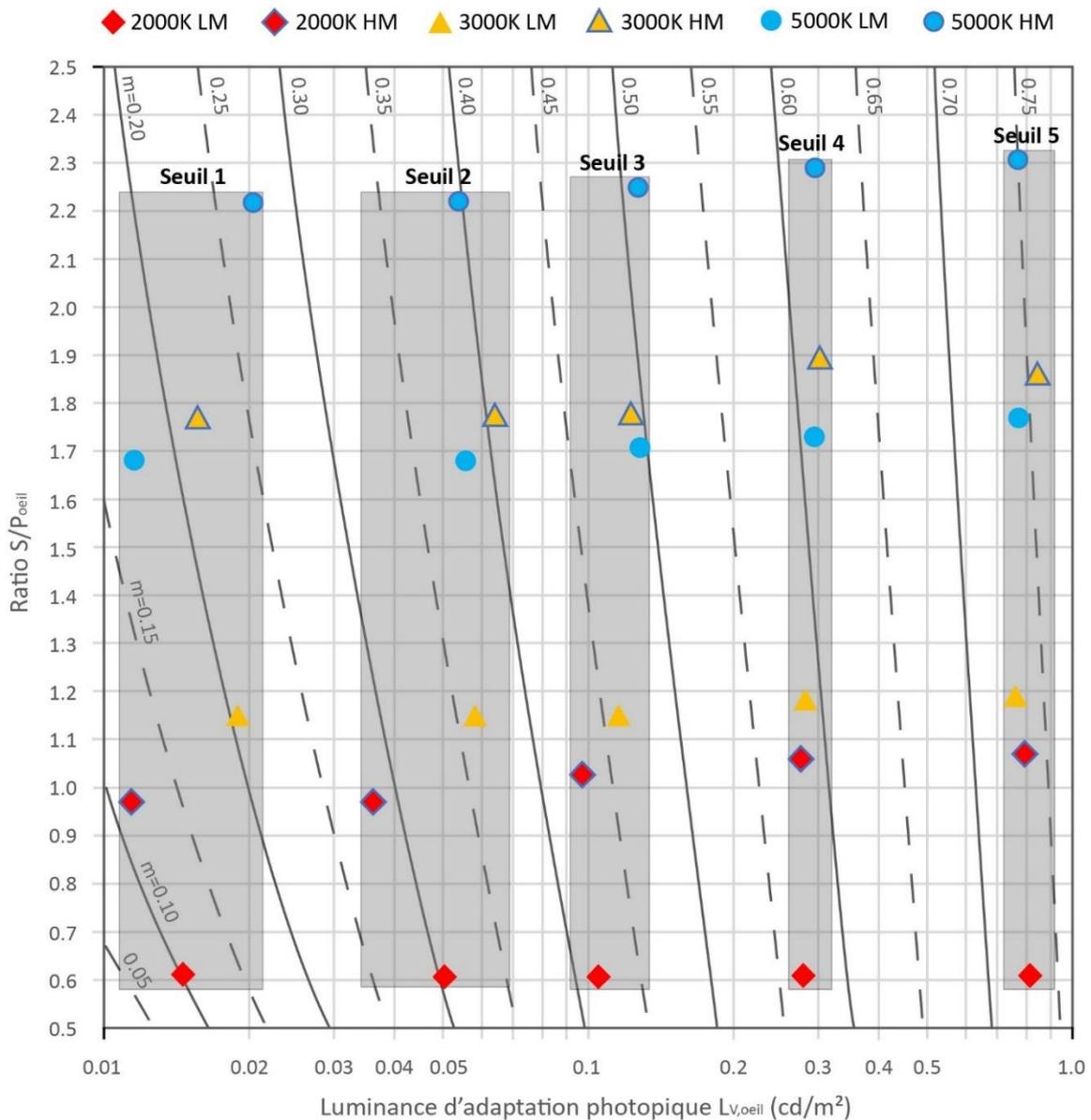


Figure 2-16 Iso-valeurs du coefficient mésopique m , ratios S/P_{oeil} des seuils de visibilité choisis par les observateurs pour les 6 spectres de l'expérience, en fonction de la luminance d'adaptation photopique correspondant au seuil de visibilité

Les iso-valeurs présentées dans la Figure 2-16 montrent les valeurs de m résultant du modèle mésopique de la CIE. Pour des luminances d'adaptation $L_{v,oeil}$ en dessous de 0.02 cd/m^2 (Seuil 1 dans notre expérience), le modèle prédit de grandes variations du coefficient m avec le ratio S/P , ces variations étant encore plus importantes pour des valeurs de ratio S/P inférieures à 1. Pour exemple, en fixant une luminance d'adaptation constante $L_{v,oeil} = 0.02 \text{ cd/m}^2$, un ratio S/P de 0.6 mène à $m = 0.15$, un ratio S/P de 0.97 mène à $m = 0.20$, puis un ratio S/P de 1.77 est nécessaire pour atteindre $m = 0.25$. Lorsque $L_{v,oeil}$ augmente, atteignant des valeurs supérieures ou égales à 0.2 cd/m^2 (Seuils 4 ou 5 dans notre expérience), les iso-valeurs tendent à devenir verticales, montrant que l'influence du ratio S/P sur le coefficient m est grandement réduite.

La Figure 2-17 compare les valeurs obtenues pour le coefficient m pour les 6 spectres de l'expérience pour chaque seuil de visibilité. Les différences significatives observées sur les résultats de $L_{v,ch}$ pour la variable « Température de couleur » sont également rappelées. Les variations de m semblent expliquer les résultats obtenus par analyse statistique. Premièrement, pour tous les seuils, il y a peu de différence entre les valeurs de m obtenues pour la version LM et HM d'une température de couleur (différence moyenne de 0.015, exception faite de la température de couleur 5000 K pour le seuil 1 pour laquelle la différence est bien plus importante et vaut 0.1). Cela semble en accord avec le fait que la variable « Mélanopsine » n'a pas eu d'impact sur les performances visuelles des observateurs. Deuxièmement, les différences les plus importantes entre les coefficients m sont observables pour les seuils 1, 2 et 3, entre les températures de couleur pour lesquelles on a des différences significatives d'impact sur les résultats. Pour le seuil 1, entre 2000 K et 3000 K (**), la différence de valeurs pour m atteint 0.12 ; entre 2000 K et 5000 K (***) , la différence atteint 0.17 ; et entre 3000 K et 5000 K, pour lesquelles on n'a pas de différence significative, l'écart entre les valeurs de m est seulement de 0.05. Ces observations se sont retrouvées pour les seuils 2 et 3 : là où une différence significative a été observée, les écarts entre les valeurs de m atteignent 0.1. La conclusion qui semble s'imposer est donc que le coefficient d'adaptation m du modèle mésopique de la CIE explique les différences constatées entre les 6 spectres de l'expérience. Cela signifie également que ce même modèle mésopique peut être appliqué non seulement en vision périphérique mais également en vision centrale. Enfin, on peut déduire de cette comparaison que deux spectres présenteront une différence significative d'impact sur les performances visuelles d'observateurs lorsque l'écart entre leurs valeurs de m sera plus grand que 0.1, c'est-à-dire que, en passant d'un spectre à l'autre, le système visuel des observateurs se décalera suffisamment vers le domaine scotopique ou le domaine photopique.

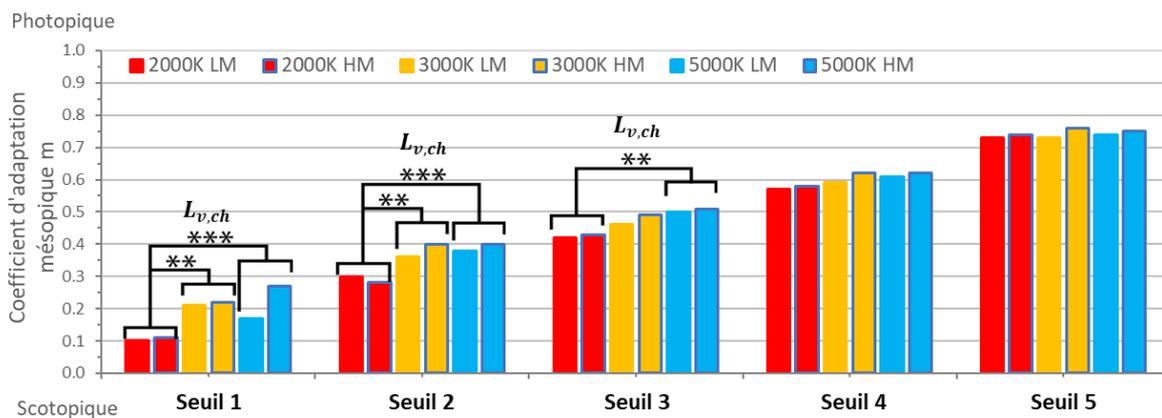


Figure 2-17 Coefficient d'adaptation mésopique m pour les 5 seuils de visibilité et les 6 spectres étudiés

Notre expérience a également montré que quand les différences entre températures de couleur sont significatives, les seuils de visibilité ont été atteints pour des niveaux lumineux plus faibles pour 2000 K que pour 3000 K et 5000 K. Ainsi, en conditions mésopiques, une

température de couleur plus faible (soit un ratio S/P plus faible) fournit de meilleures conditions de visibilité en champ de vision central. Les contrastes mésopiques indiqués dans le Tableau 2-10 semblent corroborer ces résultats, puisque les contrastes les plus faibles sont observés pour les températures de couleur les plus élevées. Cette constatation va à l’opposé de ce qui est habituellement indiqué dans les études portant sur les conditions de visibilité mésopiques en champ de vision périphérique (Bullough et Rea 2000; S. Y. He et al. 2017). En champ de vision central, il n’y a pas de conclusion claire, comme on a pu le constater au début de ce chapitre. Pour rappel, Górczewska et al. (Górczewska, Mroczkowska, et Skrzypczak 2013) ont trouvé qu’une LED blanche à 6500 K ($S/P = 2.25$) permettait aux observateurs d’avoir une meilleure détection de contraste qu’une source SHP à 2200 K ($S/P = 0.65$). Liu et al. (Liu et al. 2021) ont investigué l’utilisation de LEDs présentant des températures de couleur allant de 1900 K à 5100 K et ont trouvé que la source à 3800 K permettait de maximiser les performances visuelles des observateurs. Enfin, Bisketzis et al. (Bisketzis, Bouroussis, et Topalis 2009) ont comparé 4 sources présentant des ratios S/P allant de 0.9 à 1.62 et ont découvert que l’acuité visuelle en champ de vision centrale était la plus faible pour le ratio S/P le plus élevé. Les résultats de notre expérience vont dans le sens des conclusions de cette dernière étude.

Par conséquent il semble que dans le domaine mésopique, pour des luminances d’adaptation inférieures à 0.1 cd/m^2 , une augmentation du ratio S/P va avoir pour conséquence de réduire les performances visuelles en champ de vision central et de les augmenter en champ de vision périphérique. Une contribution plus importante des bâtonnets peut expliquer l’amélioration de performance en périphérie, mais il convient de comprendre ce qui explique la baisse de performance en champ de vision central observée dans les résultats de notre expérience.

Généralement, il est supposé que la luminance perçue par un observateur résulte de l’addition de signaux issus des cônes M et L. Les signaux des cônes S jouent seulement un rôle dans la perception de chromaticité. Dans notre expérience, il y a peu de différences entre les 6 spectres en termes d’exposition des cônes M et L. Le Tableau 2-11 montre que $lcDER_{oeil}$ varie de 0.99 à 1.05 et que $mcDER_{oeil}$ varie de 0.66 à 0.94. En revanche, si on considère l’exposition des cônes S, on s’aperçoit que 2000 K LM et HM présentent tous deux une valeur de $scDER_{oeil}$ de 0.10, 3000 K LM et HM une valeur de 0.26, tandis que 5000 K LM présente une valeur de 0.68 et 5000 K HM de 0.58. Cela signifie que les spectres permettant d’obtenir les meilleures performances visuelles sont ceux qui excitent le moins les cônes S. Ainsi, il apparaît que les cônes S ont joué un rôle sur la perception de luminance : une augmentation des signaux provenant des cônes S a résulté en une diminution des signaux des cônes M et L. Cet effet antagoniste des courtes longueurs d’onde a été montré précédemment par Ripamonti (Ripamonti et al. 2009) en se basant sur des mesures de papillotements en luminance, et plus récemment par Spitschan et al. (Spitschan et al. 2014) en se basant sur des mesures de dilatation de pupilles.

Des éléments précédents, on peut conclure que les différences de performances visuelles en champ de vision central dans le domaine mésopique peuvent être décrites par le modèle

mésopique de la CIE et expliquées par le comportement des cônes S. Comme indiqué par Verdon (Verdon et Adams 1987), cela pourrait être lié à des interactions entre les bâtonnets et les cônes S.

Impact de l'exposition à la mélanopsine

Nos résultats n'ont pas montré de différence significative de performances visuelles en champ de vision central entre les versions LM et HM d'un même spectre. Des études précédentes ont montré que les CGRips pouvaient jouer un rôle dans le processus de vision en fournissant un mécanisme séparé pour augmenter les capacités de la rétine. Par exemple, la mélanopsine permettrait ainsi d'améliorer la vision par les cônes en augmentant les signaux issus des cônes L et M (Lucas et al. 2020). Par conséquent, on aurait pu s'attendre à ce que les seuils de visibilité soient obtenus pour des niveaux lumineux plus faibles pour les versions HM des spectres que pour les versions LM. Cependant, les études montrant des différences significatives en termes de perception de luminosité associée à la mélanopsine (Brown et al. 2012; Zele, Adhikari, et al. 2018), se sont concentrées sur le domaine photopique, avec des luminances d'adaptation supérieures à 180 cd/m^2 . Notre expérience s'est intéressée au domaine mésopique avec des niveaux de luminance bien plus faibles (inférieurs à 1 cd/m^2). Mure (Mure 2021) a trouvé que les CGRips ne semblent pas répondre à des niveaux lumineux en dessous du domaine photopique, même si ceux-ci sont présentés après une adaptation au noir. Barrionuevo (Barrionuevo et al. 2014) a investigué la contribution des bâtonnets, des cônes et des CGRips sur la phase de constriction rapide de la pupille sous des conditions mésopiques et photopiques. Il a découvert qu'il n'y a pas de contribution de la mélanopsine pour des niveaux de luminance d'adaptation inférieurs à 1 cd/m^2 . Dans cette étude, cela correspondait au niveau pour lequel l'éclairement rétinien quantique des observateurs était inférieur à $11 \log \text{ quanta/cm}^2/\text{s}$: un seuil d'activation de la mélanopsine déduit des résultats de Dacey (Dacey et al. 2005) obtenus lors de ses recherches sur des rétines de primates. Puisque les niveaux lumineux sélectionnés par nos observateurs pour les 5 seuils de visibilité et les 6 spectres ne dépassent jamais une luminance d'adaptation $L_{v,oeil}$ de 1 cd/m^2 , nous avons calculé la plage d'éclairements rétiens quantiques correspondante. Nos mesures ayant été réalisées dans le plan de l'œil de l'observateur, nous avons utilisé le modèle de Van Norren (Kraats et Norren 2007) pour un âge de 22 ans (âge moyen de nos observateurs) afin de prendre en compte la densité optique des milieux oculaires et de convertir ainsi ces mesures en valeurs rétiennes. Les valeurs d'éclairements rétiens quantiques ainsi obtenus varient de 10.3 (seuil 1) à 12.2 (seuil 5) $\log \text{ quanta/cm}^2/\text{s}$, qui constituent des valeurs inférieures ou très légèrement supérieures au seuil d'activation de la mélanopsine selon les résultats de Dacey. A partir de cette constatation, il nous semble donc que, malgré le fait que les versions HM de nos 3 couleurs de température multiplient par 1.9 (2000 K), 1.7 (3000 K) et 1.4 (5000 K) l'exposition mélanopique des versions LM, les niveaux lumineux utilisés sont encore trop faibles pour déclencher une réponse significative de la mélanopsine, et ce quel que soit le seuil de visibilité considéré.

2.3.6.2 Application à l'éclairage de section courante

Comparaison avec les recommandations actuelles

Les recommandations en termes de niveaux lumineux pour les tunnels sont basées sur les luminances photopiques de la chaussée, vues par les conducteurs depuis l'intérieur de leur véhicule. Dans notre expérimentation, les observateurs regardent directement la cible à l'intérieur du tunnel. Afin de prendre en compte l'impact du pare-brise, les luminances de chaussée ($L_{v,ch}$) correspondant aux paliers d'éclairage choisis par les observateurs pour les 5 seuils de visibilité doivent être divisées par 0,8, le facteur de transmission du pare-brise utilisé couramment par la CIE (CIE 88 2004). Comme on l'a vu précédemment, il n'y a pas de différence significative entre les versions LM et HM de chaque catégorie de température de couleur : il a donc été décidé de moyenner les résultats obtenus pour ces deux versions de chaque température de couleur. Le Tableau 2-12 présente les moyennes et les erreurs types des luminances de chaussée issues des résultats de notre expérience, après correction pour prendre en compte l'influence du pare-brise ($L_{v,ch,pb}$).

Il est à noter que les comparaisons avec le modèle d'Adrian ont montré que les niveaux lumineux dans notre expérience sont plus faibles que ceux trouvés par Adrian d'environ 15%. Cela est probablement dû au fait que notre expérimentation est basée sur une phase d'observation statique longue (4 secondes d'observation pour chaque palier d'éclairage), ce qui permet aux observateurs de percevoir les seuils de visibilité pour des niveaux lumineux plus faibles que pour des conditions d'observation brèves (0.2s à 0.5s) (Adrian 1987).

Tableau 2-12 Moyennes et erreurs types (ErT) des niveaux de luminance de chaussée sélectionnés par les 48 observateurs pour chaque seuil de visibilité, sur les 6 spectres, pour les modalités de la variable « Température de couleur », après correction liée à l'influence du pare-brise

Seuils de visibilité	Luminance de chaussée $L_{v,ch,pb}$ – Moyenne et erreur type (cd/m^2)		
	2000K	3000K	5000K
Seuil 1	0.13 (ErT=0.011)	0.17 (ErT=0.017)	0.19 (ErT=0.017)
Seuil 2	0.43 (ErT=0.030)	0.57 (ErT=0.047)	0.62 (ErT=0.052)
Seuil 3	1.02 (ErT=0.074)	1.18 (ErT=0.086)	1.27 (ErT=0.091)
Seuil 4	2.60 (ErT=0.165)	2.84 (ErT=0.176)	2.94 (ErT=0.170)
Seuil 5	7.53 (ErT=0.326)	7.67 (ErT=0.371)	7.72 (ErT=0.331)

La Figure 2-18 compare les valeurs de luminances de chaussée corrigées pour la prise en compte du pare-brise ($L_{v,ch,pb}$, voir Tableau 2-12) avec les recommandations actuelles. Les recommandations CETU pour l'éclairage de section courante en journée indiquent des niveaux

entre 2 et 6 cd/m^2 (CETU 2000). Pour les conditions nocturnes, les niveaux indiqués sont compris entre 1 et 2 cd/m^2 . Si on s'intéresse également aux recommandations de la CIE (CIE 88 2004), on trouve des niveaux compris entre 1 et 10 cd/m^2 la journée, et jamais inférieurs à 1 cd/m^2 pour la nuit. Enfin pour les recommandations du CEN (CEN 2006), les niveaux de journée sont compris entre 1 et 15 cd/m^2 et les niveaux nocturnes sont les mêmes que pour la CIE. La Figure 2-18 montre que les seuils 1 et 2, qui correspondent à la question « la cible peut-elle être vue ? », donnent des luminances de chaussée inférieures à 0.7 cd/m^2 . Ce résultat montre que les recommandations données par les organismes (niveaux de luminance de chaussée jamais inférieurs à 1 cd/m^2) assurent une détection de la cible par les conducteurs. Le fait que la luminance minimale recommandée par les organismes soit supérieure à cette valeur de 0.7 cd/m^2 est logique. En effet, les temps d'observation relativement longs (4 s) utilisés dans notre expérience ont donné des luminances plus faibles que ce qui pourrait être attendu en conditions réelles pour des temps d'observation courts. Cependant, on remarque que des luminances de chaussée de l'ordre de 1 cd/m^2 ne permettent pas d'atteindre le seuil 3, d'autant plus en tenant compte du fait que les valeurs données dans la Figure 2-18 constituent des limites basses pour chaque seuil au vu des conditions d'observation mises en œuvre pendant l'expérience. Ainsi, pour certaines conditions d'éclairage de nuit recommandées actuellement, les conducteurs ne seraient pas assurés de reconnaître un éventuel obstacle sur la chaussée : les seuils 3 et 4 doivent être atteints pour cela puisqu'ils permettent de répondre à la question « quelle est la forme de la cible ? ». Cette constatation pourrait s'avérer dangereuse puisque le comportement d'un conducteur vis-à-vis d'un obstacle sur la chaussée va dépendre de la nature de ce dernier : si son identification est impossible, le conducteur ne pourra pas initier une action en toute connaissance de cause. Il apparaît donc que les recommandations faites pour l'éclairage de nuit pourraient être rehaussées afin d'assurer une reconnaissance des obstacles et non pas seulement une détection, pour que les décisions des conducteurs puissent être adaptées à la situation. En considérant l'échelle de visibilité proposée en Tableau 2-2, il semble que le seuil sécuritaire permettant d'offrir une visibilité optimale est le seuil 4 puisqu'il assure une reconnaissance de la forme de l'obstacle avec une confiance absolue de l'observateur dans son jugement. Ce seuil 4 constitue une limite basse pour assurer des performances visuelles optimales aux conducteurs ; à contrario, le seuil 5 marque le début d'un plateau de visibilité pour lequel les performances visuelles ne s'améliorent plus lorsque les niveaux lumineux augmentent : il constitue donc une limite haute pertinente (il est possible de dépasser un peu le niveau donné pour le seuil 5 au vu des temps d'observation utilisé dans l'expérience). Cependant, la luminance de chaussée pour les tunnels longs, une longue distance d'arrêt et un trafic lourd recommandée par la CIE (10 cd/m^2) est plus élevée que toutes les valeurs que nous avons trouvées pour le seuil 5. Pour le CEN, ce sont les luminances de chaussée recommandées pour les tunnels ayant une longue distance d'arrêt et une densité de trafic moyenne (10 cd/m^2) ou forte (15 cd/m^2) qui sont supérieures à toutes les valeurs du seuil 5, et donc probablement surdimensionnées. Le fait de baisser ces niveaux de luminance

permettrait de réaliser des économies d'énergie tout en conservant des performances visuelles similaires, puisque ces niveaux sont situés sur un plateau de visibilité.

Sur la base de notre expérimentation, en retenant les seuils 4 et 5 comme des valeurs limites et en considérant que pour ces seuils il n'y a pas de différence significative entre les températures de couleur étudiées, la gamme de luminances de chaussée recommandées pourrait être de 2.5 cd/m² à 8 cd/m² (voir Tableau 2-12).

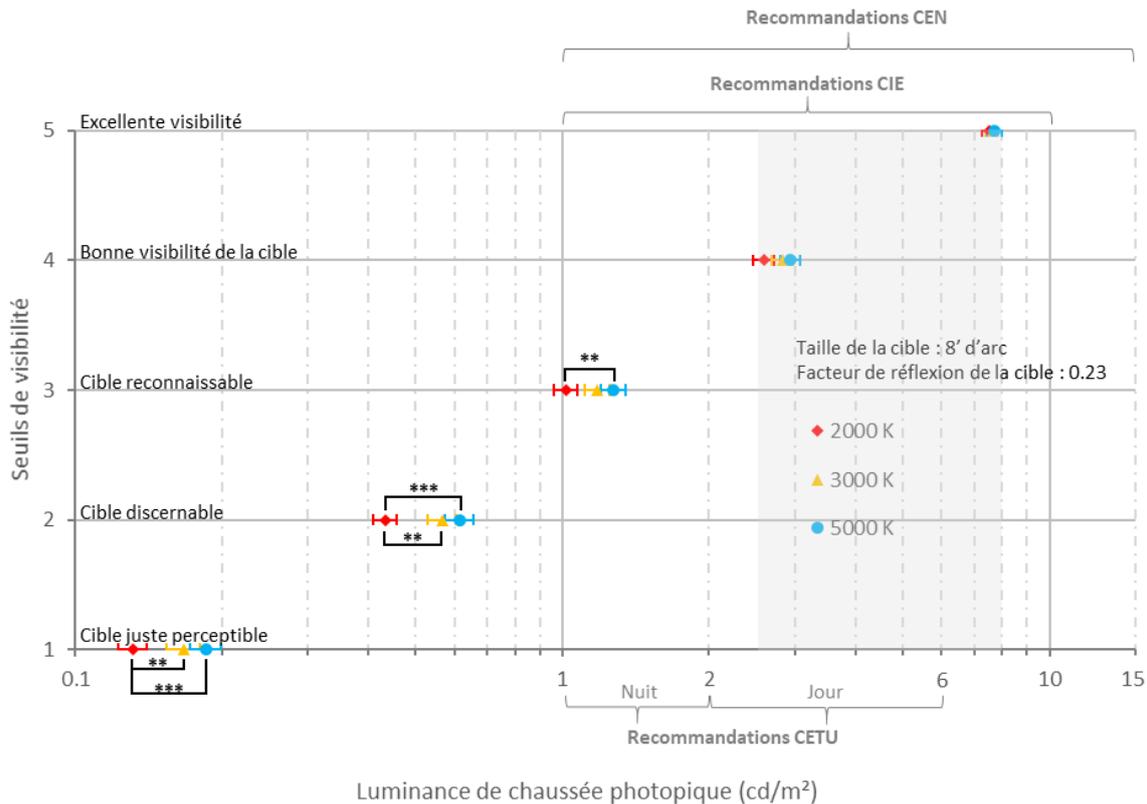


Figure 2-18 Moyennes et erreurs types des luminances de chaussée à mettre en œuvre après correction liée à l'impact du pare-brise ($L_{v,ch,pb}$) pour chaque seuil de visibilité et chaque température de couleur (LM et HM sont considérés simultanément). La significativité des résultats du test post hoc est indiquée (p -value < 0.001 (***) et p -value < 0.01 (**)). Les accolades indiquent les recommandations actuelles de la CIE (international), du CEN (Europe) et du CETU (France). Le rectangle gris indique la gamme de luminances que l'on pourrait recommander au vu de nos résultats.

Economies d'énergie envisageables

Les résultats de l'expérience ont montré que l'impact de la température de couleur est significatif pour des niveaux lumineux inférieurs à 1 cd/m², et qu'une température de couleur plus faible fournit de meilleures conditions de visibilité. Comme on a pu le voir en comparant ce résultat aux règles de dimensionnement, ce niveau de luminance de chaussée pourrait être mis en œuvre en tunnel pour l'éclairage nocturne (même si cela ne permet pas d'optimiser la visibilité des cibles d'après nos résultats). Néanmoins, les potentielles économies d'énergie associées à une température de couleur plus faible ne sont pas évidentes. En effet, les gains associés à la mise en œuvre de niveaux lumineux plus faibles pour ces températures de

couleur doivent être comparés aux pertes liées à l'efficacité lumineuse plus faible de la technologie (Morgan Pattison, Hansen, et Tsao 2018). Cette baisse d'efficacité lumineuse pour des températures de couleur plus faibles se voit en pratique sur les gammes de luminaires des constructeurs. En reprenant en exemple les luminaires Omnistar de Schröder présentés à la section **1.4.1.1 Caractéristiques intrinsèques des sources LEDs**, on constate un écart de 47% d'efficacité lumineuse entre les sources LEDs à 2200 K et les sources LEDs à 5700 K (voir Figure 1-12). Ainsi, au vu de ces données, il apparaît que les économies envisageables en mettant en place des sources avec des températures de couleur plus faibles ne suffiront pas à contrebalancer les pertes liées à la moins bonne efficacité lumineuse de ces sources.

L'étude des efficacités lumineuses des sources semble inciter à mettre en place des luminaires présentant la température de couleur la plus élevée possible pour obtenir les économies d'énergie les plus importantes. Il convient néanmoins de tenir compte du confort des usagers dans une certaine mesure. D'une part les sources présentant des températures de couleur élevées suscitent un éblouissement d'inconfort plus important (Bullough 2009; Sivak et al. 2005). D'autre part, l'arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses fixe une limite haute de température de couleur à 3000 K dans les espaces publics et sur la voirie pour l'éclairage nocturne. Les tunnels ne sont pas concernés par cet arrêté, mais si un de ces ouvrages était situé sur une portion de route éclairée, les usagers passeraient d'une température de couleur de 3000 K sur la route d'accès à 5700 K dans l'ouvrage, ce qui pourrait provoquer une sensation d'inconfort chez certains conducteurs. En considérant maintenant la température de couleur 4000 K, qui présente un écart chromatique moins important avec 3000 K, on constate un écart de l'efficacité lumineuse moyenne avec la gamme 5700 K de 4%. Cet écart très faible semble faire des luminaires à 4000 K un bon compromis entre confort et économies d'énergie pour la gamme Omnistar.

2.3.7 Limites et perspectives

Plusieurs limites s'appliquent à cette étude. Premièrement, les montées et les descentes ne s'appuient pas sur la même notion de visibilité : les montées sollicitent une performance visuelle (l'observateur doit reconnaître la cible), tandis que la descente sollicite une notion de visibilité qui est plutôt un jugement subjectif (l'observateur connaît la cible et juge lui-même quand il pense avoir atteint les seuils de visibilité). Les résultats obtenus en descente sont plus dépendants du facteur humain étant donné que les observateurs connaissent la forme de la cible au début du stimulus. Certaines mesures ont été prises pour limiter cet impact humain : nous avons créé une échelle de visibilité pour les montées et une autre pour les descentes avec des descriptions précises des seuils de visibilité qui correspondent à la perception des observateurs, afin de s'assurer qu'ils comprennent correctement le sens du seuil pour les montées et pour les descentes. De plus, les observateurs pouvaient ajuster leur choix pour les seuils de visibilité (changement manuel de paliers par l'opérateur à la demande de

l'observateur) afin de s'assurer que le palier d'éclairage choisi correspondait bien au seuil qu'ils étaient censés détecter. Deuxièmement, le cinquième seuil de visibilité était parfois difficile à identifier d'après les observateurs, surtout lors des montées. En effet, ils devaient indiquer quand leur visibilité ne changeait plus, mais le fait qu'ils reconnaissent parfaitement la cible au seuil 4 laissait peu de place à des améliorations de visibilité. Par conséquent, il était difficile pour eux de dissocier visibilité et confort pour ce seuil.

En ce qui concerne le contenu mélanopique des spectres, la courbe de sensibilité de la mélanopsine se superpose à celle des bâtonnets (voir Figure 1-16). Du fait que nos spectres ont été créés pour être des métamères de SHP 2000 K et de LEDs blanches 3000 K et 5000 K, ils couvrent une large gamme de longueurs d'onde. Il est donc difficile de dissocier une augmentation de l'exposition mélanopique d'une augmentation de l'exposition rhodopique : lorsque le « Daylight Efficacy Ratio » mélanopique augmente d'un facteur 1.93 (2000 K), 1.73 (3000 K) et 1.44 (5000 K) entre les versions LM et HM d'une température de couleur, le « Daylight Efficacy Ratio » rhodopique augmente d'un facteur 1.64 (2000 K), 1.57 (3000 K) et 1.31 (5000 K). Exception faite du « Daylight Efficacy Ratio » pour les cônes S pour la température de couleur 5000 K, les « Daylight Efficacy Ratio » de tous les types de cônes sont quasiment identiques pour les versions LM et HM d'une même température de couleur. Ainsi, toutes différences observées entre les versions LM et HM auraient résulté soit des bâtonnets, soit des CGRips, soit des deux combinés.

Il est également à noter que la prise en compte du pare-brise telle qu'elle a été effectuée dans notre analyse consiste simplement en l'application d'un facteur de transmission photopique moyen ne prenant pas en compte le caractère spectral de la transmission. L'idéal aurait été d'utiliser un écran en verre présentant des propriétés de réflexion spectrales similaires à celles d'un pare-brise directement dans l'expérience afin d'obtenir des résultats exploitables en l'état. Nous avons mesuré à posteriori des facteurs de transmission spectraux pour des pare-brises de véhicules (en l'occurrence Citroën C3 et Renault Twingo), et nous avons pu remarquer que le facteur de transmission était plus faible pour les courtes longueurs d'onde (pour les longueurs d'onde inférieures à 420 nm, le facteur de transmission est plutôt aux alentours de 0.4 ou 0.5, tandis qu'il est plutôt aux alentours de 0.8 au-delà). La composante violette de certains spectres (pic à 400 nm) aurait donc été diminuée dans la perception finale des observateurs.

Une autre limite de l'expérience concerne le spectre des stimuli créés pour l'expérience. En observant les distributions spectrales relatives en question (voir Figure 2-9), on s'aperçoit que l'on n'a pas affaire à des spectres de LEDs blanches classiquement utilisés en éclairage. Il serait intéressant de comparer les « Daylight Efficacy Ratios » α -opiques de LEDs blanches à 3000 K et 5000 K utilisées en tunnel avec ceux de nos spectres, afin de déterminer si les expositions des différents photorécepteurs restent sensiblement les mêmes dans les deux cas de figure ou non. Au moment de la mise au point de l'expérimentation, nous n'avons pas trouvé sur le marché de COBs comprenant à la fois des LEDs blanches de températures de couleur différentes, et suffisamment de LEDs de couleurs variées. Ainsi, une solution aurait été de

concevoir notre propre source en choisissant individuellement les LEDs en fonction de nos besoins. Cette méthode était envisageable mais beaucoup plus chronophage et complexe à mettre en œuvre.

Une solution aurait été de travailler avec des LEDs blanches du marché à 3000 K et 5000 K (voire 6500 K), en les considérant comme les versions LM de nos spectres, et d'établir des versions HM à partir de ces spectres de référence. Cela aurait cependant imposé d'utiliser un assemblage de LEDs du marché, ainsi que les COBs pour créer les spectres métamères HM.

Finalement, la maquette de tunnel peut être utilisée pour créer d'autres expériences. Il serait notamment intéressant de tester la visibilité des cibles dans le champ de vision périphérique afin de comparer les résultats avec ceux établis lors d'études précédentes. Cette première expérience s'est basée sur une cible centrale puisque, à notre sens, elle représente un danger plus pertinent en tunnel qu'un piéton traversant la chaussée par exemple. Les conditions d'éclairage, ainsi que les propriétés de réflexion des surfaces de la maquette peuvent être modifiées pour investiguer d'autres aspects du design des tunnels et de potentielles économies d'énergie. Des expérimentations sur le contraste chromatique sont également envisageables en jouant sur les indices de rendu des couleurs des spectres conçus.

2.4 Conclusion du chapitre

Une expérience psycho-visuelle a été menée sur une maquette de tunnel afin d'investiguer l'impact du spectre de la lumière sur la visibilité. Trois objectifs principaux ont motivé cette expérience :

1. Déterminer si le passage de sources SHP à des sources LEDs pourrait avoir un impact sur les performances visuelles des conducteurs dans leur champ de vision central.
2. Déterminer si une exposition mélanopique plus importante pourrait modifier les performances visuelles des conducteurs (à nouveau dans leur champ de vision central).
3. Finalement, à la lumière des réponses apportées aux deux problématiques précédentes, identifier des températures de couleur de LEDs susceptibles de permettre de réaliser des économies d'énergie tout en assurant des conditions de visibilité sécuritaire.

Les résultats ont montré que la mélanopsine n'a pas d'impact significatif sur la visibilité pour les niveaux lumineux étudiés (la luminance de chaussée varie de 0 à approximativement 20 cd/m²) et les conditions d'observation considérées (champ de vision central). Il convient de rappeler que le seuil d'excitation des CGRips mis en évidence par Dacey (Dacey et al. 2005) a été difficilement atteint sur les derniers seuils de visibilité de notre expérience (12.2 log quanta/cm²/s pour le seuil 5 de visibilité, pour un seuil d'activation à 11 log quanta/cm²/s). Cette expérience a permis de mettre en exergue l'intérêt de l'usage des grandeurs α -opiques développées par la CIE. La création des spectres aurait pu se faire en ajoutant des contraintes supplémentaires sur les éclaircissements α -opiques, et notamment en imposant que seuls les

éclairagements mélanopiques des spectres LM et HM soient différents. Néanmoins, un plus grand nombre de puces de couleurs différentes aurait certainement été nécessaire sur les COBs, afin de pouvoir créer des spectres extrêmement précis.

On a pu constater un impact significatif des températures de couleur sur les performances Visuelles des observateurs dans leur champ de vision central pour des niveaux de luminance de chaussée entre 0 et 1 cd/m². Cet impact est le suivant : plus la température de couleur de la source est basse, meilleures sont les performances visuelles des observateurs. Le coefficient d'adaptation m du modèle mésopique de la CIE semble expliquer la significativité des résultats : les différences les plus importantes pour ce coefficient coïncident avec les différences significatives observées dans l'analyse statistique. On a pu remarquer que 2 spectres présentaient une différence significative d'impact sur les performances visuelles d'observateurs, lorsque l'écart entre leurs valeurs de coefficient m était plus grand que 0.1. Les cônes S semblent jouer un rôle sur la perception de luminance : l'augmentation des signaux issus des cônes S résultent en une diminution des signaux des cônes M et L. Ainsi, plus ces signaux sont importants, et plus la luminance perçue diminue. Les différences de performances visuelles en champ de vision central dans le domaine mésopique peuvent donc être décrites par le modèle mésopique de la CIE et expliquées par le comportement des cônes S. La comparaison avec les recommandations actuelles a montré que certains niveaux pour l'éclairage de nuit semblent trop faibles pour assurer une visibilité optimale pour les conducteurs (pas de reconnaissance de la forme de la cible). A contrario, certains niveaux mis en œuvre par la CIE et le CEN en section courante en journée semblent surdimensionnés et situés au-delà du seuil marquant le début d'un plateau de visibilité. Les économies d'énergie potentielles associées à la mise en place de sources présentant des températures de couleur plus faibles se heurtent à la baisse d'efficacité lumineuse de la technologie. L'utilisation de sources présentant des températures de couleur relativement faibles ne semblent donc pas pertinente. L'usage de sources à 4000 K semble constituer un bon compromis entre confort, performances visuelles et économies d'énergie.

Chapitre 3 : Environnement de modélisation

3.1 Objectifs et démarche

3.1.1 Objectifs

L'objectif de l'étape de modélisation est de développer un modèle dynamique visant à reconstituer un tunnel dans son intégralité, ainsi que sa zone d'accès. Il s'agira ensuite de produire une simulation de l'éclairage pour ce tunnel sur un an, en tenant compte notamment des conditions climatiques et de trafic pour l'ouvrage considéré. Ce chapitre s'attèle à remplir les prérequis nécessaires au développement de ce modèle, à savoir valider les données obtenues par simulation en les confrontant à des mesures réelles.

3.1.2 Besoins

Le modèle dynamique doit permettre de prendre en compte les variations climatiques et les variations de trafic pour un tunnel considéré sur un an, afin de pouvoir développer différents scénarios de pilotage de l'installation en fonction de ces données. Le pas de temps pris en compte pour cette modélisation dynamique doit être inférieur à une heure afin de tenir compte des variations du climat et du trafic. Habituellement, l'intervalle de temps utilisé pour la prise en compte de la dynamique du climat lumineux devrait être inférieur ou égal à 5 minutes. Le choix final du pas de temps dépendra du temps de simulation, ainsi que de la disponibilité des données au pas de temps souhaité. La prise en compte des conditions climatiques correspond à des calculs de luminance de voile : le modèle doit donc permettre de donner des résultats s'approchant de la réalité pour que le pilotage simulé de l'installation d'éclairage soit représentatif des conditions réelles. Ce dernier doit ensuite pouvoir être validé. Pour cela, le modèle doit permettre de calculer des éclairagements ou des luminances de chaussée produits par des sources de lumière artificielles, en plus de la prise en compte de l'impact de la lumière naturelle.

3.1.3 Démarche

Au vu des besoins établis ci-dessus, ce chapitre se décomposera en une phase préliminaire, puis deux phases principales. La première étape avant de débiter le travail de validation du modèle, est de déterminer sur quel logiciel ce dernier s'appuiera. Dans un second temps, la validation des éclairagements et des luminances de chaussée produits par des sources de lumière artificielle sera réalisée sur la maquette de tunnel utilisée pour réaliser l'expérimentation présentée dans le **chapitre 2 Contenu spectral et visibilité**. De nombreuses mesures ont pu être réalisées sur cette maquette et elles constituent une base de comparaison solide qui pourra être confrontée aux données simulées, afin de quantifier les

écarts observables entre résultats de modélisation et mesures réelles. La validation des calculs de luminance de voile sera ensuite effectuée en se basant sur des données collectées par le CETU à la tranchée couverte du Noiret située près de Cruseilles (Haute Savoie), à l'aide du dispositif de mesure CAMEL présenté ci-après dans ce chapitre. A nouveau, ces mesures en conditions réelles seront confrontées aux résultats issus de la simulation afin de caler le modèle dynamique.

3.2 Choix du logiciel de modélisation

3.2.1 Etat de l'art sur les logiciels existants

Une première étape du travail de modélisation a été d'identifier les logiciels pouvant potentiellement répondre aux besoins que nous avons établis. Dans un premier temps, une liste a été réalisée dans laquelle la plupart des logiciels utilisés dans le domaine de l'éclairagisme ont été recensés. Cette liste est présentée en Tableau 3-1, les besoins principaux recherchés sont également détaillés. On remarque que l'on trouve des logiciels spécialisés dans le domaine des tunnels (Eclair-tunnel), mais également des logiciels plus généraux dont les champs d'application peuvent aller du dimensionnement d'éclairage pour des bâtiments ou des environnements extérieurs (Dialux, Revit, ...), à la simulation de rendu visuel pour des scènes définies (Ocean, Mitsuba, ...).

Tableau 3-1 Liste des logiciels envisagés et vérification de leur compatibilité avec les besoins formulés

	Possibilité de modéliser un éclairage naturel extérieur	Possibilité de modéliser un éclairage artificiel intérieur	Possibilité de considérer la dimension spectrale de l'éclairage	Possibilité de considérer les propriétés de réflexions directionnelles et spectrales des matériaux	Possibilité de scripter le logiciel
Agi32	✓	✓	✗	✗	?
Calculux	✗	✓	✗	✗	?
DIALux	✓	✓	✗	✗	?
Eclair-Tunnel	✓	✗	✗	✗	✓
Litestar 4D	✓	✓	✓	✓	?
MITSUBA	✓	✓	✓	✓	✓
OCEAN	✓	✓	✓	✓	✓
RADIANCE	✓	✓	✓	✓	✓
RELUX	✓	✓	✗	✗	?
Revit	✓	✓	✗	✗	?
Ulysse	✓	✓	✗	✗	?

Au vu de cette première pré-sélection, nous avons identifié 4 logiciels pouvant potentiellement nous convenir pour réaliser l'étape de modélisation. Ces logiciels étaient donc Litestar 4D (développé par Oxytech), MITSUBA (un logiciel libre de rendu visuel de scène), OCEAN (développé par Eclat-Digital) et Radiance (un logiciel libre relativement connu dans le domaine de l'éclairage et développé par le Lawrence Berkeley National Laboratory).

En premier lieu, il était nécessaire que les logiciels choisis aient passé des tests simples établis par la CIE (CIE 171 2006). Des prétests rapides ont ensuite été effectués sur ces 4 logiciels (première prise en main, essais de modélisation, ...). Il est apparu que les logiciels MITSUBA et Radiance fonctionnaient plutôt par code et ne proposaient pas nécessairement une interface graphique pour régler les paramètres de simulation, ce qui rendait leur prise en main plus complexe. Litestar 4D nécessitait quant à lui l'achat d'une licence. Le choix du logiciel de simulation s'est donc porté sur OCEAN, qui offrait toutes les fonctionnalités recherchées, une prise en main plus intuitive, et dont l'ENTPE possédait une licence.

3.2.2 Présentation succincte du logiciel

OCEAN est un logiciel de lancer de rayons physico-réaliste. Il modélise la distribution de la lumière dans une scène 3D, en se basant sur les lois de l'optique géométrique. Le rendu de modélisation s'appuie sur des capteurs placés dans la scène 3D, ces derniers pouvant être des caméras, des photoluminancemètres, ou encore des capteurs de lumière étendus donnant des informations sur l'éclairement mesuré sur un matériau.

OCEAN permet d'importer un modèle réalisé sous un logiciel de modélisation 3D (Sketchup, Rhinoceros, ...), puis de renseigner les propriétés de réflexion des matériaux du modèle, le type d'éclairage naturel, les propriétés des sources de lumière artificielles, etc. L'utilisateur doit enfin choisir le capteur utilisé pour la simulation. Dans le cadre de ce travail, deux capteurs ont été utilisés : « Ideal perspective camera », qui permet d'obtenir une image de la scène telle qu'elle serait vue par un appareil photo, tout en renseignant la valeur de luminance de chacun de ces pixels ; et « Surface light map » qui est un capteur permettant d'afficher les valeurs d'éclairement sur un matériau du modèle 3D (par exemple le matériau « chaussée » s'il a été défini dans la simulation). La Figure 3-1 montre un modèle 3D Sketchup, et les résultats obtenus après modélisation sous OCEAN pour les capteurs « Ideal perspective camera » (images 2 et 3) et « Surface light map » (image 4).

Ces capteurs seront utilisés dans la suite de cette étude afin de collecter des données de luminance ou d'éclairement sur des modèles de tunnel préalablement conçus sous Sketchup.

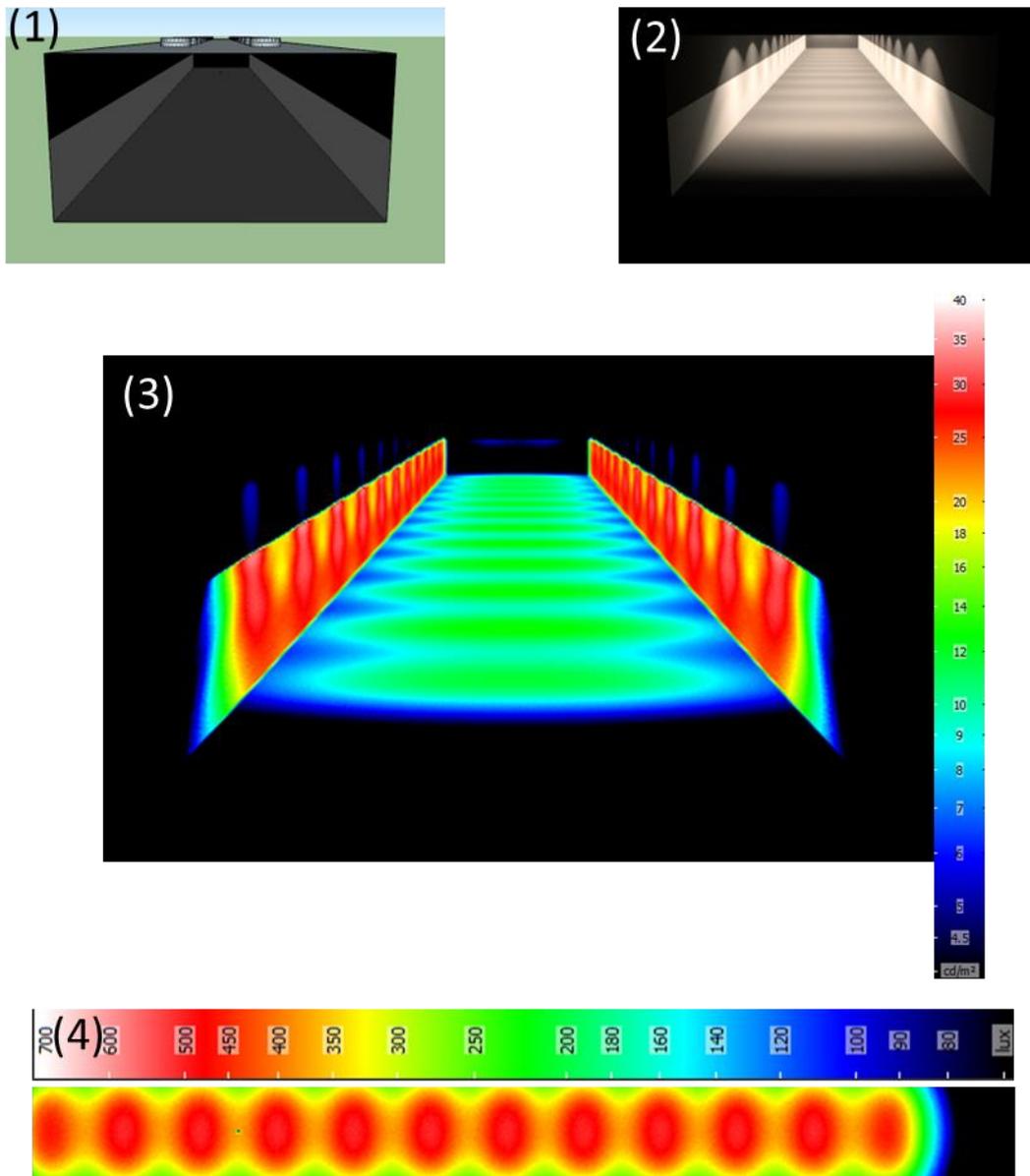


Figure 3-1 Visualisation du modèle 3D de la maquette. (1) Représentation sous Sketchup. (2) Rendu visuel sous OCEAN avec les luminaires allumés. (3) Carte de luminance réalisée sous OCEAN. (4) Capteur d'éclairage montrant les valeurs obtenues sur la chaussée de la maquette.

3.3 Modélisation de la section courante

3.3.1 Caractérisation géométrique et photométrique de la maquette de tunnel

3.3.1.1 Géométrie

Les dimensions de la maquette sont présentées en section **2.2.2.1 Maquette**. La Figure 3-2, résumant les principales dimensions de celle-ci, est rappelée ici.

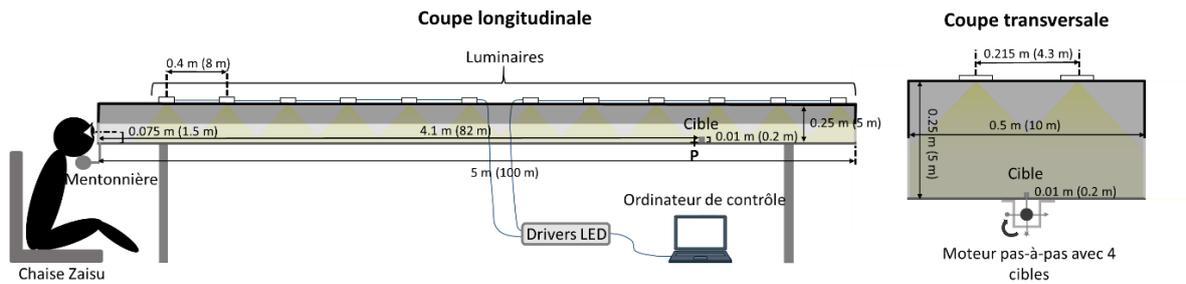


Figure 3-2 Dispositif expérimental. Les dimensions sont données pour la maquette à l'échelle 1/20 (les dimensions réelles théoriques sont données entre parenthèses)

3.3.1.2 Propriétés de réflexion spectrales et directionnelles des matériaux

Comme mentionné dans la section **2.2.2.1 Maquette**, les matériaux utilisés dans la maquette sont des panneaux de medium (matériau composite à base de fibres de bois) recouverts de différentes peintures mates. En première approximation, ils avaient été considérés comme parfaitement diffusants, puisque les besoins de l'expérience psycho-visuelle ne nécessitaient pas une approche plus complexe, et leurs facteurs de réflexion spectraux avaient été déterminés (voir Figure 2-2). Néanmoins, dans cette étape de modélisation, les propriétés de réflexion des matériaux utilisés constituent des données d'entrée du modèle, tout comme les mesures géométriques de la maquette. A ce titre, il est nécessaire de les fiabiliser au maximum puisque tout écart entraînera des répercussions sur les résultats photométriques obtenus en sortie dudit modèle. Ainsi, l'hypothèse initiale de matériaux parfaitement diffusants a été modifiée pour l'étape de modélisation, et il a été décidé d'utiliser des données de BRDF spectrales des matériaux. La BRDF est le quotient de la luminance énergétique mesurée sur une surface dans une direction donnée pour une certaine incidence de la source de lumière, par l'éclairement énergétique mesuré sur cette même surface. L'équation [3-1] donne la formulation de la BRDF. La Figure 3-3 résume le principe de mesure d'une BRDF.

$$BRDF(\theta_{out}, \varphi_{out}, \theta_{in}, \varphi_{in}) = \frac{L(\theta_{out}, \varphi_{out})}{E(\theta_{in}, \varphi_{in})} \quad [3-1]$$

Avec $L(\theta_{out}, \varphi_{out})$ la luminance mesurée sur le matériau à tester, dans la direction donnée (cd.m^{-2}) ;

$E(\theta_{in}, \varphi_{in})$ l'éclairement mesuré sur le matériau à tester (lx) ;

θ_{in} , φ_{in} , θ_{out} et φ_{out} donnés dans la Figure 3-3. Les grandeurs avec les indices « in » sont relatives à la source et les grandeurs avec les indices « out » sont relatives à la direction de mesure.

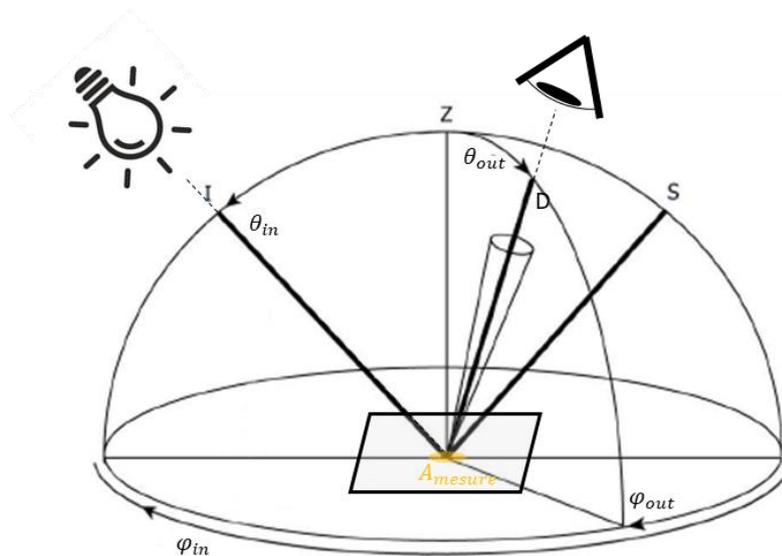


Figure 3-3 Représentation schématique de la méthode de mesure d'une BRDF

Avec : Le vecteur Z pointe vers le zénith ;

S indique la direction de réflexion spéculaire ;

I est la direction d'éclairement ;

$\theta_{in} = 0^\circ$ quand la source de lumière est située au zénith. Les valeurs sont négatives sur le premier quart de cercle évalué, et positive sur l'autre quart de cercle ;

φ_{in} est généralement constant et définit l'origine de l'angle des azimuts ;

D est la direction de réflexion de la lumière prise en compte dans la mesure ;

$\theta_{out} = 0^\circ$ quand le détecteur est situé au zénith ;

$\varphi_{out} = 0^\circ$ quand les vecteurs D, Z et I sont coplanaires.

A_{mesure} est la surface de la zone de mesure prise en compte par le détecteur ($2.83e-5 \text{ m}^2$).

La suite de cette partie détaille le protocole de mesure des BRDF pour les matériaux de la maquette, ainsi que les modifications et approximations qui ont dû être faites pour rendre ces données exploitables dans le modèle OCEAN.

Nous avons utilisé un spectrogoniophotomètre pour déduire la BRDF spectrale de chacun des 4 matériaux utilisés dans la maquette (chaussée, cible, moitié inférieure des piédroits et moitié supérieure des piédroits + plafond). L'appareil utilisé est appelé « Banc REFLET », il est produit par STIL S.A.S. et est présenté en Figure 3-4.

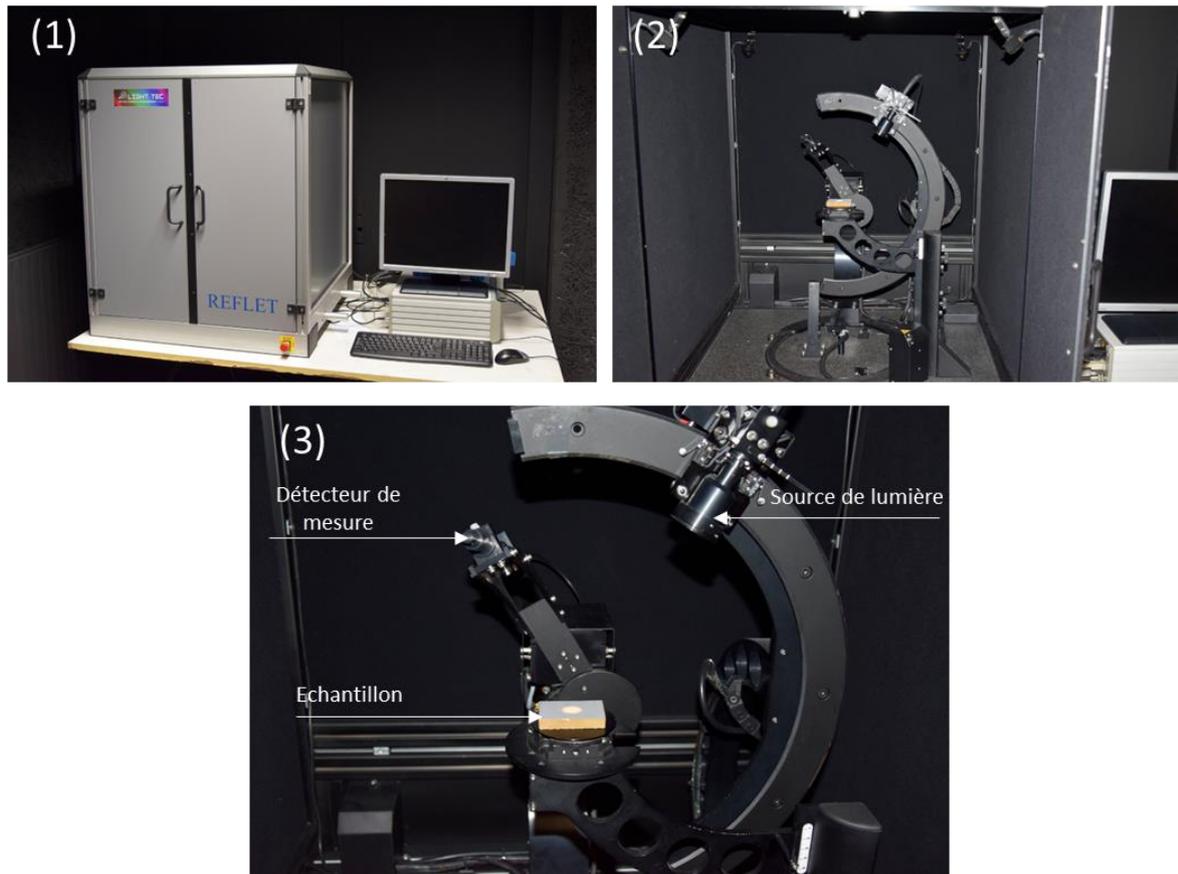


Figure 3-4 Spectrogoniophotomètre "Banc REFLET". (1) Caisson de mesure et ordinateur de collecte des données. (2) Appareil de mesure (vue éloignée). (3) Appareil de mesure (vue proche).

Les gammes de variations de chaque angle θ_{in} , φ_{in} , θ_{out} et φ_{out} utilisées pour les mesures sont présentées dans le Tableau 3-2.

Deux types de mesures ont été faites pour chacun des matériaux de la maquette : une mesure de BRDF en intensité et une mesure de BRDF spectrale.

La première est effectuée grâce à des photodiodes de sensibilités différentes, la seconde grâce à un spectromètre à CCD.

Mesure en intensité

Le principe d'acquisition des données en intensité se fait grâce à 4 photodiodes présentes dans le détecteur du Banc REFLET. Ces photodiodes mesurent une intensité lumineuse pour chaque direction d'observation choisie par l'observateur. Elles ont toutes des sensibilités différentes, afin de pouvoir couvrir une gamme d'intensités plus large. Les plages d'angles θ_{in} , φ_{in} , θ_{out} et φ_{out} mesurées sont présentées dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 Plages de mesure des différents angles permettant de caractériser la BRDF d'un matériau

Angle	Plage de mesure
θ_{in}	De 0° à -90° par pas de -10°
φ_{in}	0°
θ_{out}	De -90° à 90° par pas de 1°
φ_{out}	De 0° à 90° par pas de 10°

La Figure 3-5 résume schématiquement les zones de mesure prises en compte.

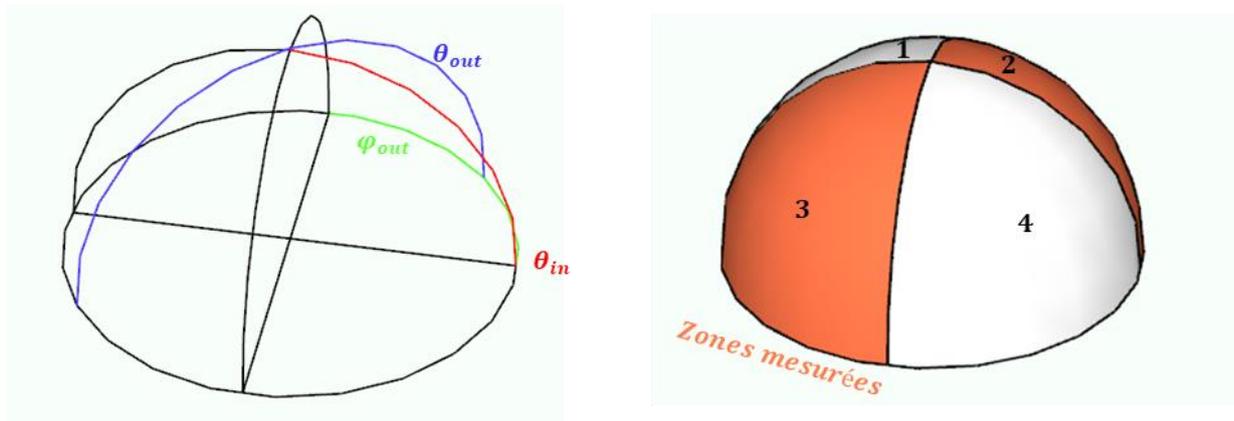


Figure 3-5 Représentation schématique des zones de mesure prises en compte lors de la caractérisation des BRDF avec le Banc REFLET

Les zones 1 et 4 sont déduites respectivement des zones 3 et 2 du fait que les matériaux que nous utilisons sont isotropes (panneaux de bois peints avec une peinture mat). La zone 4 aura donc un comportement identique à celui de la zone 2, et la zone 3 aura un comportement identique à celui de la zone 1.

Les données de sortie sont donc des intensités lumineuses (notées $S_{m_{int}}$), mais le Banc REFLET offre une fonction permettant de convertir ces données en BRDF. Pour ce faire, une mesure d'intensité sur un matériau de référence (dans notre cas matériau diffusant standard BN R98 SQ de Gigahertz Optik présentant un facteur de réflexion spectral de 0.98 sur tout le spectre visible) est effectuée pour des angles d'incidence de source et d'observation donnés ($\theta_{in} = -30^\circ$, $\varphi_{in} = 0^\circ$, $\theta_{out} = 30^\circ$ et $\varphi_{out} = 0^\circ$). Cette mesure de référence est notée $S_{ref_{int}}$ et permet une conversion des valeurs d'intensités mesurées pour le matériau grâce au procédé présenté ci-après.

$$BRDF(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out}) = \frac{L_m(\theta_{out}, \varphi_{out})}{E_m(\theta_{in}, \varphi_{in})} \quad [3-2]$$

Avec $L_m(\theta_{out}, \varphi_{out})$ la luminance mesurée sur le matériau dans la direction définie par les angles θ_{out} et φ_{out} (cd.m⁻²);

$E_m(\theta_{in}, \varphi_{in})$ l'éclairement mesuré sur le matériau pour une incidence de source définie par θ_{in} et φ_{in} (lx).

On peut exprimer l'intensité sortie par le Banc REFLET grâce à l'équation [3-3].

$$S_{m_{int}} = L_m(\theta_{out}, \varphi_{out}) A_{mesure} \cos \theta_{out} \quad [3-3]$$

Avec A_{mesure} la surface de mesure du détecteur du Banc REFLET (2.83e-5 m²) ;

En appliquant ensuite la loi de Bouguer, on peut exprimer E_{ref} , l'éclairement mesuré sur le matériau de référence en fonction de $E_m(\theta_{in}, \varphi_{in})$.

$$E_{ref} = \frac{I_{source} \cos \frac{\pi}{6}}{R^2} \quad [3-4]$$

$$E_m = \frac{I_{source} \cos \theta_{in}}{R^2} \quad [3-5]$$

$$E_{ref} = \frac{E_m \cos \frac{\pi}{6}}{\cos \theta_{in}} \quad [3-6]$$

Avec I_{source} l'intensité de la source de lumière (cd) ;

R la distance entre la source de lumière et le matériau à tester (m).

En reprenant l'équation [3-3] et l'équation [3-6], on peut modifier l'expression de l'équation [3-2] :

$$BRDF(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out}) = \frac{S_{m_{int}}(\theta_{out}, \varphi_{out}) \cos \frac{\pi}{6}}{A_{mesure} \cos \theta_{out} E_{ref} \cos \theta_{in}} \quad [3-7]$$

Puis en utilisant la loi de Lambert pour réécrire l'éclairement mesuré sur le matériau diffusant standard, on obtient :

$$BRDF(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out}) = \frac{\rho_{ref} S_{m_{int}}(\theta_{out}, \varphi_{out}) \left(\cos \frac{\pi}{6}\right)^2}{\cos \theta_{out} \pi \cos \theta_{in} S_{ref_{int}}} \quad [3-8]$$

Cette expression pose néanmoins un problème pour les angles rasants (θ_{in} ou $\theta_{out} = 90^\circ$ [180]) puisqu'on réalise dans ce cas une division par 0. Afin d'éviter cette situation, deux méthodes palliatives ont été appliquées :

- θ_{in} est fixé à 89° et non 90° dans le calcul de la BRDF pour la dernière position de la source.
- Une décroissance linéaire des valeurs de BRDF est forcée pour les angles θ_{out} rasants. En pratique, la valeur de BRDF obtenue pour $\theta_{out} = -84^\circ$ est prise en référence pour chaque φ_{out} pris en compte dans les mesures et une décroissance linéaire est appliquée afin que la valeur de BRDF soit égale à 0 pour $\theta_{out} = -90^\circ$ (la décroissance est faite pour chaque valeur de φ_{out} : on a une décroissance pour $\varphi_{out} = 30^\circ$, une autre pour $\varphi_{out} = 40^\circ$, etc.). On réalise le même procédé entre $\theta_{out} = 84^\circ$ et $\theta_{out} = 90^\circ$.

Une fois ces valeurs de BRDF déterminées pour chaque direction d'incidence de source et d'observation, elles sont modifiées en distributions spectrales en appliquant l'équation [3-9].

$$BRDF_{r\lambda}(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out}) = \rho_m(\lambda) \frac{BRDF(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out})}{M_{\rho_{380-780}}} \quad [3-9]$$

Avec $\rho_m(\lambda)$ le facteur de réflexion spectral du matériau obtenu pour la longueur d'onde λ (la méthode de mesure des facteurs de réflexion spectraux est présentée en section **2.2.2.1 Maquette**) ;

$M_{\rho_{380-780}}$ la moyenne des $\rho_m(\lambda)$ sur tout le spectre.

Les résultats obtenus pour les BRDF en intensité avant transformation en BRDF spectrales sont présentés en Figure 3-6 (Impossibilité de représenter une BRDF spectrale complète en 3D).

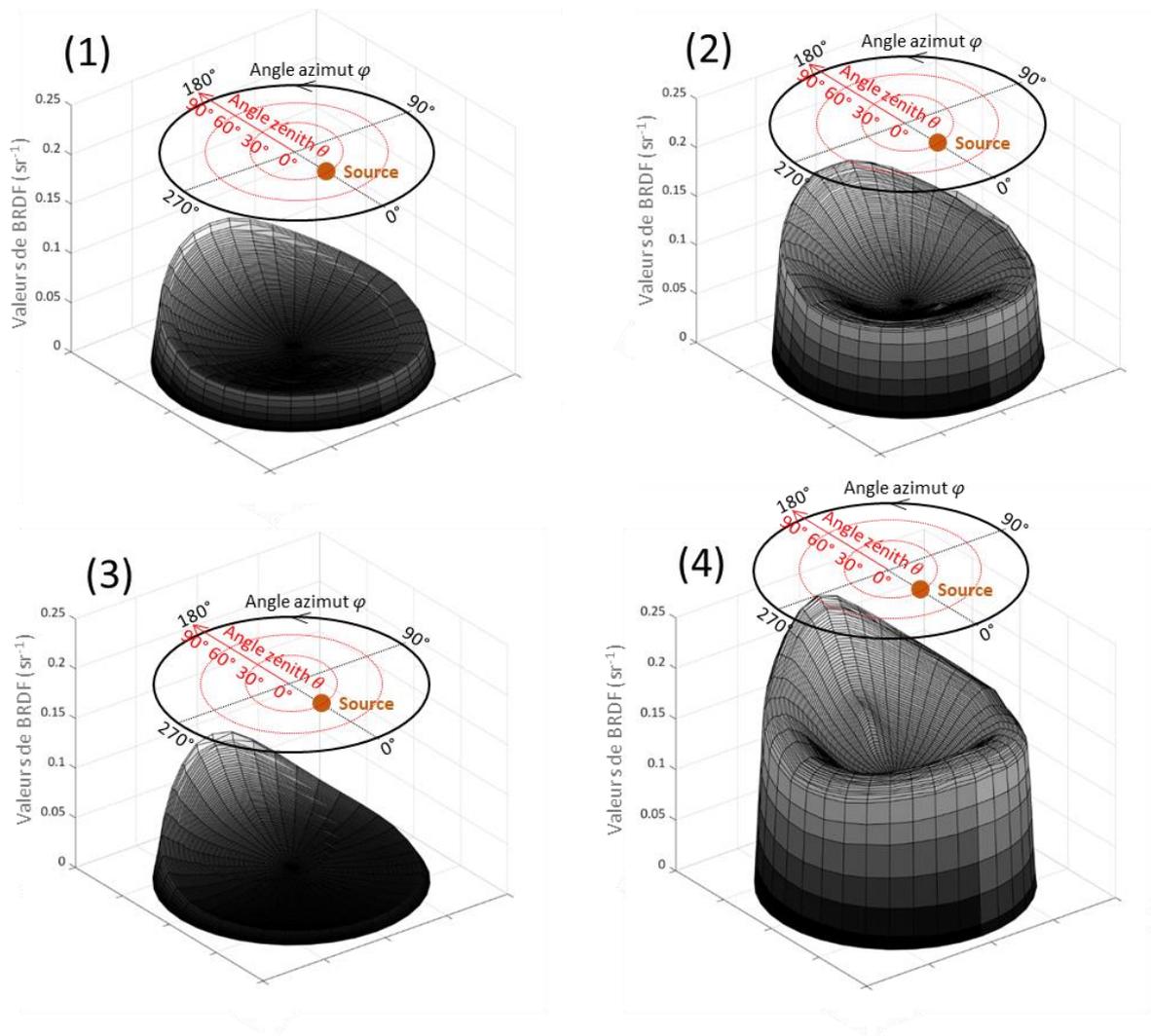


Figure 3-6 Exemples de BRDF 3D des matériaux de la maquette, issus des mesures en intensité du Banc REFLET. Tous les graphiques sont donnés pour $\theta_{in} = -30^\circ$. (1) BRDF de la chaussée. (2) BRDF de la cible. (3) BRDF du plafond. (4) BRDF du piédroit.

Mesure spectrale

Le principe d'acquisition des données spectrales est le suivant : un spectre réfléchi est mesuré pour le matériau de référence avec la source de lumière au zénith et le détecteur à quelques degrés du zénith (afin d'éviter qu'il n'occulte la source de lumière). Comme précisé précédemment, un spectromètre à CCD permet de réaliser cette mesure et d'acquérir des mesures d'intensité pour chaque longueur d'onde évaluée entre 380 et 780 nm. Ensuite, le matériau de la maquette à tester est mesuré pour une plage d'angles θ_{in} , φ_{in} , θ_{out} et φ_{out} permettant d'avoir une bonne visualisation spatiale de ses propriétés de réflexion. Les plages de mesure choisies sont les mêmes que celles utilisées pour la caractérisation de la BRDF en intensité (voir Tableau 3-2).

Le logiciel pilotant le Banc REFLET va ensuite calculer le ratio entre le signal mesuré pour le matériau à tester et le signal mesuré pour le matériau de référence, pour chaque longueur d'onde évaluée. Ce calcul est répété pour chaque position d'angles θ_{in} , θ_{out} et φ_{out} . Il est à noter que le signal mesuré pour le matériau de référence est défini pour une position de source et de détecteur donnée (les deux sont quasiment au zénith) : il n'est pas mesuré pour toutes les plages angulaires définies dans le Tableau 3-2, contrairement au signal mesuré pour le matériau de la maquette. Les fichiers créés par le logiciel contiennent donc ces ratios avec une position angulaire de source et de capteur définie pour chaque ligne, et les valeurs des ratios données en colonne pour chaque longueur d'onde évaluée.

Un des principaux problèmes auxquels la mesure spectrale s'est heurtée, est la nature de la source de lumière utilisée dans le Banc REFLET. L'appareil était équipé d'une source dont l'énergie spectrale est relativement faible dans les courtes longueurs d'onde (inférieures à 530 nm), mais également à proximité du domaine infrarouge (au-delà de 720 nm). Le signal mesuré sur ces plages de longueurs d'onde était trop proche du bruit produit par le système de mesure et le rapport signal/bruit n'était pas suffisamment élevé pour que les résultats soient exploitables. Les données ont donc dû être corrigées avant d'être exploitées dans le logiciel de simulation. La méthode de correction spectrale consistait à utiliser le facteur de réflexion spectral du matériau considéré (mesuré à l'aide du spectroradiomètre JETI 1211 UV en lumière naturelle, selon la méthode présentée en section **2.2.2.1 Maquette**) et de remplacer chacune des distributions spectrales du Banc REFLET obtenues pour les différentes valeurs d'angles d'incidence de source et d'observation par la distribution typique de ce facteur de réflexion. Pour ce faire, la moyenne des valeurs de BRDF spectrale sur la plage de longueurs d'onde 530 nm – 720 nm a été calculée pour chacune des directions d'incidence de source et chacune des directions de mesure. La moyenne des valeurs de facteurs de réflexion spectraux du matériau sur cette même plage de longueurs d'onde a également été calculée. Enfin, chaque valeur de BRDF obtenue pour chaque longueur d'onde a été prise égale au facteur de réflexion spectral du matériau pour la longueur considérée, multipliée par le

rapport de la moyenne des valeurs de BRDF spectrale sur la moyenne des valeurs de facteurs de réflexion spectraux du matériau.

La Figure 3-7 résume graphiquement la méthode employée.

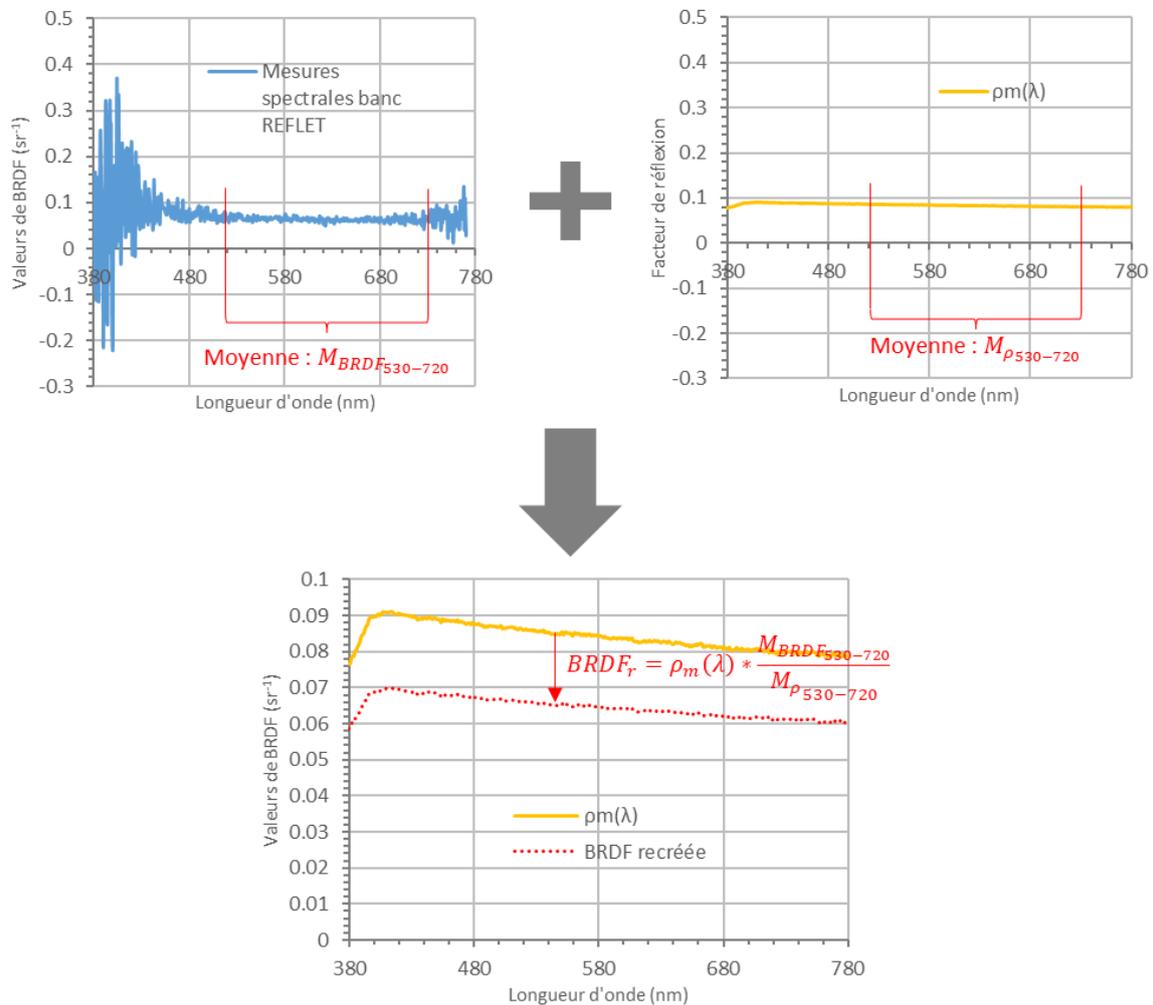


Figure 3-7 Résumé de la méthode de correction des données spectrales issues des mesures du Banc REFLET

La méthode de correction appliquée est plus amplement présentée en **annexe F : Dispositifs de mesure**.

Les résultats finaux obtenus pour les BRDF spectrales des différents matériaux de la maquette sont présentés en Figure 3-8. Afin de pouvoir représenter ces BRDF sous forme 3D, une seule longueur d'onde est considérée ici, en l'occurrence $\lambda = 555 \text{ nm}$.

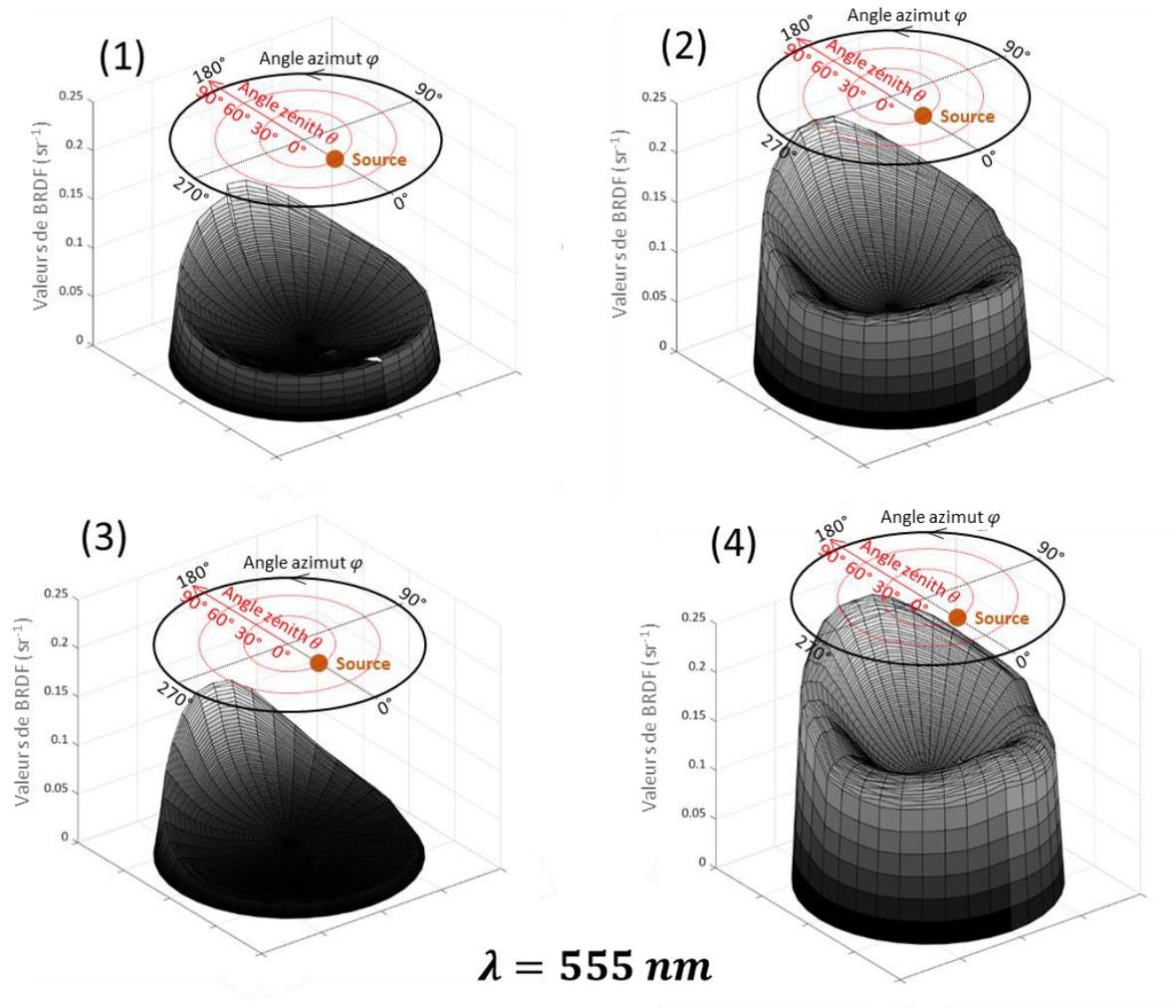


Figure 3-8 Exemples de BRDF 3D des matériaux de la maquette, issus des mesures spectrales du Banc REFLET. Tous les graphiques sont donnés pour $\theta_{in} = -30^\circ$ et $\lambda = 555 \text{ nm}$. (1) BRDF de la chaussée. (2) BRDF de la cible. (3) BRDF du plafond. (4) BRDF du piédroit.

Une fois les deux jeux de données corrigés (mesures en intensité du Banc REFLET et mesures spectrales du Banc REFLET), on dispose donc de deux types de BRDF spectrales différents pour les 4 matériaux de la maquette. Les BRDF spectrales issues de la correction des mesures en intensité du Banc REFLET sont appelées BRDF en intensité corrigée dans la suite, et les BRDF spectrales issues de la correction des mesures spectrales du Banc REFLET sont appelées BRDF spectrales corrigées.

Ces données de BRDF peuvent être utilisées dans OCEAN pour caractériser les propriétés de réflexion du matériau concerné. Cette étape est présentée ci-après dans la section **3.3.2.2 Hypothèses de modélisation**.

3.3.1.3 Nature des sources

Les sources LEDs utilisées dans la maquette, et présentées en section **2.2.2.2 LEDs Chips On Board (COBs)** ont fait l'objet d'une caractérisation photométrique afin de reproduire le plus fidèlement possible leur indicatrice d'intensité dans le modèle numérique. Elles ont également fait l'objet d'une mesure de flux à l'aide d'une sphère d'Ulbricht.

Caractérisation de l'indicatrice d'intensité

Le protocole de caractérisation utilisait un spectroradiomètre JETI SPECBOS 1211 UV monté sur un goniophotomètre. Une des puces LEDs utilisées pour éclairer la maquette était placée au centre du banc et des mesures spectrales étaient réalisées à l'aide du spectroradiomètre selon différentes directions angulaires. En pratique, ces mesures étaient faites tous les 10° et couvraient la plage d'angle de -80° à $+80^\circ$ (la position à 0° correspondait au spectroradiomètre placé dans l'axe de la normale à la puce LED). Seules les puces blanche et ambre de la source LED ont été testées. Elles ont chacune fait l'objet de deux séries de mesures : l'une dans le plan longitudinal du circuit imprimé sur lequel les puces LEDs sont montées et l'autre dans le plan transversal. La Figure 3-9 présente succinctement le dispositif de mesure.

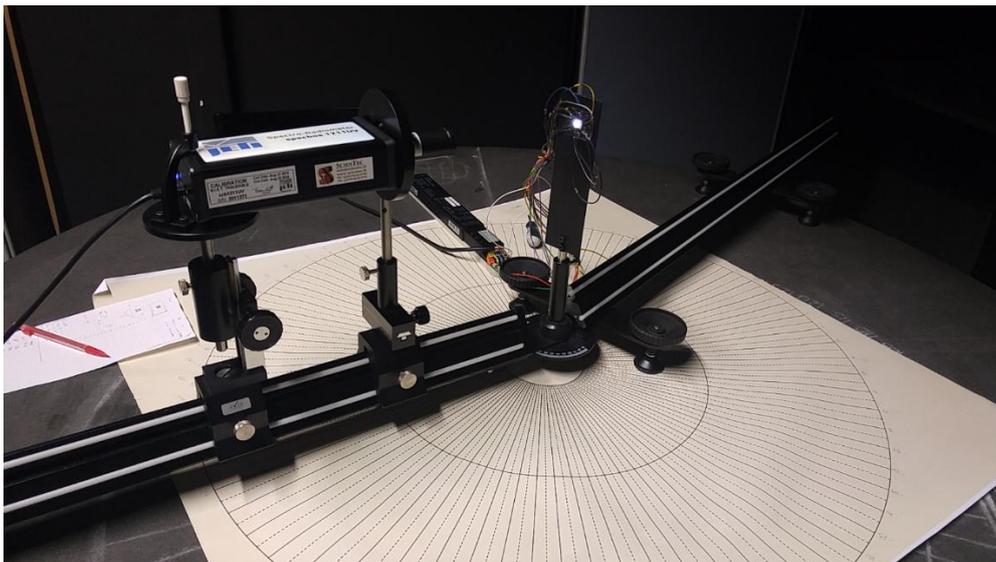


Figure 3-9 Dispositif de mesure de l'indicatrice d'intensité des LEDs

Les résultats des mesures réalisées sur la puce blanche sont présentés en Figure 3-10, ils sont comparés aux données fabricant. Il est à noter que les résultats obtenus pour la puce ambre étaient quasiment identiques à ceux présentés en Figure 3-10, ce qui nous a incité à ne pas mesurer les autres LEDs.

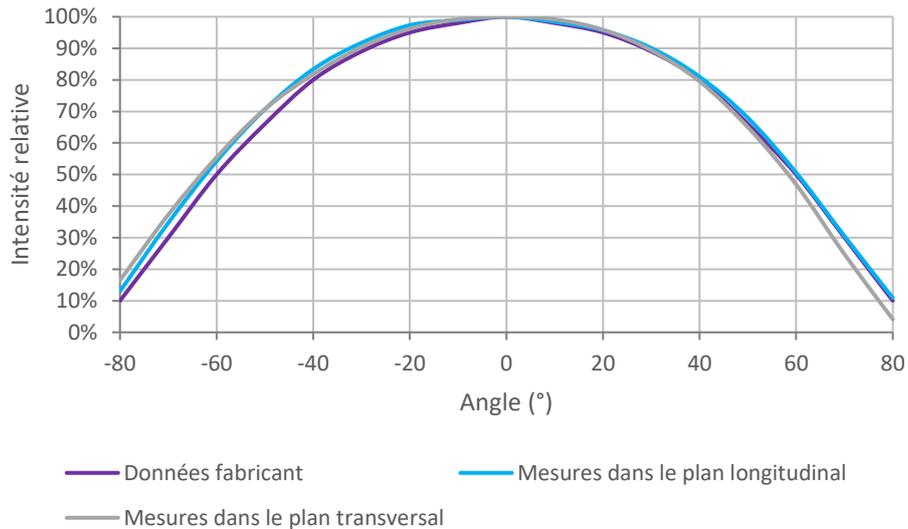


Figure 3-10 Schémas théorique et mesurés de l'intensité relative de la puce blanche

Les résultats ont montré que les distributions spatiales des intensités des puces blanche et ambre dans le plan longitudinal sont globalement les mêmes que ceux dans le plan transversal. Ils coïncident de plus relativement bien avec les données fabricant. Les écarts les plus importants constatés sont plutôt associés à des angles rasants, pour lesquels la mesure est complexe puisque la zone de mesure devient très étendue et prend par conséquent en compte les fils électriques, le circuit imprimé, voire des éléments de décor situés en arrière-plan. Ces mesures en angles rasants sont donc relativement imprécises et il est logique que des écarts soient constatés avec les données fabricant pour ces conditions de mesure. Des indicateurs statistiques sont utilisés pour caractériser les écarts entre le modèle de distribution spatiale des intensités proposé par le fabricant et celles mesurées dans le plan longitudinal et transversal. Ces indicateurs sont l'erreur de biais moyen (Mean Bias Error = MBE) et l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error = RMSE). Le coefficient R2 de Pearson est également calculé. Toutes les formules sont rappelées en **annexe G : Calculs statistiques**.

Les résultats obtenus pour les mesures dans le plan longitudinal et transversal sont présentés dans le Tableau 3-3.

Comme le laissait supposer les graphiques des distributions spatiales des intensités, les résultats obtenus par la mesure sont très proches des données fournies par le constructeur. Ces dernières seront donc utilisées par la suite, notamment dans les paramètres d'entrée des modélisations OCEAN. La Figure 3-11 présente une vue 3D de la distribution des intensités des sources modélisée sous Dialux.

Tableau 3-3 Comparaison des mesures avec les données fabricant, dans les plans longitudinal et transversal pour la puce blanche et la puce ambre.

		MBE	RMSE	R2 de Pearson
LED blanche	Mesures dans le plan longitudinal	2%	2%	1
	Mesures dans le plan transversal	1%	4%	0.99
LED ambre	Mesures dans le plan longitudinal	1%	3%	1
	Mesures dans le plan transversal	0%	2%	1

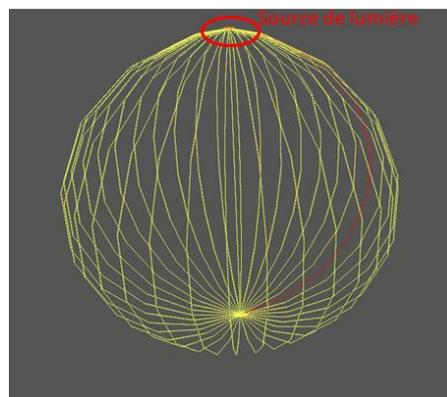


Figure 3-11 Représentation 3D de la distribution des intensités des sources dans la maquette, modélisée sous Dialux

Mesure du flux lumineux

Les LEDs étant montées en série sur le tunnel (voir section **2.2.2.2 LEDs Chips On Board (COBs)**), une valeur de DMX passée en commande à une seule source ne donne pas le même flux lumineux que celui d'une des sources incluses dans le circuit en série de 12 LEDs, puisque la tension aux bornes du circuit n'est pas la même. Ainsi, la mesure du flux lumineux produit par chacune des LEDs de la maquette a dû se faire directement à l'intérieur en utilisant une sphère d'Ulbricht miniature spécialement conçue pour l'occasion et présentée en Figure 3-12. Une des LEDs étaient placées au niveau de l'ouverture pratiquée dans la sphère, cette dernière étant située à l'intérieur de la maquette. Le dispositif de mesure placée à l'intérieur de la sphère était une Puce AS7261 de la marque AMS (voir **annexe F : Dispositifs de mesure**).

La création de la sphère d'Ulbricht et sa calibration sont présentées plus en détail en **annexe F : Dispositifs de mesure**. Les résultats finaux obtenus à l'issue de ces étapes, donnant le flux lumineux d'une des sources LEDs pour un des spectres de l'expérience psycho-visuelle en fonction du palier d'éclairement choisi, sont présentés en Figure 3-13.

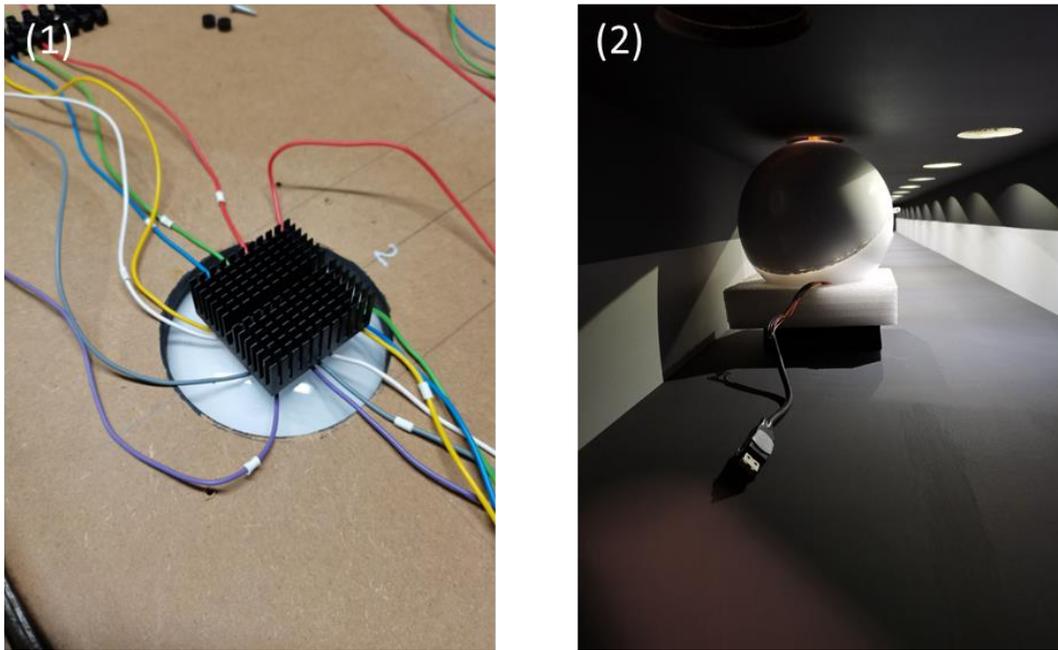


Figure 3-12 Dispositif de mesure du flux des LEDs dans la maquette. (1) Vue du dessus de la maquette, la LED est placée sur l'orifice de la sphère d'Ulbricht située dans le tunnel. (2) Sphère d'Ulbricht à l'intérieur du tunnel pendant une mesure.

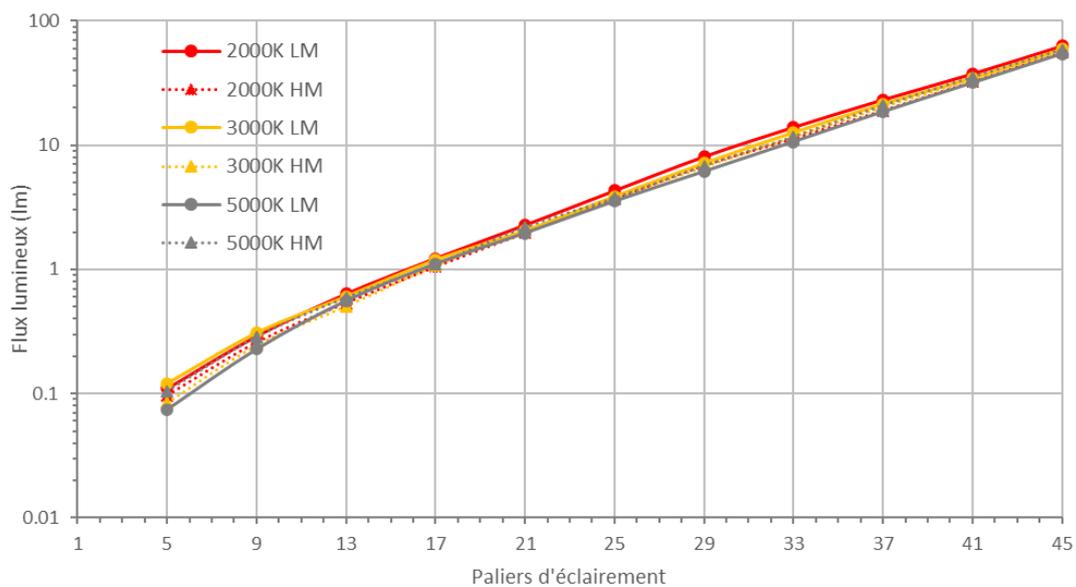


Figure 3-13 Flux lumineux mesuré pour une seule LED pour les différents spectres utilisés dans l'expérience en fonction du palier d'éclairage choisi

3.3.1.4 Luminance de chaussée et de piédroits

Des mesures de luminance ont également été réalisées dans la maquette afin de pouvoir confronter les valeurs réelles mesurées et les valeurs obtenues dans le modèle numérique. Cette confrontation a notamment permis de valider le modèle et de caractériser les écarts que celui-ci présente avec la réalité.

Ces mesures de luminance ont donc été menées en suivant un protocole précis, répétable dans le modèle numérique. Les spectres mesurés ont été ceux utilisés lors de l'expérience de visibilité et dont les caractéristiques sont présentées en section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairage**. Chacun des 44 paliers d'éclairage non nuls utilisés pour chaque spectre a fait l'objet d'une mesure de luminance (présentée en section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairage**) réalisée à l'aide d'un vidéo-photomètre, le LMK5-5L type TTDCD540 n°TTF8625 prêté par le CETU et étalonné deux mois avant les mesures.

La comparaison des mesures de luminances réelles et des résultats obtenus avec le modèle numérique s'est faite en des points clairement identifiés pour que celle-ci fasse sens. Afin de caractériser la position de ces points dans les différentes cartes de luminance établies, des grilles de mesure ont été placées sur la chaussée et les piédroits en fin de session de mesure (la position de l'appareil était donc exactement la même que lors de la session de mesure des paliers d'éclairage des différents spectres évalués). La Figure 3-14 montre une photographie des grilles de mesure de chaussée et de piédroit placées dans le tunnel. En pratique, un mur de la maquette de tunnel était retiré, et les grilles (papier pour la grille de chaussée et carton plume pour la grille de piédroit) étaient placées sur les surfaces correspondantes.



Figure 3-14 Prise de vue des grilles de mesure à l'intérieur de la maquette avec un objectif Fish Eye

Les dimensions des grilles utilisées étaient clairement définies afin de pouvoir localiser précisément la position de chacun des points de mesure la composant dans le tunnel. Elles sont présentées en Figure 3-15 et en Figure 3-16.

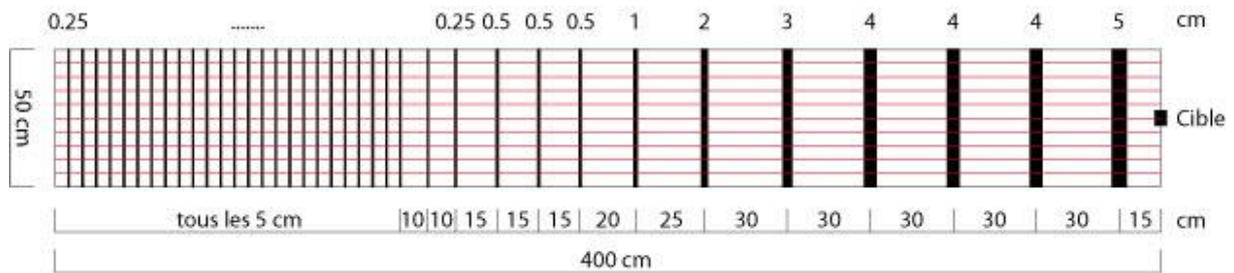


Figure 3-15 Grille de mesure théorique pour les mesures de luminance sur la chaussée de la maquette

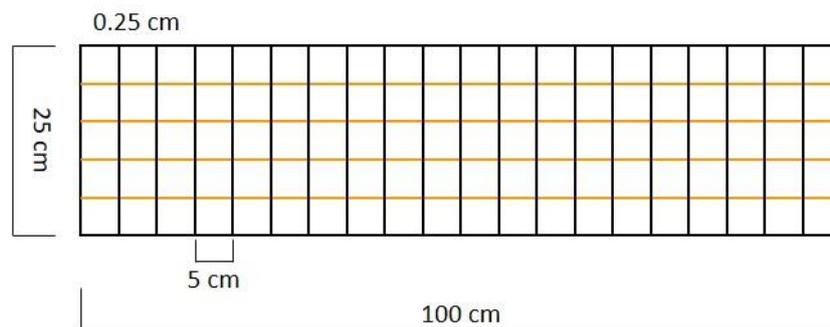


Figure 3-16 Grille de mesure théorique pour les mesures de luminance sur le piédroit gauche de la maquette

Les lignes de mesures transversales sont plus épaisses à proximité de la cible pour la grille de chaussée, sinon les intersections n'étaient pas visibles sur les images issues du LMK.

La grille de mesure du piédroit était déplacée et plusieurs acquisitions de cartes de luminance étaient réalisées afin de couvrir les 4 mètres séparant l'entrée du tunnel de la cible. 4 images étaient donc prises avec la grille couvrant à chaque fois un mètre de longueur.

Les lignes de mesure transversales sont numérotées en partant de celle qui est la plus proche de la cible (pour la grille de chaussée et pour la grille de piédroit).

Les cartes de luminance mesurées avec le LMK lorsque les grilles de mesure étaient disposées à l'intérieur du tunnel étaient ensuite importées dans Matlab. Les coordonnées des pixels de l'image correspondant à l'intersection des lignes des grilles de mesure pouvaient ensuite être relevées. Ces coordonnées étant associées à une position précise dans le tunnel et l'appareil de mesure étant dans la même position pour toutes les mesures de cartes de luminance, il était possible d'associer des valeurs de luminance obtenues pour les paliers d'éclairément des différents spectres à des positions dans le tunnel. La Figure 3-17 montre un exemple de carte de luminance obtenue lorsque les grilles de mesure étaient placées dans le tunnel. C'est à partir de ces cartes que les coordonnées de chacun des pixels correspondant aux points de la grille dans l'image ont pu être déterminées.

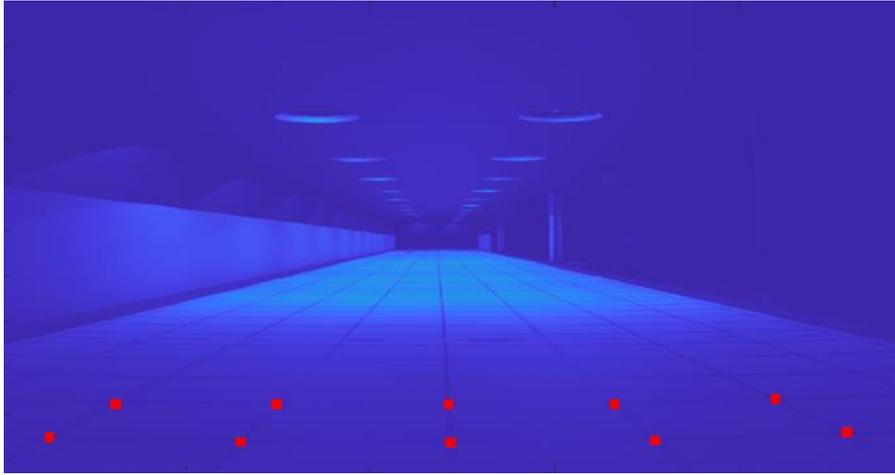


Figure 3-17 Carte de luminance issue des fichiers de mesure LMK et représentée dans Matlab. Les points rouges donnent des exemples de points d'intersection de la grille de mesure

Les détails de comparaison des valeurs de luminance réelles obtenues sur les points des grilles de mesure et des données générées grâce au modèle numérique sont plus amplement présentés dans la section **3.3.2.4 Résultats en luminance**.

3.3.1.5 Eclairéments de chaussée

Des mesures d'éclairément ont été réalisées dans un second temps, toujours dans le but de caler le modèle numérique. Les spectres pris en compte pour les mesures étaient également ceux utilisés lors de l'expérience de visibilité présentée dans le chapitre précédent. Seuls les paliers d'éclairément maximaux ont fait l'objet de mesure.

Les mesures ont été réalisées grâce à un capteur permettant de mesurer les coordonnées trichromatiques XYZ du stimulus lumineux étudié (Puce AS7261 de la marque AMS, même dispositif que celui utilisé dans la sphère d'Ulbricht). Cette puce était recouverte d'un diffuseur afin de collecter la lumière incidente dans un hémisphère et non pas seulement dans un cône plus restreint (voir description du dispositif en **annexe F : Dispositifs de mesure**).

Tout comme pour la luminance, la comparaison des mesures d'éclairément et des données obtenues avec le modèle numérique s'est faite en des points précis de la chaussée afin que celle-ci fasse sens. La grille de mesure utilisée est présentée en Figure 3-18.

La grille de mesure utilisée pour l'éclairément comprenait moins de points que celle utilisée pour la luminance, pour des raisons de temps de mesure explicitées ci-après.

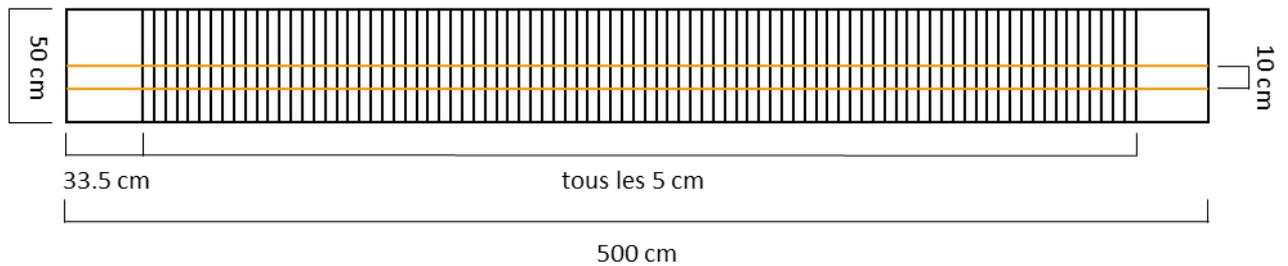


Figure 3-18 Grille de mesure théorique pour les mesures d'éclairage sur la chaussée de la maquette

En pratique, la puce de mesure était montée sur un mètre ruban peint de la couleur de la chaussée (afin de ne pas impacter les propriétés de réflexion de cette dernière pendant les mesures). Un fil était tendu à l'intérieur du tunnel, de l'entrée jusqu'à la plaque de fond, et servait de guide à la puce de mesure. Le mètre ruban était ensuite déroulé à l'intérieur du tunnel et la puce était placée sur le point de la ligne de mesure considérée le plus éloigné de l'entrée du tunnel. Une mesure était alors réalisée, puis le mètre ruban était enroulé doucement jusqu'à ce que la puce atteigne le point de mesure suivant, une nouvelle mesure était alors réalisée, et l'opération était ainsi répétée pour toute la ligne de mesure. Le fil permettait donc de guider la puce le long d'une ligne de mesure : il était changé de position lorsque l'on avait besoin de passer à la ligne de mesure suivante. Cette méthode était relativement chronophage puisqu'elle imposait de réaliser 88 mesures par ligne de mesure longitudinale pour chaque spectre (soit 176 mesures par spectre et 528 mesures au total).

La Figure 3-19 résume le fonctionnement du dispositif de mesure présenté ci-dessus.

Les détails de comparaison des valeurs d'éclairage obtenues sur les points de la grille de mesure et des données générées grâce au modèle numérique sont plus amplement présentés dans la section **3.3.2.3 Résultats en éclairage**.

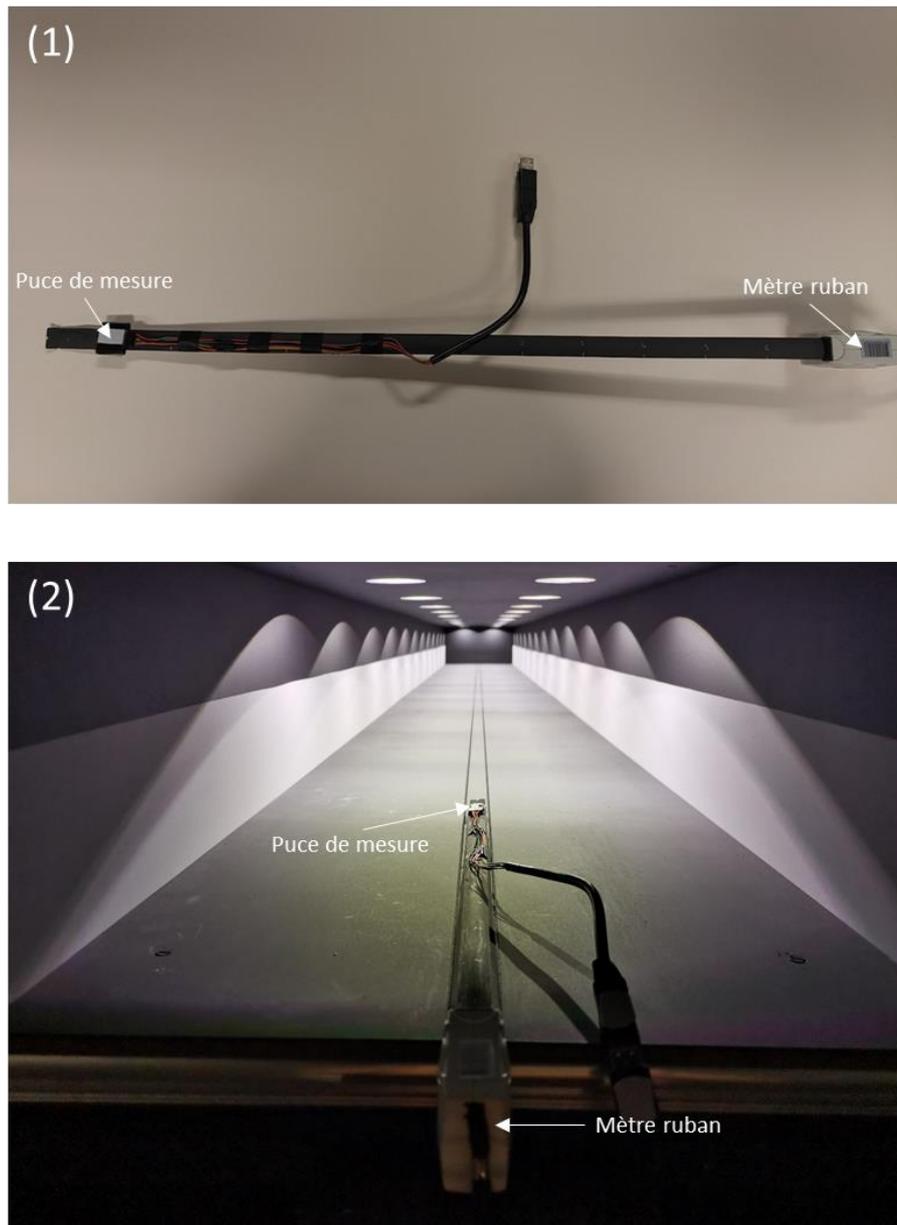


Figure 3-19 Dispositif de mesure d'éclairage sur la chaussée de la maquette. (1) Vue du dessus du dispositif. (2) Exemple de réalisation de mesure à l'intérieur de la maquette.

3.3.2 Comparaison avec les résultats de simulation

3.3.2.1 Résultats du modèle numérique

Les données mesurées sur la maquette ont ensuite été comparées avec des données de simulation effectuées sous OCEAN, afin de tester la fiabilité des résultats obtenus et l'impact des différents paramètres d'entrée sur ces derniers. Dans un premier temps, la maquette a été modélisée sous Sketchup (voir Figure 3-20), puis le modèle 3D ainsi obtenu a été importé sous OCEAN afin de réaliser les simulations.

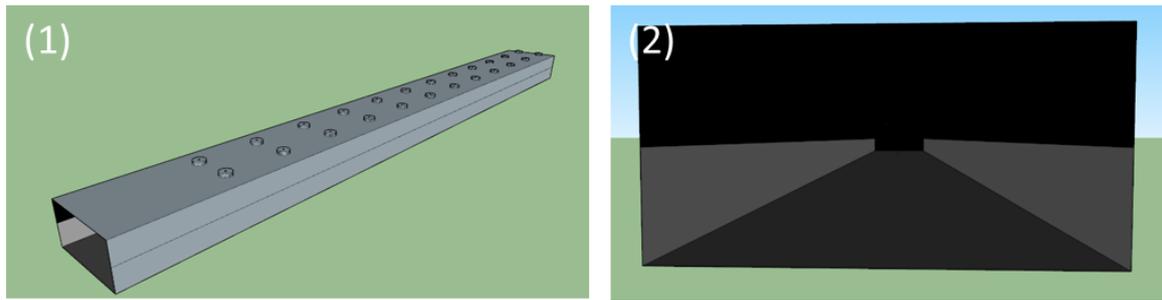


Figure 3-20 Modélisation Sketchup de la maquette. (1) Vue extérieure du modèle 3D sous Sketchup. (2) Vue intérieure du modèle 3D sous Sketchup.

Il est à noter que dans toute la suite de cette partie, seuls les spectres LM de l'expérience psycho-visuelle sont étudiés (2000K LM, 3000K LM et 5000K LM) puisque l'analyse statistique des données obtenues lors de l'expérimentation psycho-visuelle n'a pas permis de mettre en évidence une différence de résultats entre les spectres LM et HM pour une même température de couleur. L'objectif de cette partie a été de réaliser des simulations spectrales et de comparer les résultats obtenus avec les données mesurées sur la maquette. L'usage de simulations spectrales permet d'obtenir un résultat juste physiquement, et pas seulement un rendu visuel (Deville et al. 1994). Leur utilisation n'est pas courante en éclairage routier, et a fortiori en éclairage de tunnel. Habituellement, leur usage est plutôt réservé à l'éclairage intérieur afin de quantifier les expositions des différents photorécepteurs d'un usager lambda (Pierson, Aarts, et Andersen 2021; 2022). La comparaison des données de simulation et des mesures réelles s'est faite pour des valeurs d'éclairagements, mais également de luminances. Ainsi, afin d'obtenir les résultats de simulation les plus proches possibles des mesures, les propriétés de réflexion des différentes surfaces de la maquette ont dû être définies de la manière la plus précise possible. Nous avons donc choisi d'utiliser des BRDF spectrales des différents matériaux de la maquette en paramètre d'entrée des simulations. La comparaison que nous avons effectuée a consisté à injecter des données de BRDF mesurées, dans un logiciel de simulation physico-réaliste afin de caractériser les propriétés de réflexion des différentes surfaces du modèle. Il s'agissait ensuite de comparer les résultats obtenus en termes de luminance avec des mesures effectuées à l'aide d'un photoluminancemètre. Cette approche n'est pas fréquente. Généralement, la comparaison de données de BRDF mesurées se fait directement avec des modèles de BRDF (type Phong, Oren Nayar, Cook-Torrance, ...) : on teste donc les écarts entre les deux jeux de données (Ngan, Durand, et Matusik 2005; Āurikovič et Mihálik 2014; Bieron et Peers 2020). Dans notre cas, l'objectif n'est pas de quantifier les écarts entre un modèle de BRDF et une mesure de BRDF, mais de vérifier que l'utilisation de BRDF mesurées passées en paramètres de simulation permet d'obtenir des valeurs de luminance en sortie proches de celles mesurées. L'utilisation de données de BRDF en tunnel est relativement rare. Les données de réflexion utilisées pour les chaussées prennent en compte les conditions d'observation typiques d'un conducteur en conditions réelles (coefficients de clarté du CETU ou tables R de la CIE, voir **annexe D : Caractérisation des propriétés de réflexion du**

revêtement de chaussée en éclairage routier), ce qui signifie que les réflexions directes de la lumière sont déjà prises en compte pour des conditions d'observation appropriées. Ainsi, l'utilisation de BRDF permettrait simplement de mieux prendre en compte la direction d'incidence des sources et les multi-réflexions au sein de l'ouvrage. Cet aspect n'a jamais vraiment été développé en tunnel (Iacomussi et Rossi 2019). Certaines études se sont intéressées aux BRDF des matériaux utilisés en tunnel de manière marginale : He et al. (S. He et al. 2022) ont travaillé sur des BRDF de piédroits et sur leur impact sur l'éclairage au niveau de la chaussée. Les résultats ont montré que la prise en compte de ces BRDF permettaient d'obtenir des valeurs d'éclairages calculées plus proches des données mesurées, que le simple calcul lambertien (erreur relative par rapport à la mesure de 3.6% pour le calcul à l'aide des BRDF, contre 18% pour le calcul lambertien). Les comparaisons des données de luminance n'ont en revanche pas été effectuées : l'étude de He et al. s'intéresse donc seulement aux multi-réflexions et pas aux réflexions directes. Notre étude vise ainsi à vérifier que le logiciel OCEAN peut permettre de produire des simulations spectrales fiables, et que l'utilisation de données de BRDF mesurées passées en paramètres d'entrée de simulation permet d'améliorer la justesse des résultats en luminance.

3.3.2.2 Hypothèses de modélisation

Modélisation des BRDF mesurées dans la maquette

En étape préliminaire, différentes BRDF ont été modélisées pour tous les matériaux de la maquette. Comme on a pu le voir en section **3.3.1.2 Propriétés de réflexion spectrales et directionnelles des matériaux**, on dispose déjà de deux BRDF spectrales différentes pour chacun des matériaux de la maquette. En ajoutant ensuite la BRDF spectrale de chaque matériau, on compte un total de 3 données de BRDF différentes utilisables sous OCEAN :

- Les BRDF spectrales théoriques lambertiennes des matériaux, présentant des facteurs de réflexion spectraux égaux à la distribution typique (voir section **2.2.2.1 Maquette**, Figure 2-2) mesurée au spectroradiomètre pour chacun d'eux en lumière naturelle (fonctionnalité offerte directement par OCEAN) ;
- Les BRDF spectrales issues de la correction des mesures en intensité réalisées par le Banc REFLET (importation des données en fichiers csv dans OCEAN), telle que présentée dans la section **3.3.1.2 Propriétés de réflexion spectrales et directionnelles des matériaux** (voir Figure 3-6) ;
- Les BRDF issues de la correction des mesures spectrales réalisées par le Banc REFLET (voir Figure 3-8).

A titre d'exemples, la Figure 3-21 présente les rendus visuels théoriques du matériau « chaussée » après modélisation par le logiciel OCEAN, obtenus pour ces différents types de BRDF.

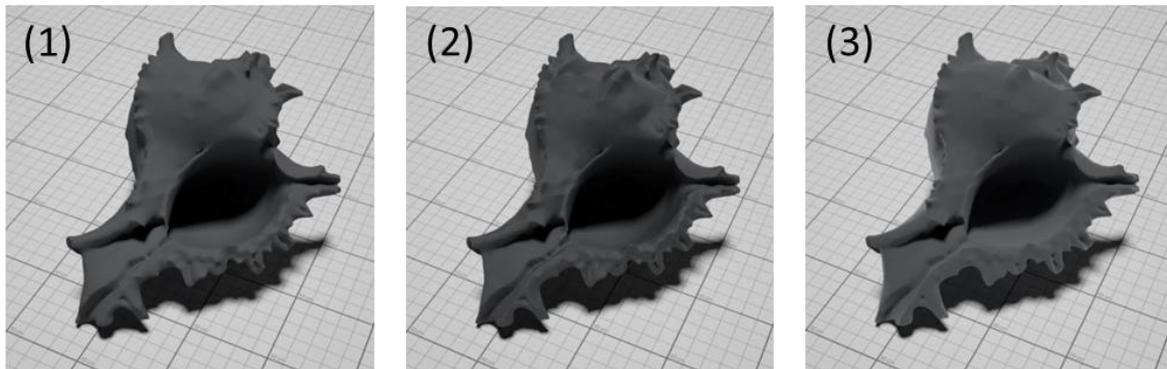


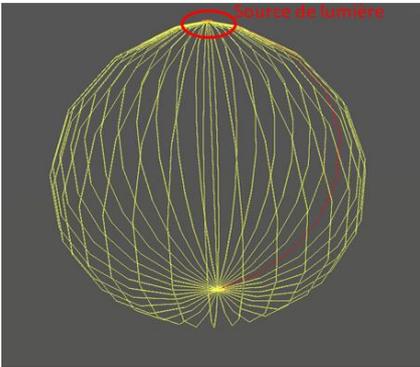
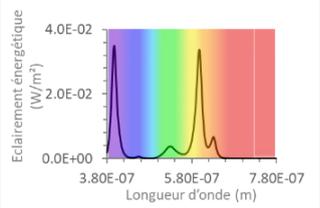
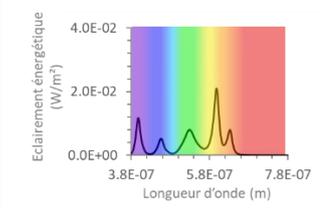
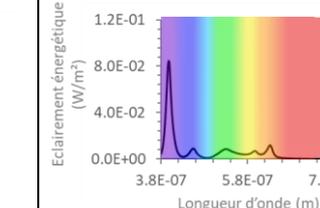
Figure 3-21 Représentation des différentes BRDF de chaussée sous OCEAN (source de lumière au zénith, avec le spectre de l'illuminant D65 de la CIE). (1) BRDF lambertienne ; (2) BRDF issue de la correction des mesures en intensité ; (3) BRDF issue de la correction des mesures spectrales.

La BRDF lambertienne semble lisser les aspérités du matériau, la BRDF spectrale corrigée semble d'une part donner un matériau plus clair, et d'autre part présenter des propriétés spéculaires plus importantes.

Modélisation des sources de lumière

La géométrie des sources de lumière est représentée dans le modèle 3D Sketchup. Avant de pouvoir lancer des simulations, OCEAN nécessite des renseignements sur la distribution du flux des luminaires et sur leur spectre. La valeur de flux de chacun des luminaires est récupérée à partir des données obtenues par mesure avec la sphère d'Ulbricht et présentées en section **3.3.1.3 Nature des sources**. L'indicatrice des intensités est indiquée via un fichier IES (IES 2019) recréé à partir des données fournies par le constructeur puisque ces dernières sont très proches des données mesurées et présentées en section **3.3.1.3 Nature des sources**. Enfin, les spectres sont récupérés à partir des éclairagements énergétiques spectraux mesurés sur la chaussée dans le cadre de l'expérience psycho-visuelle, pour les paliers d'éclairage maximaux (voir section **2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairage**). Toutes ces données sont résumées dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 Caractéristiques des sources de lumière utilisées pour produire les spectres de l'expérience

	2000K LM	3000K LM	5000K LM
Flux unitaire lumineux	63 lm	59 lm	54 lm
Distribution photométrique des luminaires			
Spectre des sources de lumière			

3.3.2.3 Résultats en éclairement

Comme mentionné précédemment, des grilles de mesure ont été utilisées afin de collecter les valeurs d'éclairement et de luminance sur la chaussée de la maquette. La grille d'éclairement utilisée et présentée en Figure 3-22 (même grille que la Figure 3-18 avec une densification des lignes de mesure longitudinales) a ensuite été reproduite dans le modèle de maquette modélisé sous Sketchup. En utilisant un capteur appelé « Surface light map » lors de la simulation OCEAN réalisée pour ce nouveau modèle Sketchup, il a été possible de collecter les données d'éclairement sur la chaussée. L'image résultante, issue de la simulation OCEAN est présentée en Figure 3-23.

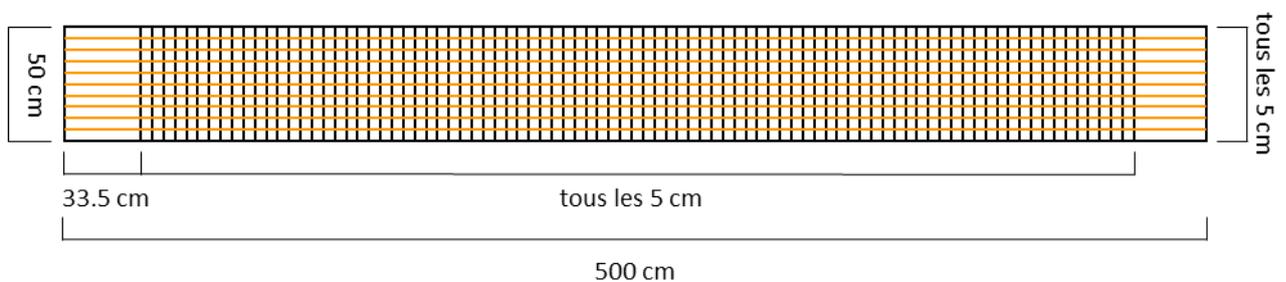


Figure 3-22 Grille de mesure de l'éclairement théorique utilisée sous OCEAN

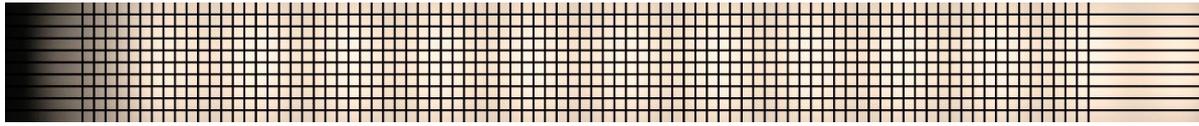


Figure 3-23 Résultat de simulation pour la grille de mesure de l'éclairage modélisée sous OCEAN

Les coordonnées des pixels correspondant aux intersections de la grille de mesure sont ensuite récupérées. Ainsi, les valeurs d'éclairage mesurées au niveau de ces pixels pour chaque simulation peuvent être collectées. En pratique, une moyenne sur un carré de 4 pixels de côté était réalisée pour chacun de ces points de mesure et les données collectées pouvaient ainsi être comparées à celles obtenues par mesure sur la maquette.

Pour rappel, ces comparaisons de mesure se sont faites pour des scénarios choisis parmi les différents spectres et paliers d'éclairage créés pour l'expérience psycho-visuelle. 3 scénarios d'étude ont été retenus : le palier d'éclairage maximal pour le spectre 2000K LM, le palier d'éclairage maximal pour le spectre 3000K LM et le palier d'éclairage maximal pour le spectre 5000K LM. Dans un premier temps, les simulations ont été réalisées avec les données d'entrée présentées dans le Tableau 3-4 pour les sources de lumière, et avec les données de BRDF lambertiennes pour les propriétés de réflexion des matériaux.

La puce utilisée pour les mesures réelles, et les simulations OCEAN permettent de récupérer les valeurs des 3 coordonnées trichromatiques (X, Y et Z, avec Y la valeur d'éclairage) associées au stimulus lumineux étudié. Les écarts entre les valeurs obtenues pour les 3 coordonnées trichromatiques en mesure réelle et par simulation sont détaillés ci-après. En pratique, on renseigne des données spectrales en entrée pour les simulations OCEAN (BRDF spectrales, distributions spectrales des sources de lumière), puis le logiciel effectue une simulation en tenant compte de chaque longueur d'onde renseignée, et donne des résultats simplifiés en ne considérant que les coordonnées trichromatiques X, Y et Z.

Les profils longitudinaux et transversaux en éclairage sont indiqués pour la source 2000K LM au palier 45 (voir Figure 3-24 et Figure 3-25). Seuls les profils longitudinaux sont présentés pour les sources 3000K LM et 5000K LM (voir Figure 3-26 et Figure 3-27 respectivement), puisque ce sont eux qui seront principalement utilisés pour réaliser la comparaison mesures / résultats de simulation. La comparaison des valeurs obtenues sur les profils longitudinaux se fait pour les deux lignes de mesures présentées en Figure 3-18 puisque seules ces deux lignes ont fait l'objet de mesures d'éclairage avec la puce, comme mentionné en section **3.3.1.5 Eclairages de chaussée**. Dans toute la suite, la désignation ligne centrale indiquera la ligne située au centre du tunnel et la désignation ligne de droite indiquera l'autre ligne de mesure.

Les tableaux ci-après présentent les résultats collectés pour la comparaison de l'éclairage lumineux Y obtenus par mesure et par simulation. Les coordonnées chromatiques x et y ont été calculées à partir des coordonnées X, Y et Z obtenues lors des mesures avec la puce

spectrale, et lors des simulations sous OCEAN. Leur expression est rappelée en équations [2-10], [2-11] et [2-12] (section 2.2.2.6 Calibrage des spectres et des niveaux d'éclairement).

La température de couleur associée à ces coordonnées x et y a été calculée à partir de la formule de Mc Camy (McCamy 1992), donnée en équations [3-10] et [3-11].

$$n = \frac{x-0.332}{y-0.1858} \quad [3-10]$$

$$TC = 5520.3 - 6823.3 n + 3525 n^2 - 449 n^3 \quad [3-11]$$

Avec TC la température de couleur (K).

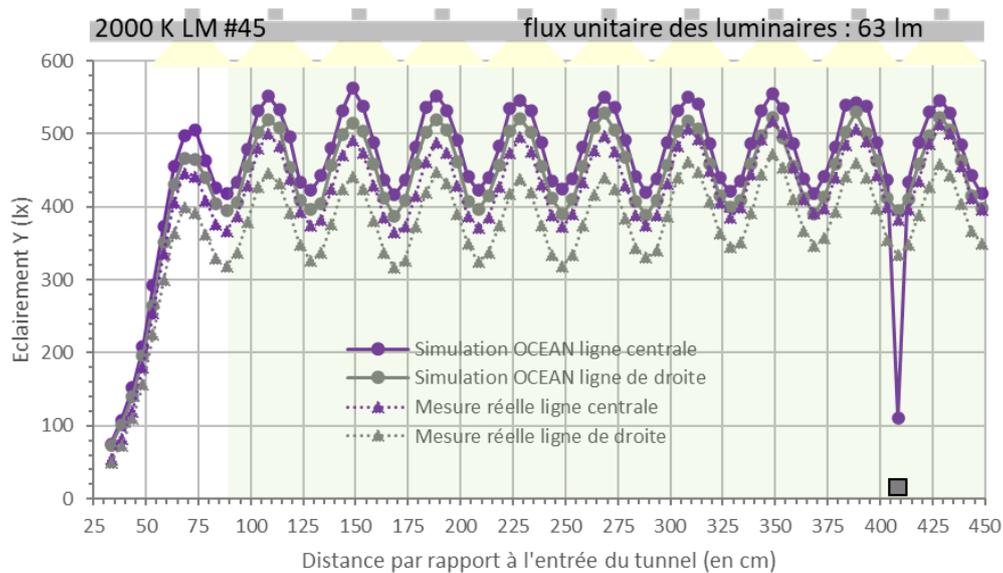


Figure 3-24 Profils d'éclairement longitudinaux pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 63 lm). La position des luminaires et la cible sont représentées. La zone transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-5.

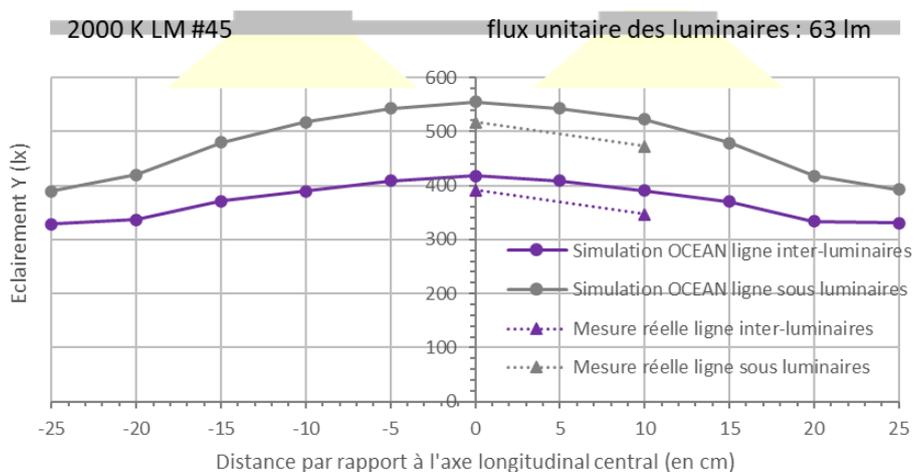


Figure 3-25 Profils d'éclairement transversaux pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 63 lm). La position des luminaires est représentée.

Tableau 3-5 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 63 lm)

	Nombre de données	Moyenne mesures réelles	MBE	RMSE	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
Y	154	414.4	55.1	63.1	13%	15%	0.84
x	154	0.531	0.003	0.004	0.6%	0.8%	-0.15
y	154	0.399	0.004	0.004	0.9%	0.9%	-0.05

Tableau 3-6 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 63 lm)

	Moyenne mesures réelles	Moyenne simulation OCEAN	Température de couleur calculées à partir des mesures réelles	Température de couleur calculée à partir des données de simulation
x	0.531	0.534	1859 K	1860 K
y	0.399	0.402		

Il est à noter que les lignes transversales situées à moins de 90 cm de l'entrée du tunnel ne sont pas prises en compte dans le calcul des statistiques présentées ci-dessus. Ainsi, les calculs sont menés à partir de la deuxième rangée de luminaires afin de supprimer l'impact de la zone non éclairée à l'entrée de la maquette sur les résultats. D'une part, cette zone nous intéresse moins que la zone au niveau de la cible, et d'autre part, elle se situe dans une portion de la simulation très sujette au bruit du fait qu'elle reçoit peu de flux lumineux.

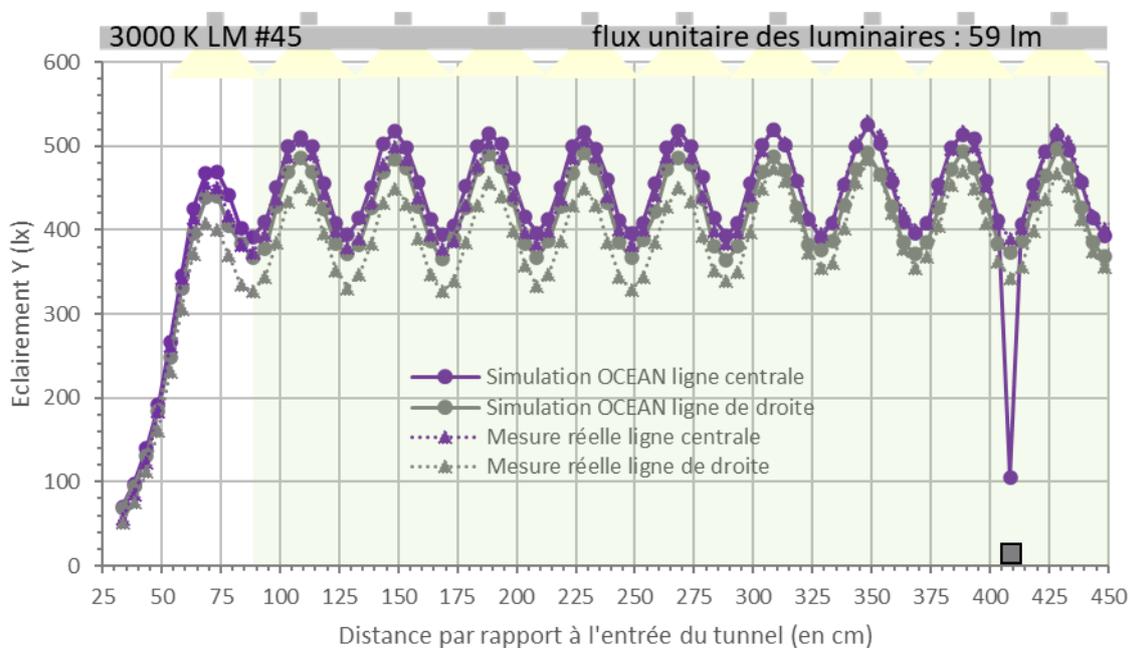


Figure 3-26 Profils d'éclairage longitudinaux pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 59 lm). La position des luminaires et la cible sont représentées. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-7.

Tableau 3-7 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 59 lm)

	Nombre de données	Moyenne mesures réelles	MBE	RMSE	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
Y	154	423.8	16.3	33.1	4%	8%	0.85
x	154	0.425	0.005	0.006	1.2%	1.3%	-0.06
y	154	0.406	0.002	0.003	0.4%	0.7%	0.11

Tableau 3-8 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 59 lm)

	Moyenne mesures réelles	Moyenne simulation OCEAN	Température de couleur calculées à partir des mesures réelles	Température de couleur calculée à partir des données de simulation
x	0.425	0.430	3230 K	3152 K
y	0.406	0.408		

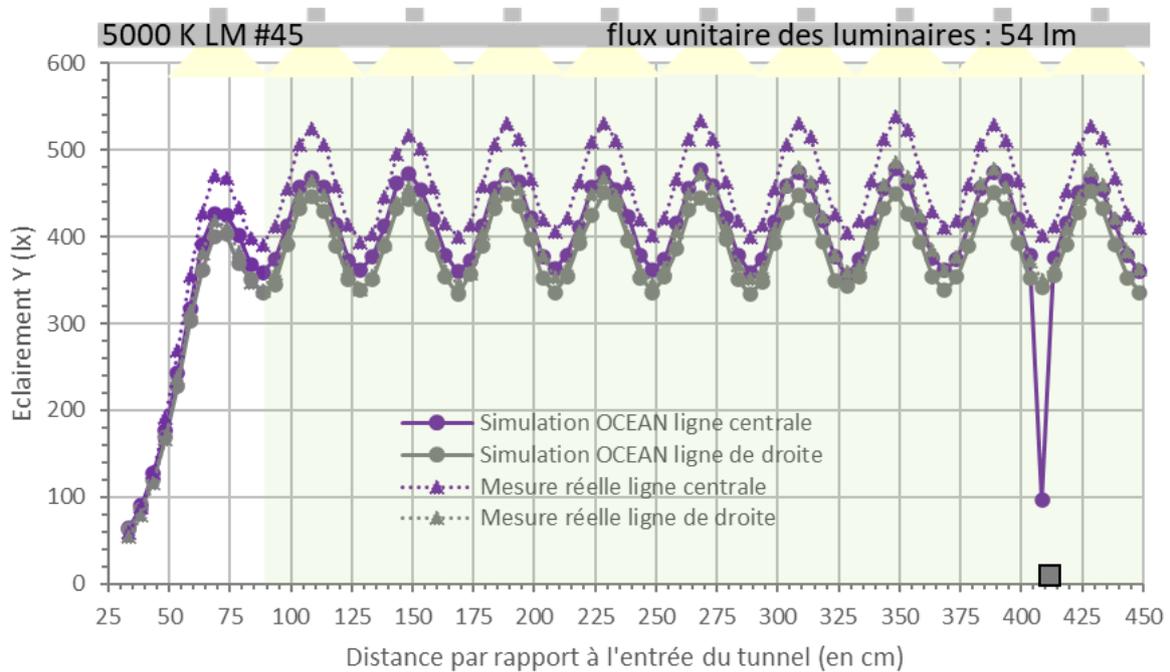


Figure 3-27 Profils d'éclairage longitudinaux pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 54 lm). La position des luminaires et la cible sont représentées. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-9.

Tableau 3-9 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 54 lm)

	Nombre de données	Moyenne mesures réelles	MBE	RMSE	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
Y	154	437.3	34.8	44.2	8%	10%	0.86
x	154	0.335	0.004	0.005	1.3%	1.5%	0.07
y	154	0.339	0.005	0.006	1.4%	1.7%	0.05

Tableau 3-10 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 54 lm)

	Moyenne mesures réelles	Moyenne simulation OCEAN	Température de couleur calculées à partir des mesures réelles	Température de couleur calculée à partir des données de simulation
x	0.335	0.339	5400 K	5216 K
y	0.339	0.343		

Les résultats montrent des écarts relativement faibles entre les coordonnées chromatiques x et y obtenues par mesure, et celles obtenues par simulation (rRMSE maximum de 1.7%). De la même manière, les écarts entre les températures de couleur calculées pour les mesures et celles calculées pour les simulations, n'excèdent pas 3.5%.

Dans un second temps, les courbes obtenues pour les mesures réelles et pour les données de simulation ont été modélisées sous la forme d'une décomposition de Fourier à un terme (sinusoïde), dont l'expression typique est donnée en équation [3-12].

$$f(x) = a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \sin(x * w) \quad [3-12]$$

Avec $f(x)$ la fonction modélisant le jeu de données choisi ;

a_0 , a_1 , b_1 et w des paramètres du modèle.

Les résultats obtenus pour chacun des jeux de données considérés sont présentés en Tableau 3-11.

Tableau 3-11 Résumé des coefficients modélisant les sinusoïdes des profils d'éclairage longitudinaux. Le coefficient de corrélation de Pearson est indiqué. « MR » désigne les mesures réelles et « S » les résultats de simulation. « LC » désigne la ligne de mesure centrale et « LD » la ligne de mesure de droite.

	2000K LM MR LC	2000K LM S LC	2000K LM MR LD	2000K LM S LD	3000K LM MR LC	3000K LM S LC	3000K LM MR LD	3000K LM S LD	5000K LM MR LC	5000K LM S LC	5000K LM MR LD	5000K LM S LD
a₀	438.9	485.6	390.2	457.5	448.3	455.4	399.5	428.4	463.7	416.6	411.1	391.9
a₁	-8.492	-12.2	-8.046	-13.56	-10.04	-13.18	-8.738	-12.76	-13.58	-11.46	-9.821	-11.97
b₁	-62.83	-65.1	-60.23	-63.11	-63.17	-60.65	-60.62	-59.49	-62.62	-55.96	-59.95	-54.45
w	0.1572	0.1572	0.1571	0.1571	0.1572	0.157	0.1572	0.1571	0.157	0.1571	0.1571	0.1571
R2 Pearson	0.95	0.99	0.94	0.99	0.96	0.99	0.94	0.99	0.99	0.99	0.97	0.99

Le coefficient a_0 va influencer la position de la sinusoïde (sur quelle valeur cette dernière sera centrée). Les coefficients a_1 et b_1 doivent être considérés ensembles, ils influenceront l'amplitude de la sinusoïde, ainsi que le retard de phase. Enfin, le coefficient w influencera la période de la sinusoïde (données par $\frac{2\pi}{w}$). Afin de mieux appréhender les écarts entre les sinusoïdes modélisées à partir des mesures réelles et celles modélisées à partir des résultats de simulation, la Figure 3-28 et la Figure 3-29 présentent un exemple de résultat pour les données collectées sur la ligne de mesure centrale. En supprimant le coefficient a_0 , on ne s'intéresse plus qu'aux déphasages pouvant exister entre les deux modèles de sinusoïdes, aux écarts d'amplitude, ou aux différences de période. La Figure 3-29 montre que les modèles sont très proches visuellement, on peut en conclure que le positionnement des sources, l'espacement entre ces dernières et la distribution de leur intensité est bien modélisé dans la simulation. La Figure 3-28 montre que l'écart entre les deux modèles de sinusoïdes provient principalement du positionnement de ces dernières sur le graphique. Afin de retracer l'origine de cet écart entre les modèles de sinusoïdes issus des mesures et ceux issus des résultats de simulation, de nombreux tests ont été menés en modifiant les paramètres d'entrée de la simulation pour observer leur impact sur les résultats obtenus. Il est apparu que les propriétés de réflexion des piédroits et de la chaussée (BRDF lambertienne, ou BRDF en intensité ou spectrale corrigées) n'avaient que très peu d'impact sur les résultats en éclairement. En revanche, les valeurs de flux et l'indicatrice d'intensité modélisées pour les luminaires avaient un impact important sur les valeurs obtenues en sortie de simulation.

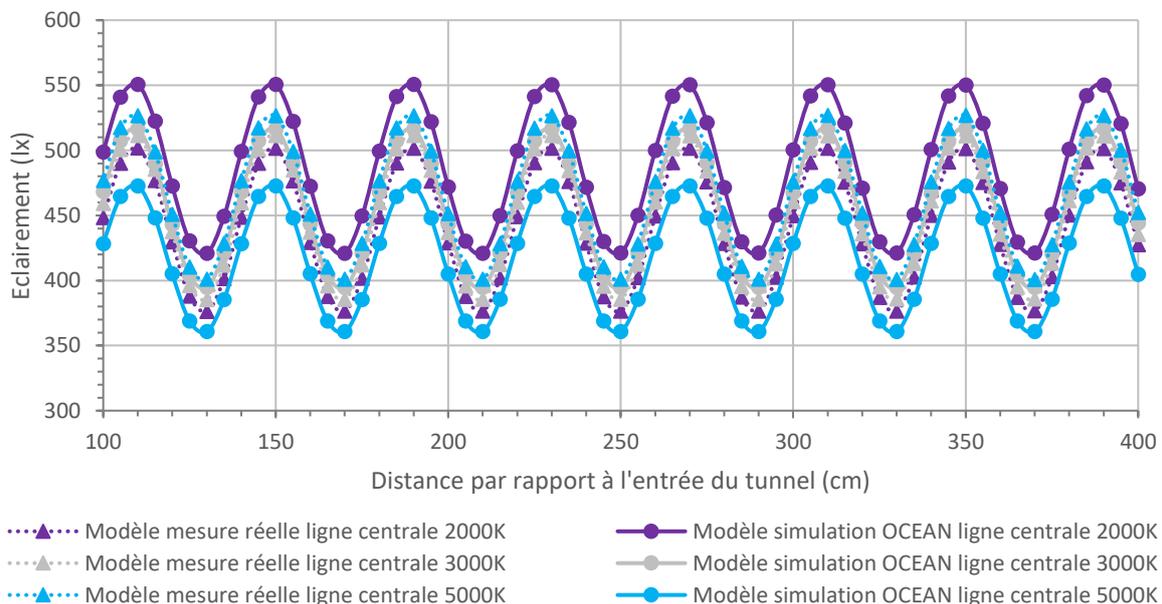


Figure 3-28 Comparaison des modèles de sinusoïdes obtenus pour les mesures réelles et pour les données simulées pour la ligne de mesure centrale

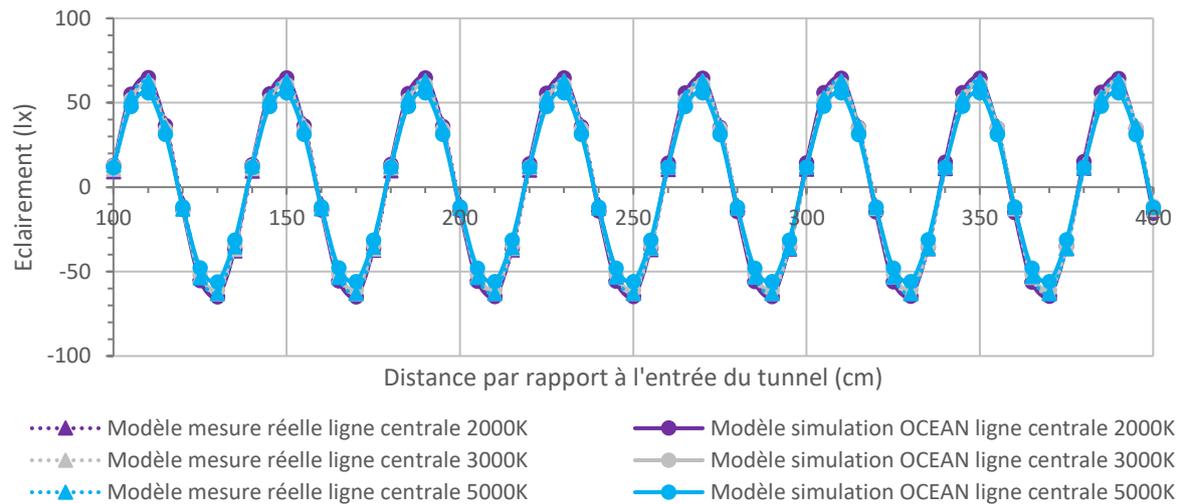


Figure 3-29 Comparaison des modèles de sinusoïdes obtenus pour les mesures réelles et pour les données simulées pour la ligne de mesure centrale sans prise en compte du coefficient a_0

L'objectif est ensuite de faire en sorte que les résultats de simulation en éclairement soient les plus proches possibles des mesures réelles, ainsi les différences de résultats obtenus pour les luminances seront uniquement imputables aux propriétés de réflexion des matériaux.

La géométrie de la maquette et l'indicatrice d'intensité des luminaires sont représentées de la manière la plus fidèle possible (indicatrices d'intensité données par le fabricant et vérifiées par la mesure). Une autre source d'erreur pourrait provenir du fait que la source de lumière est simulée par une LED située au-dessus d'un trou circulaire (voir Figure 3-12 (1)). Ainsi, si la distance entre la LED et ce trou et/ou le diamètre du trou ne sont pas fidèles à la réalité, alors des écarts pourront être observés entre les mesures et les données de simulation. Ces paramètres ont donc été vérifiés à nouveau et validés.

Finalement, la photométrie des matériaux ayant très peu d'impact sur les résultats en éclairement, nous sommes arrivés à la conclusion que les écarts observés entre les modèles de sinusoïdes issus des mesures et ceux issus des données simulées, étaient probablement dus à une erreur initiale dans les valeurs de flux de luminaire passés en paramètre de la simulation. La suite de cette partie prend en compte un ajustement de cette valeur de flux afin que les résultats de simulation en éclairement soient les plus proches possibles des mesures réelles. Cet ajustement s'est fait par itération en réalisant plusieurs simulations successives jusqu'à atteindre des valeurs de rMBE et de rRMSE les plus faibles possibles pour chaque scénario étudié.

En prenant en compte une valeur de flux unitaire par luminaire de 55.2 lm (contre 63 lm initialement) pour le cas HPS LM au palier 45, on obtient les résultats présentés en Tableau 3-12 et en Tableau 3-13.

Tableau 3-12 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 55.2 lm)

	Nombre de données	Moyenne mesures réelles	MBE	RMSE	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
Y	154	414.4	2.8	29	0.7%	7%	0.84
x	154	0.531	0.003	0.004	0.6%	0.8%	-0.01
y	154	0.399	0.004	0.004	0.9%	1.0%	0.09

Tableau 3-13 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 2000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 55.2 lm)

	Moyenne mesures réelles	Moyenne simulation OCEAN	Température de couleur calculées à partir des mesures réelles	Température de couleur calculée à partir des données de simulation
x	0.531	0.534	1859 K	1860 K
y	0.399	0.402		

En prenant 56.25 lm pour le cas 3000K LM au palier 45 (contre 59 lm initialement), on obtient les résultats présentés en Tableau 3-14 et en Tableau 3-15.

Tableau 3-14 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 56.25 lm)

	Nombre de données	Moyenne mesures réelles	MBE	RMSE	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
Y	154	423.8	4.3	29	1%	7%	0.84
x	154	0.425	0.005	0.006	1.2%	1.4%	-0.04
y	154	0.406	0.002	0.003	0.4%	0.7%	0.14

Tableau 3-15 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 3000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 56.25 lm)

	Moyenne mesures réelles	Moyenne simulation OCEAN	Température de couleur calculées à partir des mesures réelles	Température de couleur calculée à partir des données de simulation
x	0.425	0.430	3230 K	3153 K
y	0.406	0.408		

Enfin, en prenant 58.33 lm pour le cas 5000K LM au palier 45 (contre 54 lm initialement), on obtient les résultats présentés en Tableau 3-16 et en Tableau 3-17.

Tableau 3-16 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils d'éclairage longitudinaux (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 58.33 lm)

	Nombre de données	Moyenne mesures réelles	MBE	RMSE	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
Y	154	437.3	2.3	29	0.5%	7%	0.85
x	154	0.335	0.004	0.005	1.3%	1.5%	0.14
y	154	0.339	0.005	0.006	1.4%	1.7%	0.12

Tableau 3-17 Comparaison des résultats de coordonnées chromatiques et de température de couleur pour les résultats de simulation et pour les données mesurées (spectre 5000K LM #45, flux unitaire des luminaires : 58.33 lm)

	Moyenne mesures réelles	Moyenne simulation OCEAN	Température de couleur calculées à partir des mesures réelles	Température de couleur calculée à partir des données de simulation
x	0.335	0.339	5400 K	5215 K
y	0.339	0.343		

Les modifications apportées aux valeurs de flux utilisées dans les simulations sont comprises entre -12.4% (HPS LM) et +8.0% (5000K LM).

Les éclairagements (Y) sur la chaussée sont les plus proches possibles des valeurs mesurées, avec une rMBE inférieure à 1% et une rRMSE inférieure à 7%.

Les valeurs de rMBE pour les composantes chromatiques x et y sont inférieures à 1.4% et les rRMSE sont inférieures à 1.7% pour les 3 scénarios testés. L'écart maximal entre les valeurs de températures de couleur mesurées et celles obtenues sous OCEAN, est de 3.4%. Ces résultats nous montrent qu'en renseignant les spectres des sources de lumière et les facteurs de réflexion spectraux des surfaces du modèle, la simulation spectrale permet de reproduire avec une bonne précision les coordonnées trichromatiques mesurées.

Une fois les valeurs d'éclairage ajustées dans la simulation, les mêmes paramètres d'entrée sont utilisés pour réaliser une simulation en valeurs de luminance.

3.3.2.4 Résultats en luminance

Afin de pouvoir comparer les résultats en luminance de la simulation et les mesures effectuées sur la maquette, les conditions d'observation doivent être les mêmes dans les deux cas de figure. Ainsi, une caméra indiquant les valeurs de luminance de chaque pixel est modélisée sous OCEAN. Sa position est identique à celle du LMK utilisé pour les mesures. Les mêmes grilles de mesure que celles utilisées pour l'évaluation des luminances réelles (voir Figure 3-15

et Figure 3-16) sont dessinées sur la chaussée et sur le piédroit gauche du modèle 3D. Une première simulation est ensuite réalisée avec les grilles de mesure apparentes, le résultat est présenté en Figure 3-30.

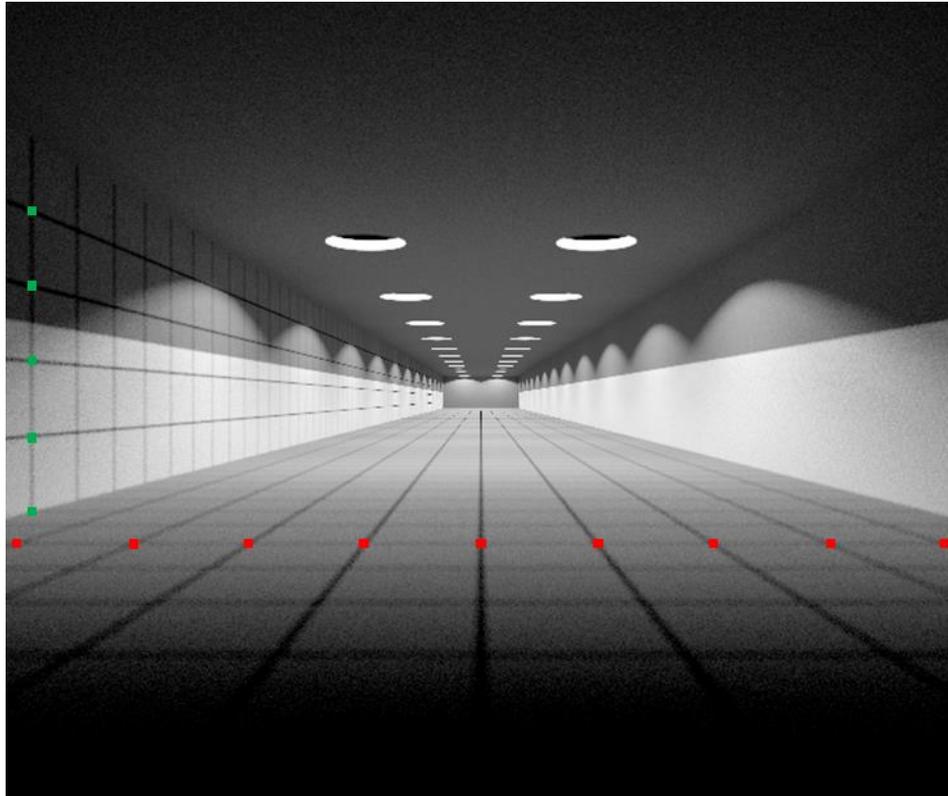


Figure 3-30 Rendu visuel sous OCEAN pour les grilles de mesure en luminance de chaussée et de piédroit. Les points rouges indiquent les points de mesure de la grille de la chaussée pour une ligne transversale, les points verts indiquent les points de mesure de la grille du piédroit pour une ligne transversale.

Les coordonnées des pixels correspondant aux intersections des grilles de mesure sont relevées sur cette image. Ensuite, pour chaque scénario testé (2000K LM #45, 3000K LM #45, 5000K LM #45), 3 simulations sont réalisées : une pour la BRDF lambertienne des matériaux de la maquette, une autre pour la BRDF en intensité corrigée, et une dernière pour la BRDF spectrale corrigée (voir section **3.3.2.2 Hypothèses de modélisation** et Figure 3-21). Ces simulations sont réalisées sans les grilles de mesure (des exemples de résultats sont présentés en Figure 3-31).

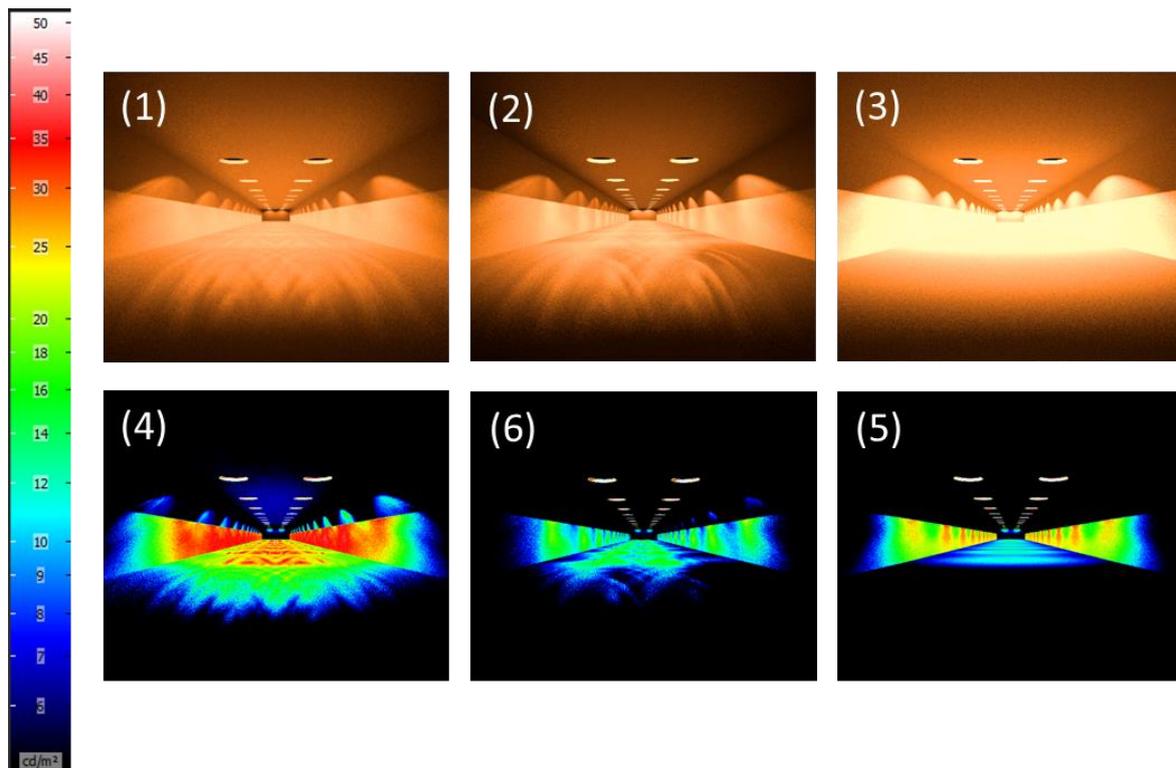


Figure 3-31 Exemple de résultats obtenus par simulation sous OCEAN pour le scénario 2000 K LM #45. (1) Rendu visuel pour la simulation avec les BRDF spectrales corrigées ; (2) Rendu visuel pour la simulation avec les BRDF en intensité corrigées ; (3) Rendu visuel pour la simulation avec les BRDF lambertiennes ; (4) Carte de luminance pour la simulation avec les BRDF spectrales corrigées ; (5) Carte de luminance pour la simulation avec les BRDF en intensité corrigées ; (6) Carte de luminance pour la simulation avec les BRDF lambertiennes.

On a pu constater que pour les éclairagements, la BRDF des matériaux n'a pas une grande importance car elle influence les résultats seulement au travers des réflexions multiples dans le tunnel. En revanche, pour les luminances, les BRDF ont une vraie influence puisqu'elles impactent les résultats au travers des réflexions directes de la lumière sur les surfaces. L'analyse de la Figure 3-31 montre que les résultats obtenus pour les BRDF spectrales corrigées et les BRDF en intensité corrigées présentent des aberrations photométriques (demi-cercles présentant des luminances plus élevées notamment) que nous n'avons pas réussi à résoudre, les résultats obtenus doivent donc être considérés prudemment. Un travail similaire de Dumont et al. (Dumont, Joulan, et Ledoux 2011) a consisté à compléter des données de BRDF lacunaires, puis à les réinjecter dans une simulation : le résultat obtenu n'a pas montré d'aberrations visibles directement sur l'image. Deux explications semblent plausibles pour expliquer ces artefacts photométriques : le Banc REFLET a donné des mesures incorrectes pour certains angles d'incidence de source et/ou certains angles de détection ; ou bien les conventions d'angle utilisées dans les fichiers de BRDF ont été mal interprétées dans OCEAN.

En utilisant les coordonnées des pixels collectées précédemment, il est possible de récupérer les valeurs de luminance au niveau des différents points des grilles pour toutes les simulations réalisées. En pratique, la comparaison ne se faisait pas en un unique pixel, mais pour une moyenne de valeurs de luminance sur les pixels entourant l'intersection de la grille de mesure considérée. Comme les points d'intersection proches du capteur étaient représentés par un nombre de pixels bien plus grand que ceux plus éloignés, le nombre de pixels pris en compte pour calculer la moyenne de luminance évoluaient en fonction de la distance de la ligne de mesure transversale étudiée par rapport au capteur. Pour les images issues du LMK et pour la grille de mesure de la chaussée, cette moyenne était réalisée sur un carré de 3 pixels de côté centré sur le pixel relevé comme étant l'intersection, pour les 10 premières lignes de mesure (en partant de la cible, au total la grille compte 37 lignes, dont seulement 36 sont visibles sur l'image LMK). Ensuite, on ajoutait deux pixels de côté à ce carré toutes les 10 lignes de mesure (11^{ème} ligne : carré de 5 pixels de côté, 21^{ème} ligne : carré de 7 pixels de côté, ...). Cette méthode permettait de conserver le pixel de l'intersection au centre du carré à chaque étape. Pour la grille de mesure des piédroits, cette moyenne était réalisée sur un carré de 3 pixels de côté centré sur le pixel relevé comme étant l'intersection, pour les 40 premières lignes de mesure (en partant de la cible). Ensuite, on rajoutait deux pixels de côté à ce carré toutes les 40 lignes de mesure (81 lignes au total).

Pour les images de simulation issues de OCEAN, la méthode utilisée était la même, mais l'augmentation de la taille du carré d'évaluation de la moyenne de luminance se faisait plus rapidement du fait que la résolution de l'image était meilleure. Ainsi, on rajoutait deux pixels de côté à ce carré toutes les 5 lignes de mesure pour la grille de chaussée et toutes les 20 lignes de mesure pour la grille de piédroit (en partant de la cible).

Les résultats en luminance pour le calage du modèle sur maquette sont présentés dans les figures suivantes. Les valeurs de luminance indiquées correspondent à des moyennes sur les points de mesure d'une ligne transversale (voir Figure 3-30). Les lignes transversales comptent 9 points de mesure sur la chaussée et 5 points de mesure sur les piédroits.

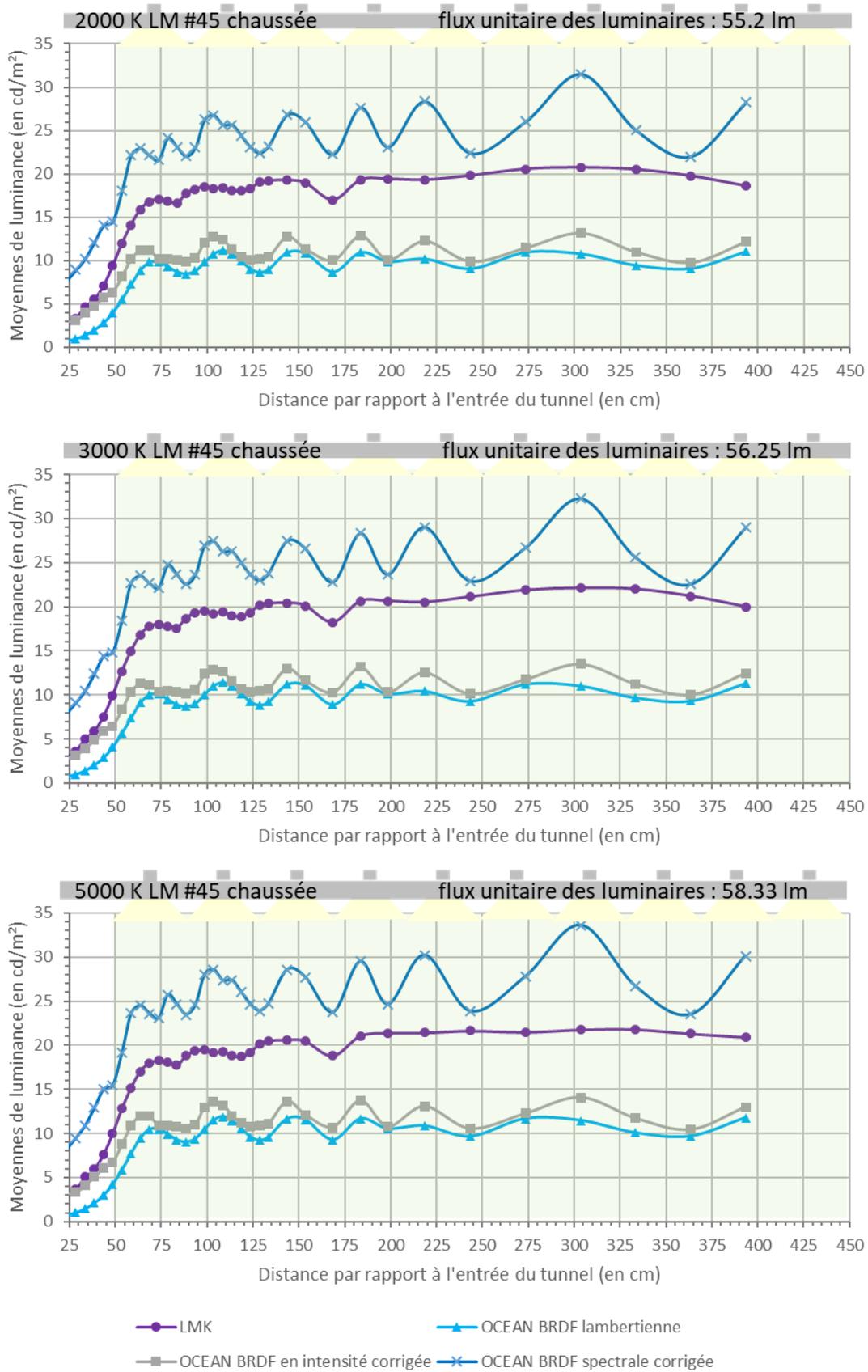


Figure 3-32 Profils de luminance longitudinaux sur la chaussée pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN. La position des luminaires est représentée. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-18.

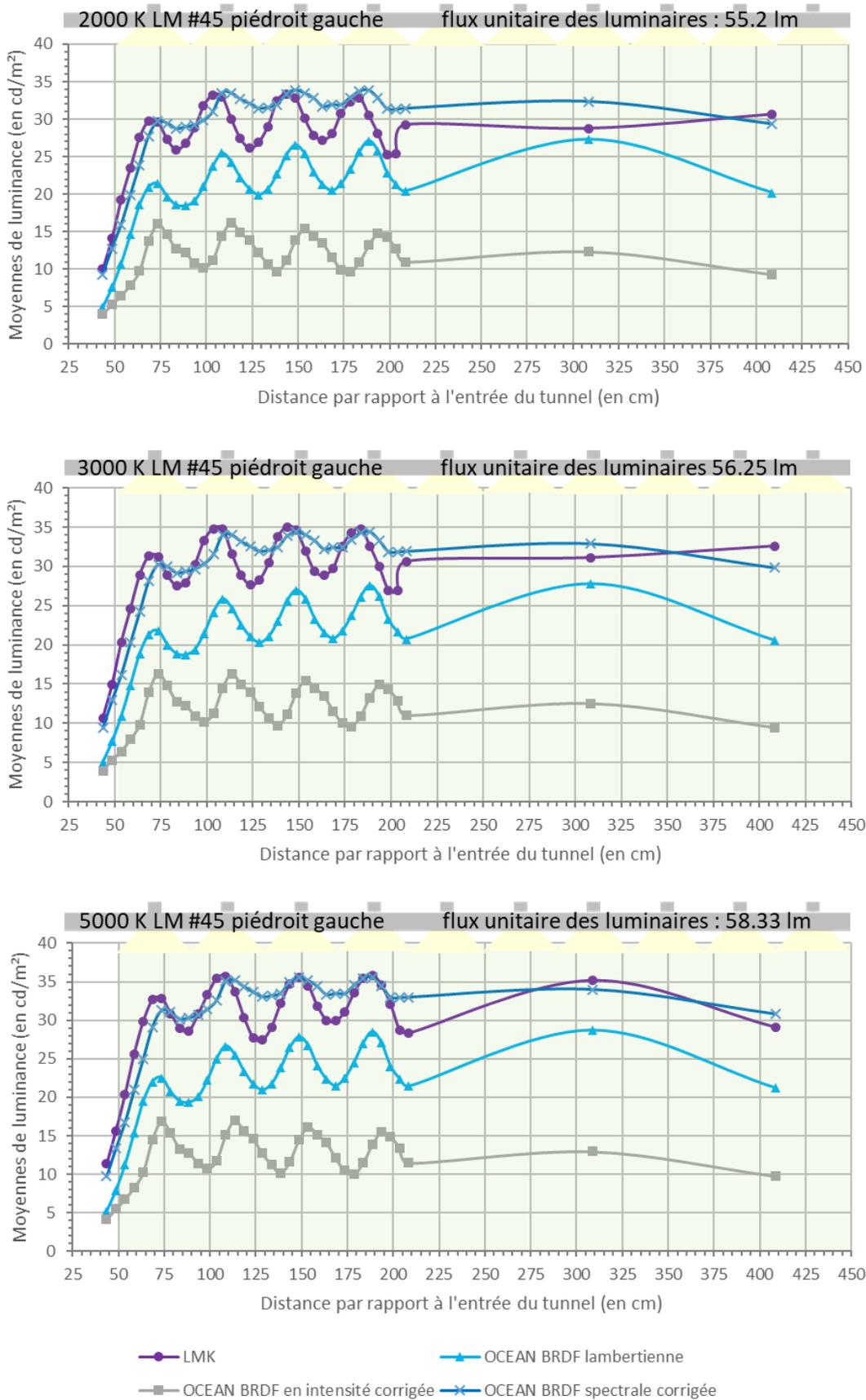


Figure 3-33 Profils de luminance longitudinaux sur le piédroit gauche pour les mesures réelles et pour les simulations OCEAN. La position des luminaires est représentée. La zone verte transparente désigne les données utilisées dans le calcul des statistiques présentées en Tableau 3-19.

La Figure 3-32 et la Figure 3-33 montrent que les valeurs de luminance de chaussée obtenues pour les simulations avec les BRDF spectrales corrigées sont plus élevées que celles mesurées avec le LMK. Pour les valeurs de luminance de piédroit, on obtient des valeurs très proches de celles mesurées. Les valeurs de luminance de chaussée et de piédroit simulées pour les BRDF lambertiennes et les BRDF en intensité corrigées sont beaucoup plus faibles que celles mesurées. Enfin, on constate que les différentes valeurs de luminance obtenues pour les scénarios étudiés (2000 K LM #45, 3000 K LM #45, 5000 K LM #45) sont très proches. Ces résultats sont une indication que l'optimisation des spectres réalisée pour l'expérience psycho-visuelle a plutôt bien fonctionné : les niveaux de luminance obtenus sur la chaussée sont sensiblement les mêmes d'un spectre à l'autre pour un même palier d'éclairément. Il est à noter que l'on a seulement trois valeurs de luminance sur les piédroits entre 210 cm et 410 cm, cela est dû au fait que les lignes de la grille de mesure ne sont plus visibles sur la carte de luminance du LMK à partir de 210 cm.

Tableau 3-18 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils de luminance longitudinaux sur la chaussée

Spectre	Nombre de données	Moyenne mesures réelles (cd/m ²)	Modélisation BRDF	MBE (cd/m ²)	RMSE (cd/m ²)	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
2000K LM #45	261	18,1	BRDF lambertienne	8,6	8,7	47%	48%	0,84
			BRDF en intensité corrigée	7,2	7,6	40%	42%	0,65
			BRDF spectrale corrigée	6,2	7,2	34%	39%	0,57
3000K LM #45	261	19,2	BRDF lambertienne	9,4	9,6	49%	50%	0,83
			BRDF en intensité corrigée	8	8,5	42%	44%	0,65
			BRDF spectrale corrigée	5,7	6,8	30%	35%	0,57
5000K LM #45	261	19,4	BRDF lambertienne	9,2	9,4	47%	48%	0,84
			BRDF en intensité corrigée	7,7	8,2	40%	42%	0,62
			BRDF spectrale corrigée	6,5	7,6	34%	39%	0,57

Tableau 3-19 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les profils de luminance longitudinaux sur le piédroit gauche

Spectre	Nombre de données	Moyenne mesures réelles (cd/m ²)	Modélisation BRDF	MBE (cd/m ²)	RMSE (cd/m ²)	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
2000K LM 45	170	18,5	BRDF lambertienne	4,8	6,3	26%	34%	0,97
			BRDF en intensité corrigée	10,7	13,4	58%	73%	0,92
			BRDF spectrale corrigée	1,8	3,8	10%	20%	0,97
3000K LM 45	170	19,6	BRDF lambertienne	5,6	7,2	29%	37%	0,97
			BRDF en intensité corrigée	11,7	14,6	60%	75%	0,92
			BRDF spectrale corrigée	1,1	3,6	5%	18%	0,97
5000K LM 45	170	20,3	BRDF lambertienne	5,8	7	29%	35%	0,98
			BRDF en intensité corrigée	12	14,8	59%	73%	0,94
			BRDF spectrale corrigée	1,1	3,4	5%	17%	0,97

L'analyse des résultats statistiques nous montre que la méthode de BRDF spectrale corrigée donne les meilleurs résultats en termes d'erreur de biais moyen et d'erreur quadratique moyenne pour les luminances de chaussée, avec une erreur de biais moyen relative maximum de 34%, contre 49% pour la BRDF lambertienne et 42% pour la BRDF en intensité corrigée ; et une erreur quadratique moyenne relative maximum de 39%, contre 50% pour la BRDF lambertienne et 44% pour la BRDF en intensité corrigée. De la même manière, pour les luminances de piédroit, l'erreur de biais moyen maximum pour la BRDF spectrale corrigée est de 10% contre 29% pour la BRDF lambertienne et 60% pour la BRDF en intensité corrigée. L'erreur quadratique moyenne maximum est de 20% pour la BRDF spectrale corrigée, de 37% pour la BRDF lambertienne, et de 75% pour la BRDF en intensité corrigée. La BRDF spectrale donne donc à nouveau les meilleurs résultats.

En revanche, le coefficient de Pearson est meilleur pour la BRDF lambertienne en ce qui concerne les luminances de chaussée, avec un coefficient minimum de 0.83, contre 0.62 pour la BRDF en intensité corrigée et 0.57 pour la BRDF spectrale corrigée. La dégradation du

coefficient de Pearson pour les BRDF issues des mesures du Banc REFLET est potentiellement liée à la présence des aberrations photométriques observées sur les résultats de simulation (voir Figure 3-31). Les coefficients de Pearson sont beaucoup plus proches pour les luminances de piédroit, avec une valeur minimale de 0.97 pour la BRDF lambertienne, de 0.92 pour la BRDF en intensité corrigée, et de 0.97 pour la BRDF spectrale corrigée.

Les graphiques présentant les moyennes de luminance mesurées sur chaque ligne de mesure transversale sur la chaussée indiquent que l'utilisation de la BRDF spectrale corrigée donne des valeurs de luminance surestimées par rapport aux valeurs réelles. Cet aspect pourrait être dangereux dans le cadre d'un dimensionnement car on pourrait se retrouver avec des niveaux de luminance finaux inférieurs au besoin réel. La BRDF en intensité corrigée donne, quant à elle, des valeurs très éloignées de celles obtenues par mesure avec le LMK en termes de luminances de piédroit. Ainsi, au vu des constatations faites précédemment, la conclusion qui semble s'imposer serait plutôt d'utiliser la BRDF lambertienne pour passer des éclairagements aux luminances, pour des raisons de sécurité. Il convient néanmoins de nuancer ce résultat en tenant compte du fait que les mesures réelles auxquelles sont comparés tous nos résultats de simulation sont sujettes à des erreurs et des imprécisions (incertitude de mesure du LMK notamment). De plus, le processus de validation ne se déroule pas sur un vrai tunnel, mais sur une maquette : le revêtement utilisé n'étant pas une chaussée mais une peinture matte, les résultats obtenus ne sont pas nécessairement transposables tels quels aux conditions réelles d'un tunnel routier.

Il est à noter que les données de BRDF contiennent les éléments nécessaires au calcul des coefficients utilisés pour la classification des chaussées dans les tables R de la CIE (voir **annexe D : Caractérisation des propriétés de réflexion du revêtement de chaussée en éclairage routier**). Les BRDF en intensité permettent une conversion directe, tandis que les BRDF spectrales imposent de connaître le spectre de la source pour pouvoir réaliser la conversion. Cette comparaison BRDF / Classe de chaussée n'a pas été réalisée lors de ce travail, mais elle pourrait constituer un apport intéressant, notamment pour déterminer si la chaussée de la maquette présente des propriétés proches de celles d'une chaussée réelle.

3.4 Modélisation des luminances de voile

L'objectif de cette section est de développer la partie climatique du modèle dynamique final. Le développement d'algorithmes d'optimisation pour l'éclairage des tunnels routiers est un sujet qui se retrouve dans de nombreux articles de la communauté scientifique du monde des tunnels. Ces algorithmes doivent toujours se baser sur des données d'entrée, dont une est systématiquement présente dans toutes les études menées : les conditions de luminosité extérieure. La plupart de ces études mettent directement en place un contrôle intelligent de l'installation d'éclairage sur un tunnel test. Les données d'entrée en termes de conditions de luminosité extérieure sont issues de capteurs placés à proximité de l'entrée du tunnel dans ce cas de figure (Zeng et al. 2011; Shuguang 2015; Carni et al. 2013; L. Zhao et al. 2019; Musa et

al. 2015; Qin et al. 2021). Cette approche ne permet néanmoins pas d'anticiper les économies d'énergie possibles sur le tunnel considéré, le système doit être mis en place et un retour d'expérience doit être réalisé à plus ou moins long terme pour caractériser ces économies a posteriori. De plus, il est possible de se rendre compte à terme que ces dernières ne sont pas si importantes que cela. D'autres articles travaillent sur des simulations afin d'anticiper les économies d'énergie potentiellement offertes par de tels algorithmes. Les données d'entrée pour les conditions de luminosité extérieure peuvent être des données issues de capteurs placés sur le terrain, comme dans le cas précédent (J. Zhao, Feng, et Yang 2021; Guo et al. 2011), ou des données modélisées à partir d'un calendrier d'ensoleillement prévisionnel ne prenant pas en compte les variations climatiques (nuages, trouble de l'atmosphère, ...) (Salata et al. 2016). Dans le premier cas, les résultats de l'étude peuvent à nouveau être repoussés à une date relativement lointaine, le temps que les capteurs sur site aient accumulé suffisamment de données pour pouvoir lancer des simulations. Dans le second cas, les résultats seront approximés puisque les conditions climatiques ne seront pas prises en compte et seules les différentes courses du soleil dans le ciel seront modélisées.

Pour notre étude, des données de luminance de voile réelles mesurées sur le site de la tranchée couverte du Noiret sont comparées à des résultats de simulation OCEAN, afin d'attester de la validité de la méthode de modélisation des conditions climatiques choisie. Les simulations réalisées tiennent compte des conditions d'éclairage naturel en s'appuyant sur des données satellites. Ces dernières assurent une disponibilité immédiate des données et sont plus précises qu'un simple calendrier d'ensoleillement préétabli.

3.4.1 Présentation du site et du dispositif

Le site sur lequel le calage de la modélisation des conditions climatiques s'est effectué est le site de la tranchée couverte du Noiret (voir Figure 3-34), situé à Cruseilles dans la Haute-Savoie. Le tunnel a été équipé de septembre 2019 à juin 2020, puis d'août 2021 à septembre 2021, d'un dispositif de mesure de luminance de voile L_{20} appelé CAMEL. Les données de 2019 à 2020 ont pu être récupérées dans la base de données du CETU. Nous souhaitons néanmoins disposer d'une année de mesures complète afin d'avoir à notre disposition un échantillon exhaustif des conditions climatiques et d'ensoleillement du site, et avons donc sollicité l'exploitant pour réinstaller CAMEL pendant l'été 2021. La difficulté pour trouver une date de disponibilité, ainsi que des problèmes techniques, n'ont pas permis de collecter de données pour les mois de juin et de juillet 2021.

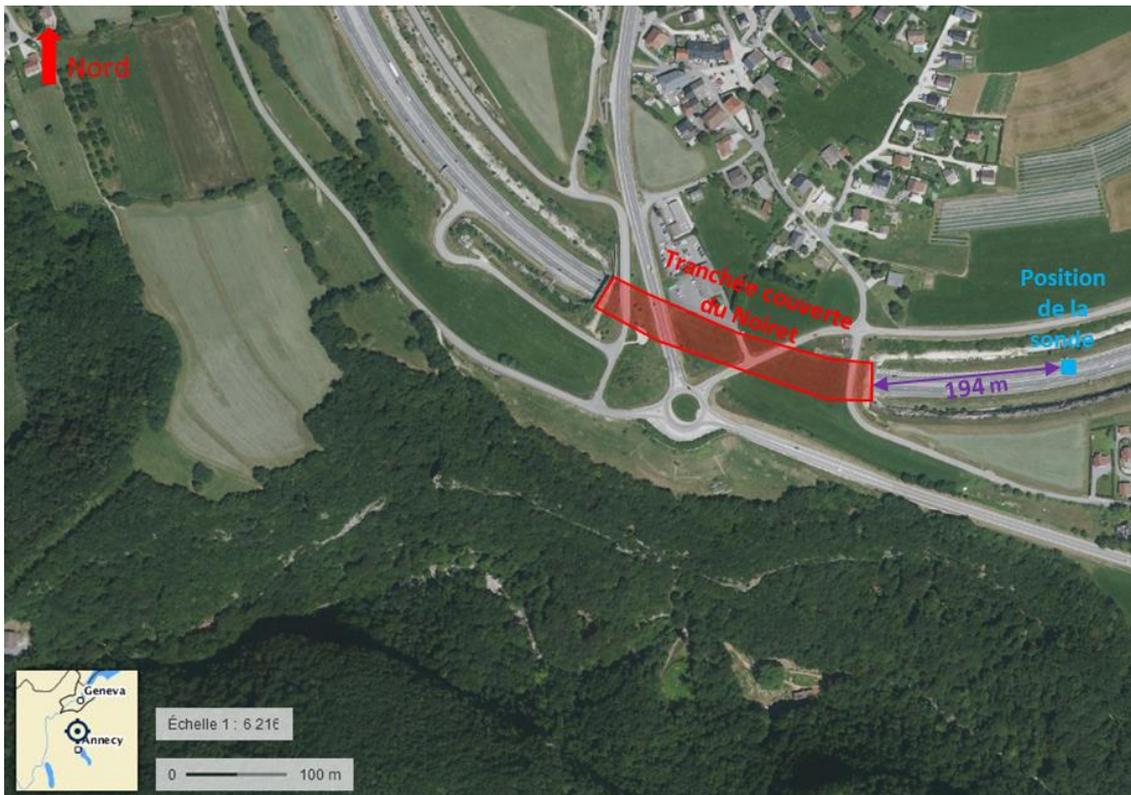


Figure 3-34 Photographie aérienne de la tranchée couverte du Noiret (Géoportail)

3.4.1.1 Géométrie

A l'aide de plans et de mesure sur cartes, la géométrie de la tranchée couverte du Noiret a pu être reconstituée sous Sketchup sous forme d'un modèle 3D présenté en Figure 3-35. Ce modèle a pu ensuite être importé dans OCEAN afin de procéder à des simulations de distribution de la lumière.

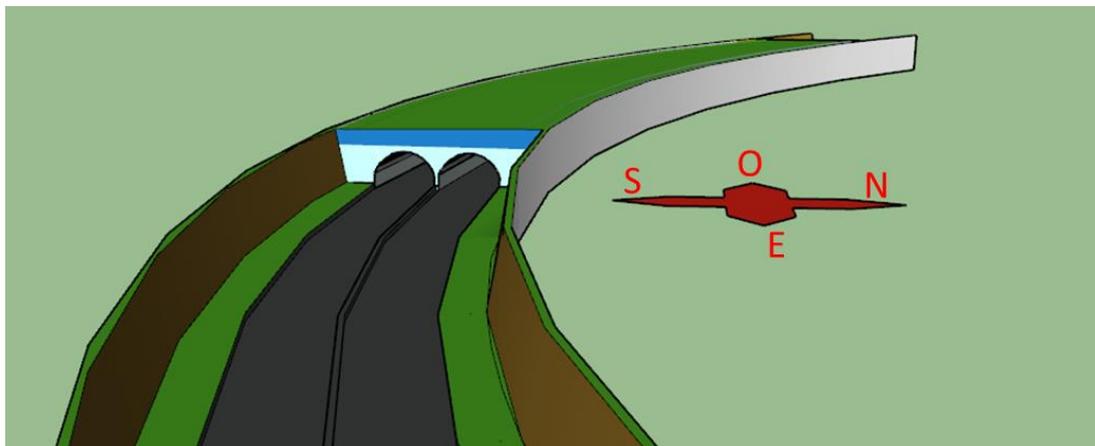


Figure 3-35 Modélisation Sketchup de la tranchée couverte du Noiret.

3.4.1.2 Propriétés de réflexion des matériaux

Le dispositif CAMEL est équipé d'une sonde HD 2021T6 permettant de mesurer une luminance moyenne dans un cône de 20° (angle au sommet total, il s'agit donc de la luminance L_{20} présentée dans la section **1.2.1.1 Origines de la méthode de la luminance moyenne L_{20}** (CEN 2006)). La sonde a été étalonnée par le fabricant juste avant son utilisation pour la tranchée couverte du Noiret. Un dispositif de stockage et de transmission de données à un serveur permet d'obtenir des valeurs de luminance toutes les minutes (mesures instantanées toutes les minutes). Lors de la seconde pose de CAMEL en août 2021, des photographies ont été réalisées depuis la position du capteur à l'aide d'un objectif Fish Eye. Ces images ont permis d'identifier les éléments présents dans le champ de vision de la sonde (voir Figure 3-36). Il faut cependant tenir compte du fait que la sonde n'était pas équipée d'un viseur optique, ce qui implique que la direction de visée n'était pas nécessairement parfaitement déterminée.

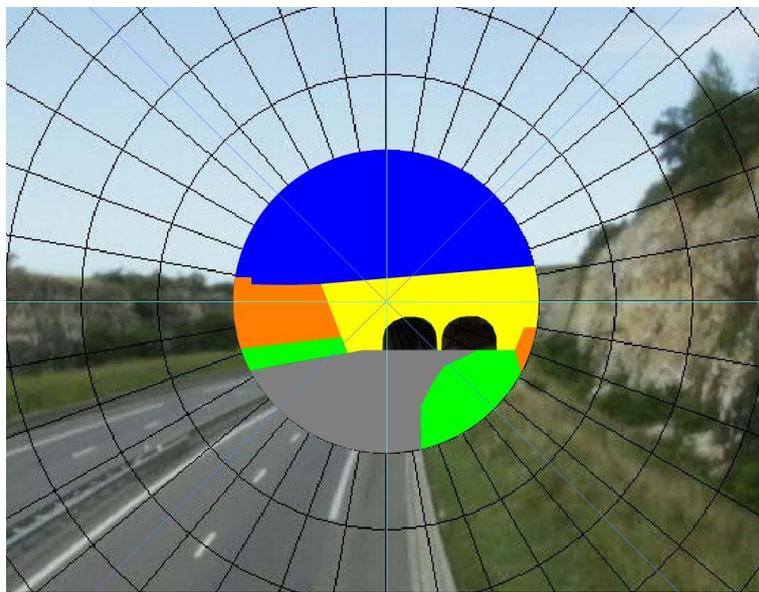


Figure 3-36 Photographie du portail d'entrée de la tranchée couverte du Noiret depuis la position de CAMEL. Les parties colorées indiquent les éléments présents dans un cône de vision de 20° (angle total au sommet). Le bleu indique la portion de ciel, l'orange indique les portions de roche, le jaune indique la portion de portail d'entrée, le vert indique les portions d'herbe.

Des cartes de luminance de l'entrée du tunnel, ainsi que de la voûte céleste, ont été réalisées depuis la position de la sonde, à l'aide du système « Photolux » développé à l'ENTPE. Ce système était constitué d'un appareil photo Canon EOS 50D (n°2130704589) équipé d'un objectif fish-eye Sigma 4.5 mm. L'ensemble avait été calibré en luminance juste avant le début du travail de thèse. Photolux produit une carte de luminance à partir de 8 photographies prises à des réglages différents (principe de la photographie HDR). Les mesures ont été effectuées vers 9h du matin sous un ciel presque totalement couvert de stratocumulus. Deux séries de photographies ont été prises : l'une dans le plan horizontal, l'autre dans le plan vertical faisant face à l'entrée du tunnel. Les valeurs de luminance moyenne des différents matériaux ont pu être déterminées à partir de la série d'images de l'entrée du tunnel. Les matériaux ont été

considérés comme parfaitement diffusants. La loi de Lambert a donc été utilisée pour calculer le facteur de réflexion diffus de chaque matériau présent dans le champ de vision de CAMEL (voir Tableau 3-20). Pour les matériaux situés à l'horizontale, nous avons utilisé l'éclairement horizontal E_h calculé par Photolux à partir de la carte de luminances des photographies prises à l'horizontale. Pour les matériaux de l'entrée du tunnel, nous avons utilisé un éclairement vertical égal à la moitié de l'éclairement horizontal : sous des conditions de ciel couvert, l'éclairement E_v d'une surface verticale s'appuyant sur un sol d'albédo 0.2 est égal à $0.396 E_h + 0.2 \frac{E_h}{2} = 0.496 E_h$. Il est à noter que ce calcul sous-estime probablement l'éclairement sur le fronton ou les roches car les stratocumulus ne filtraient pas complètement les rayons directs du soleil. Cette sous-estimation entraîne du fait de la loi de Lambert (voir équation [2-4] en section **2.2.2.1 Maquette**) une surestimation du facteur de réflexion des matériaux concernés. Cette constatation doit être gardée à l'esprit dans le cas où les simulations donneraient des luminances plus élevées que les valeurs mesurées par CAMEL.

Tableau 3-20 Eclairages, luminances et facteurs de réflexion résultants pour chaque matériau présent à l'intérieur du cercle de vision de 20°

	Eclairement (lx)	Luminance moyenne (cd/m ²)	Facteur de réflexion
Chaussée	15500	990	0.20
Herbes vertes gauche	15500	570	0.12
Herbes sèches droite	15500	760	0.15
Roches sales gauche	7750	480	0.19
Roches propres droite	7750	980	0.40
Fronton supérieur	7750	1080	0.44
Fronton inférieur	7750	1540	0.62

Ces données de facteurs de réflexion ont pu être importées dans OCEAN pour les simulations du portail d'entrée de la tranchée couverte.

3.4.2 Prise en compte du climat lumineux

Comme mentionné précédemment, l'objectif est de développer une méthode de modélisation des conditions climatiques, puis de comparer les résultats obtenus à l'aide de cette méthode avec les données réelles collectées grâce à CAMEL. Cette comparaison doit permettre de valider ou non les hypothèses de modélisation choisies.

3.4.2.1 Choix de la méthode de modélisation

La méthode de modélisation des conditions climatiques s'est appuyée sur celle présentée dans le travail de thèse de Mardaljevic (Mardaljevic 1999). Elle repose sur une division de la

voûte céleste en 145 zones distinctes (présentée en Figure 3-37 et préconisée par CIE 108 1994) et sur le calcul de l'influence de chacune des zones sur la scène. En pratique, un fichier d'éclairage naturel (présenté plus en détail dans la section **3.4.2.2 Fichier d'éclairage naturel des luminances du ciel et du soleil**) est utilisé pour associer des valeurs de luminance à chacune des zones de ciel à intervalle de temps régulier. Puis, en combinant l'influence de ces zones compte tenu de leur valeur de luminance, il est possible de reconstituer les conditions de ciel présentées dans le fichier d'éclairage naturel pour l'intervalle de temps considéré. Ces zones sont délimitées par des angles de zénith et des angles d'azimut précis (l'ouverture zénithale des zones est de 12° , exception faite de la zone 1 pour laquelle elle est de 6° . Pour les ouvertures azimutales, elles sont adaptées afin de faire en sorte que les angles solides sous lesquels sont vues les zones soient les plus proches possibles les uns des autres). En utilisant ces valeurs d'angles limites et en appliquant une projection équirectangulaire, il est possible de créer des images de ces zones de ciel qui pourront être plaquées sur une sphère (à la manière d'une carte du monde dont les pays situés au niveau des pôles sont déformés et apparaissent exagérément étendus). Le logiciel OCEAN est capable d'interpréter de telles images et de représenter leur équivalent sphérique. L'exemple des zones 1 et 2 est donné dans la Figure 3-38. Les deux premières images sont celles qui sont passées en paramètre pour la simulation OCEAN, la troisième est le résultat de cette simulation pour une caméra située au niveau du sol et pointée vers le ciel.

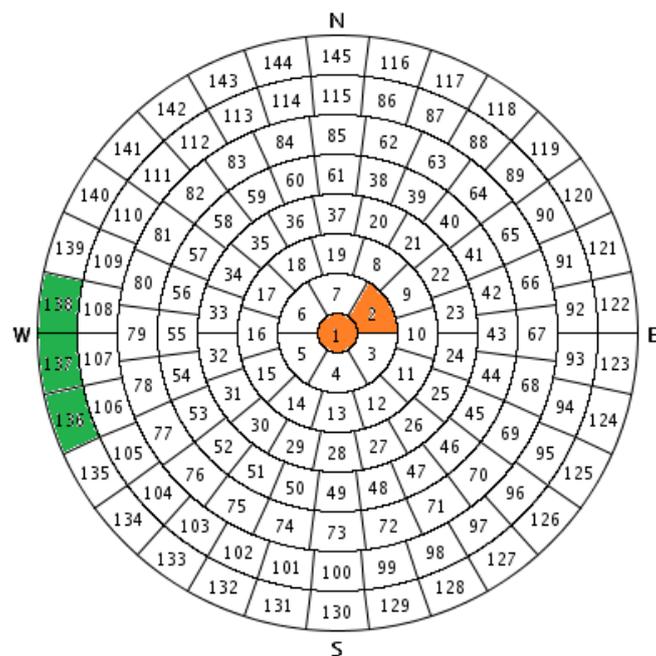


Figure 3-37 Schéma de séparation de la voûte céleste en 145 zones. Les zones oranges sont celles simulées en Figure 3-38, les zones vertes sont les zones vues directement dans le champ de vision de 20° de la caméra.

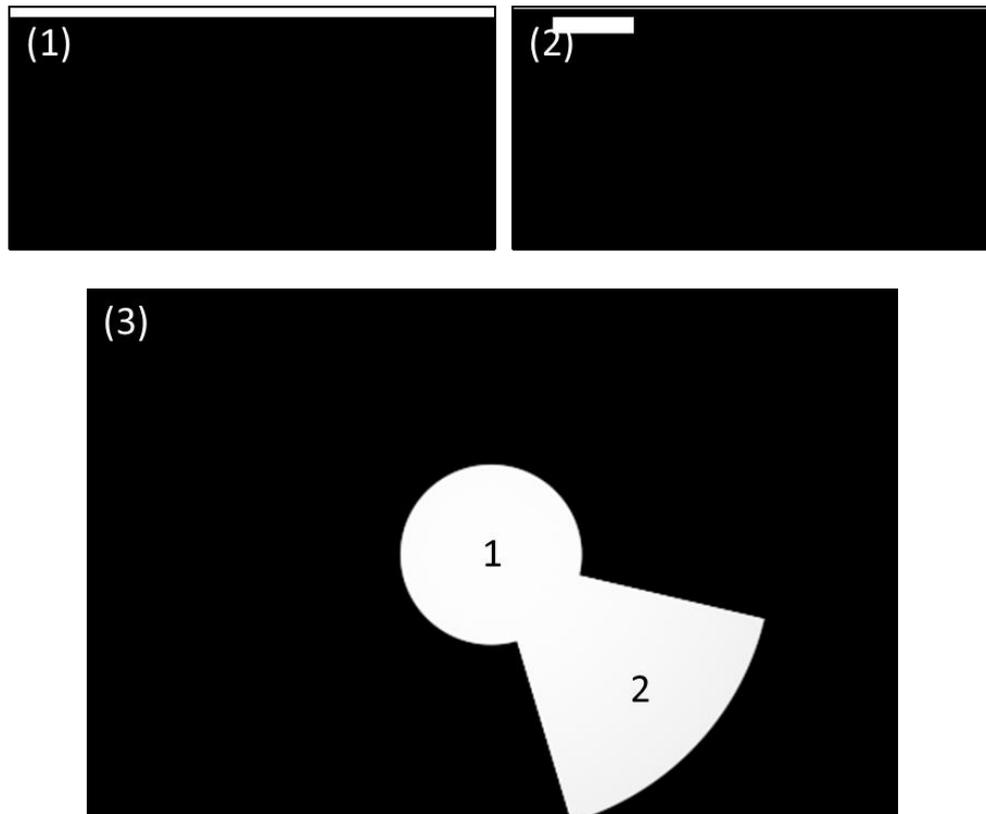


Figure 3-38 (1) Projection équirectangulaire de la zone 1 ; (2) Projection équirectangulaire de la zone 2 ; (3) Résultat de simulation sous OCEAN avec les images (1) et (2) passées en paramètre pour une caméra placée au niveau du sol et visant vers le zénith.

En appliquant ce procédé pour les 145 zones de ciel et en combinant les résultats, il est possible de reconstituer l'intégralité de la voûte céleste. En pratique, chacune des images passées en paramètre de la simulation OCEAN va donner une luminance de référence à la zone résultante correspondante. Cette luminance de référence est toujours la même pour toutes les zones de ciel, mais elle peut être modifiée indépendamment pour chacune d'entre elles à l'aide de simples facteurs correctifs. Ainsi, en gardant la luminance de référence constante pour chaque zone (10000 cd.m^{-2}) et en passant en paramètre de la simulation les 145 images correspondant aux 145 zones de ciel, on obtient sous OCEAN le même résultat qu'en ayant passé en paramètre un ciel parfaitement uniforme avec une luminance au zénith égale à la luminance de référence des zones de ciel.

Dans un second temps et afin de comparer les données collectées avec CAMEL et les résultats obtenus par simulation, le modèle 3D de la tranchée couverte du Noiret a été importée dans OCEAN et 145 simulations (une pour chaque zone de ciel) ont été réalisées avec une caméra située au même endroit que la sonde de CAMEL (un exemple est donné en Figure 3-39).

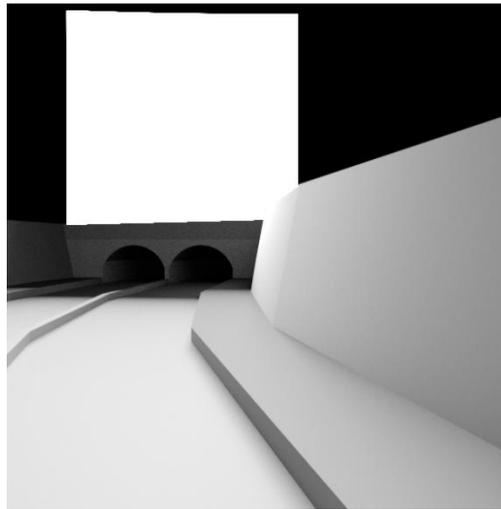


Figure 3-39 Exemple de rendu visuel obtenu sous OCEAN pour la tranchée couverte du Noiret, avec la zone 137 passée en paramètre

Ces 145 simulations constituent les simulations de référence sur lesquels le modèle s'appuie par la suite pour l'évaluation du L_{20} .

3.4.2.2 Fichier d'éclairage naturel des luminances du ciel et du soleil

L'objectif a ensuite été de pouvoir recréer les conditions de ciel au niveau du site du Noiret pour les périodes durant lesquelles CAMEL était en place. Pour ce faire, il nous a fallu obtenir les luminances des 145 zones de ciel pour chaque intervalle de temps considéré. En s'appuyant sur les estimations satellitaires Helioclim 3 (Thomas et al. 2015), nous avons pu constituer un fichier d'éclairage naturel retraçant les conditions de ciel sur les périodes de fonctionnement de CAMEL, avec des données tous les quarts d'heure (meilleure résolution temporelle possible avec ces données). Ce fichier indique, pour chaque quart d'heure, de nombreuses informations relatives aux conditions d'ensoleillement. Elles sont présentées en Tableau 3-21.

Tableau 3-21 Composition du fichier d'éclairage naturel final

Date & heure	Altitude du soleil	Azimut du soleil	Eclairement horizontal global	Eclairement horizontal diffus	Eclairement horizontal direct	Zone de ciel contenant le soleil	Luminance du soleil	Luminance zone de ciel 1	...	Luminance zone de ciel 145
mm/jj/aaaa hh:mm	Degré	Degré	Lux	Lux	Lux		cd/m ²	cd/m ²	...	cd/m ²

En pratique, la création du fichier d'éclairage naturel s'est appuyée sur les estimations satellitaires Helioclim 3 permettant de récupérer des éclairements énergétiques horizontaux diffus et direct tous les quarts d'heure, au niveau d'une localisation précise. En utilisant les

modèles d'efficacité lumineuse diffuse et directe de Perez (Perez et al. 1990), ces éclairagements énergétiques ont pu être convertis en éclairage lumineux. De la même façon, en appliquant le modèle de ciel ASRC de Perez (Perez et al. 1990) à ces valeurs d'éclairagements énergétiques, on a pu calculer les luminances du ciel sur un maillage régulier (tous les 5 degrés dans les directions zénithale et azimutale) par interpolation des luminances de 4 modèles de ciel : ciel CIE couvert, ciel intermédiaire de Nakamura, ciel bleu CIE trouble (dit de Gusev) et ciel bleu CIE pur (dit de Kittler). Ces premières valeurs de luminance obtenues sur un maillage régulier (835 mailles) ont ensuite été moyennées sur les 145 zones plus étendues (CIE 108 1994) présentées en Figure 3-37. Dans un second temps, la position du soleil a permis de déterminer quelle zone du ciel était occupée par l'astre à un instant donné. En considérant ensuite que cette zone représentait le soleil pour les conditions prises en compte, il a été possible de calculer la luminance de cette zone de ciel à partir de l'éclairage lumineux direct. La luminance finale des zones de ciel a donc pu être prise en compte en considérant les luminances obtenues pour les 145 zones de ciel à partir du modèle de Pérez, puis en ajoutant la luminance du soleil à la zone contenant l'astre.

Cette méthode a été utilisée tous les quarts d'heure pour produire les données du fichier d'éclairage naturel, et notamment les valeurs de luminance des 145 zones de ciel définies par la CIE résultant des conditions célestes observées.

De plus amples détails sur la création du fichier d'éclairage naturel, ainsi que sur le processus de validation des données produites, sont donnés en **annexe J : Note sur la création et la validation des fichiers d'éclairage naturel (données satellitaires)**. On notera tout de même deux éléments mis en évidence lors de la validation des données : les données satellitaires ont tendance à surestimer l'éclairage énergétique diffus, ainsi que l'éclairage énergétique global aux faibles hauteurs de soleil.

3.4.2.3 Fichier des visibilité météorologiques « visiground »

Le fichier d'éclairage naturel permet de récupérer les conditions de ciel auxquelles CAMEL a été confrontées durant sa période de mesure. Ces données ont été passées en paramètre de l'algorithme de calcul présenté ci-après en section **3.4.2.4 Calcul de L_{20}** . Cependant, cet algorithme de calcul se base sur les 145 images de référence établies sous OCEAN pour les différentes zones de ciel. Ainsi, comme OCEAN ne modélise pas d'atmosphère pour le paramètre d'entrée choisi pour l'éclairage naturel (projection équirectangulaire de sources), les résultats obtenus par simulation ne tiennent pas compte de la luminance de voile d'atmosphère. A contrario, CAMEL étant un dispositif de mesure placé sur le terrain, les données collectées sont nécessairement impactées par cette luminance de voile d'atmosphère. Il convient donc de tenir compte de ce paramètre dans les résultats de simulation afin qu'ils soient homogènes avec les données mesurées. Pour ce faire, une valeur de luminance de voile d'atmosphère doit être artificiellement ajoutée aux résultats de simulation. Cette valeur est issue de la formule de Padmos présentée en section **1.2.1.2**

Origines de la méthode de la luminance de voile L_{seq} (CIE 88 2004), dont l'application dans la méthode de calcul est détaillée ci-après. La formule de calcul du L_{atm} proposée par Padmos repose notamment sur la visibilité météorologique : cette donnée a donc dû être passée en paramètre d'entrée de l'algorithme de calcul pour obtenir les valeurs de luminance finales. En pratique, il s'agissait donc de créer un fichier qui regroupe des données de visibilité météorologique avec un pas de temps identique à celui du fichier d'éclairage naturel. Ces données sont disponibles grâce aux stations Météo France (<https://donneespubliques.meteofrance.fr>). Il s'agit de données collectées par des stations au niveau du sol. La station SYNOP la plus proche du site du Noiret est la station de Lyon Saint Exupéry (code SYNOP 7481), les données utilisées ci-après correspondent donc à cette station.

Il est à noter que les relevés se font toutes les 3 heures, le fichier final devant contenir des données tous les quarts d'heure afin d'être homogène avec le fichier d'éclairage naturel, une interpolation linéaire a été utilisée pour créer les valeurs de visibilité toutes les 15 minutes.

3.4.2.4 Calcul de L_{20}

Une fois le fichier d'éclairage naturel et le fichier contenant les données de visibilité météorologiques constitués, il a été possible de recréer une image représentant les conditions de luminance de voile mesurées par CAMEL pour un quart d'heure donné en combinant les 145 simulations de référence et les données d'éclairage naturel. Le détail de la création de cette image recomposée est donné par l'équation [3-13].

$$L_{pixel_{ij}} = \sum_{k=1}^{145} L_{pixel,ref_{kij}} \frac{L_{ciel_k}}{L_{ciel,ref}} + L_{pixel,ref_{z_{sij}}} \frac{L_{soleil}}{L_{ciel,ref}} \quad [3-13]$$

Avec $L_{pixel_{ij}}$ la luminance du pixel situé ligne i colonne j dans l'image résultant des conditions d'éclairage naturel prises en compte ($cd.m^{-2}$) ;

$L_{pixel,ref_{kij}}$ la luminance du pixel i, j pour la simulation de référence effectuée avec la zone de ciel k allumée ($cd.m^{-2}$) ;

L_{ciel_k} la luminance moyenne de la zone de ciel k pour la condition d'éclairage naturel considérée ($cd.m^{-2}$) ;

$L_{ciel,ref}$ la luminance moyenne de la zone de ciel k prise en compte dans les simulations ($10\,000\,cd.m^{-2}$) ;

$L_{pixel,ref_{z_{sij}}}$ la luminance du pixel i, j pour la simulation de référence effectuée avec la zone de ciel contenant le soleil allumée ($cd.m^{-2}$) ;

L_{soleil} la luminance moyenne du soleil sur la zone qu'il occupe ($cd.m^{-2}$).

Une fois les conditions d'éclairage naturel recréées pour la prise de vue de la simulation, l'évaluation de la luminance L_{20} a dû être réalisée sur cette image recomposée. Dans un premier temps, il s'agissait de déterminer quels pixels de l'image résultante étaient inclus dans un cercle de 20° centré au milieu de l'image. Pour calculer l'angle entre un pixel donné et le

centre de l'image, la méthode présentée ci-après a été utilisée (résumée en Figure 3-41). La distance séparant le centre de l'image de la projection du pixel considéré sur l'axe des x est donnée par l'équation [3-14]. Cette équation est également valable pour calculer la distance entre le centre de l'image et la projection du pixel sur l'axe des y en adaptant les indices.

$$D_{c,x} = n_{pixel_{c,x}} \frac{L_x}{n_{pixel_x}} \quad [3-14]$$

Avec $D_{c,x}$ la distance entre le centre de l'image et la projection du pixel considéré sur l'axe des x (m) ;

$n_{pixel_{c,x}}$ le nombre de pixels séparant le centre de l'image et la projection du pixel considéré sur l'axe des x ;

L_x la longueur du capteur selon l'axe des x (m) ;

n_{pixel_x} le nombre de pixels de l'image selon l'axe des x.

La distance séparant le centre de l'image du pixel sur le capteur est donnée par l'équation [3-15].

$$D_{capteur} = \sqrt{D_{c,x}^2 + D_{c,y}^2} \quad [3-15]$$

Avec $D_{capteur}$ la distance entre le centre du capteur et le pixel considéré (m) ;

$D_{c,y}$ la distance entre le centre du capteur et la projection sur l'axe des y du pixel considéré (m) ;

L'angle entre le centre du capteur et le pixel considéré est ensuite donné par l'équation [3-16].

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D_{capteur}}{f}\right) \quad [3-16]$$

Avec α l'angle entre le centre de l'image et le pixel considéré (°) ;

f la distance focale de la caméra utilisée dans la simulation (0.04m, distance focale pré-réglée pour l'outil « ideal perspective camera » d'OCEAN).

Le calcul de la luminance moyenne dans un cône de 20° pour l'image simulée a ensuite pu être effectué. Il est présenté en équation [3-17].

$$L_{20} = \frac{\sum_{\alpha=0^\circ}^{10^\circ} L_{pixel_{i,j}} \Omega_{i,j} \cos(\alpha)}{\sum_{\alpha=0^\circ}^{10^\circ} \Omega_{i,j}} \quad [3-17]$$

Avec L_{20} la luminance moyenne dans un cône de 20° (angle total au sommet) pour l'image simulée (cd.m⁻²) ;

$L_{pixel_{i,j}}$ la luminance du pixel situé ligne i et colonne j ($cd.m^{-2}$), l'angle entre ce pixel et le centre de l'image doit être inférieur ou égal à 10° pour qu'il soit pris en compte dans la somme ;

$\Omega_{i,j}$ l'angle solide sous lequel est vu le pixel situé ligne i et colonne j (sr), pour cette méthode une approximation est utilisée et $\Omega_{i,j}$ est considéré constant pour chaque pixel de l'image.

L'hypothèse émise sur les angles solides sous lesquels sont vus les pixels permet de réécrire la formule ci-dessus.

$$L_{20} = \frac{\sum_{\alpha=0^\circ}^{10^\circ} L_{pixel_{i,j}} \cos(\alpha)}{n_{pixel_{10^\circ}}} \quad [3-18]$$

Avec $n_{pixel_{10^\circ}}$ le nombre de pixels de l'image dont l'angle α avec le centre de l'image est inférieur ou égal à 10° .

Cette valeur constitue la valeur de luminance « brute » issue de l'image simulée sous OCEAN, comme mentionné précédemment, elle ne tient donc pas compte de la luminance de voile d'atmosphère. Afin de corriger cela, cette dernière a dû être ajoutée à chaque valeur de luminance de pixel dans l'équation [3-19].

$$L_{20} = \frac{\sum_{\alpha=0^\circ}^{10^\circ} (L_{pixel_{i,j}} + L_{atm}) \cos(\alpha)}{n_{pixel_{10^\circ}}} \quad [3-19]$$

Le calcul de L_{atm} s'est fait selon la formule de Padmos, qui se base sur la visibilité météorologique disponible dans le fichier dédié, mais également sur la luminance moyenne dans un champ de vision de 20° pour une position de l'observateur 150 m en amont du portail d'entrée du tunnel. Cette deuxième variable a pu être obtenue à partir de l'image simulée. Pour cela, il a fallu déterminer quelle ouverture angulaire devait être prise en compte à partir de la position de la caméra, pour obtenir le même champ de vision au niveau du portail d'entrée que lorsqu'on considère un cône de 20° d'angle d'ouverture total depuis une position située 150 m en amont du portail d'entrée. Le demi-angle au sommet du cône à prendre en compte depuis la position de la caméra est donné par l'équation [3-20]. La méthode est détaillée par la Figure 3-40.

$$\theta_{DO} = \arctan\left(\tan(10^\circ) \frac{150}{D_{camera}}\right) \quad [3-20]$$

Avec θ_{DO} le demi-angle au sommet du cône à prendre en compte depuis la position de référence de la caméra, pour avoir un champ de vision équivalent à celui offert par le cône de demi-angle au sommet 10° à 150m.

D_{camera} la distance entre la caméra utilisée sous OCEAN et le portail d'entrée du tunnel (194 m).

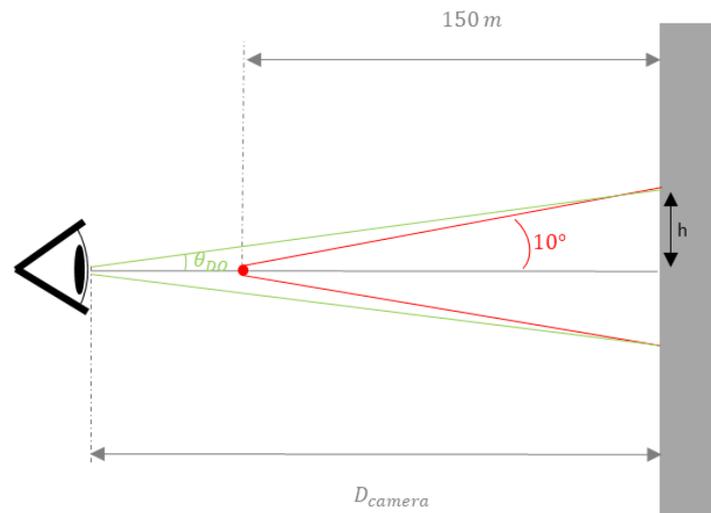


Figure 3-40 Schéma explicatif du changement d'angle à effectuer pour le calcul du L_0 (voir définition dans l'équation [3-21])

Ensuite, la luminance L_{20} à 150 m de l'entrée du tunnel (notée L_0) a pu être calculée selon l'équation [3-18] en remplaçant la borne supérieure de la somme par θ_{D0} et en adaptant en conséquence le nombre de pixels donné au dénominateur.

Une fois L_0 déterminée, l'équation de Padmos a pu être utilisée pour caractériser la luminance de voile d'atmosphère.

$$L_{atm} = \left(3.8 \frac{DA}{V_m}\right) L_0 \left(1 + \frac{3.8 \times 150}{V_m}\right) \quad [3-21]$$

Avec DA la distance d'arrêt (m) ;

V_m la visibilité météorologique (m) ;

L_0 la luminance moyenne dans un cône de 20° d'ouverture totale évaluée 150 m en amont de l'entrée du tunnel (cd.m^{-2}).

Comme on peut le voir, l'équation de Padmos indique que la valeur de la luminance de voile d'atmosphère augmente avec la distance d'arrêt, puisque la couche d'air traversée par la lumière avant d'arriver à l'œil de l'observateur va s'épaissir. De la même façon, lorsque la visibilité météorologique diminue, c'est-à-dire lorsque l'atmosphère s'opacifie, la valeur de L_{atm} augmente logiquement.

Le terme supplémentaire par rapport à l'équation [1-5] présentée en section **1.2.1.2 Origines de la méthode de la luminance de voile L_{seq} (CIE 88 2004)** correspond à la prise en compte de la luminance de voile d'atmosphère dans le calcul du L_0 à partir des images simulées. En effet, comme mentionné précédemment, OCEAN ne permet pas de modéliser une atmosphère et comme L_0 est calculée à partir des images simulées, l'impact de la luminance de voile d'atmosphère doit donc être ajouté artificiellement au calcul.

Ainsi, une image simulée a été produite tous les quarts d'heure en accord avec les conditions de ciel présentées dans le fichier d'éclairage naturel (un exemple est donné en Figure 3-42). La luminance de voile d'atmosphère a été ajoutée artificiellement à chaque valeur de pixel dans l'image à partir des données de visibilité météorologiques réunies dans le fichier visiground. La luminance de voile L_{20} a ensuite pu être calculée pour chacune de ces images simulées.

La Figure 3-41 résume la méthode de calcul utilisée. La Figure 3-42 présente un exemple d'images simulées pour les conditions climatiques du 23/11/2019 à 12:08 et du 17/05/2020 à 12:08.

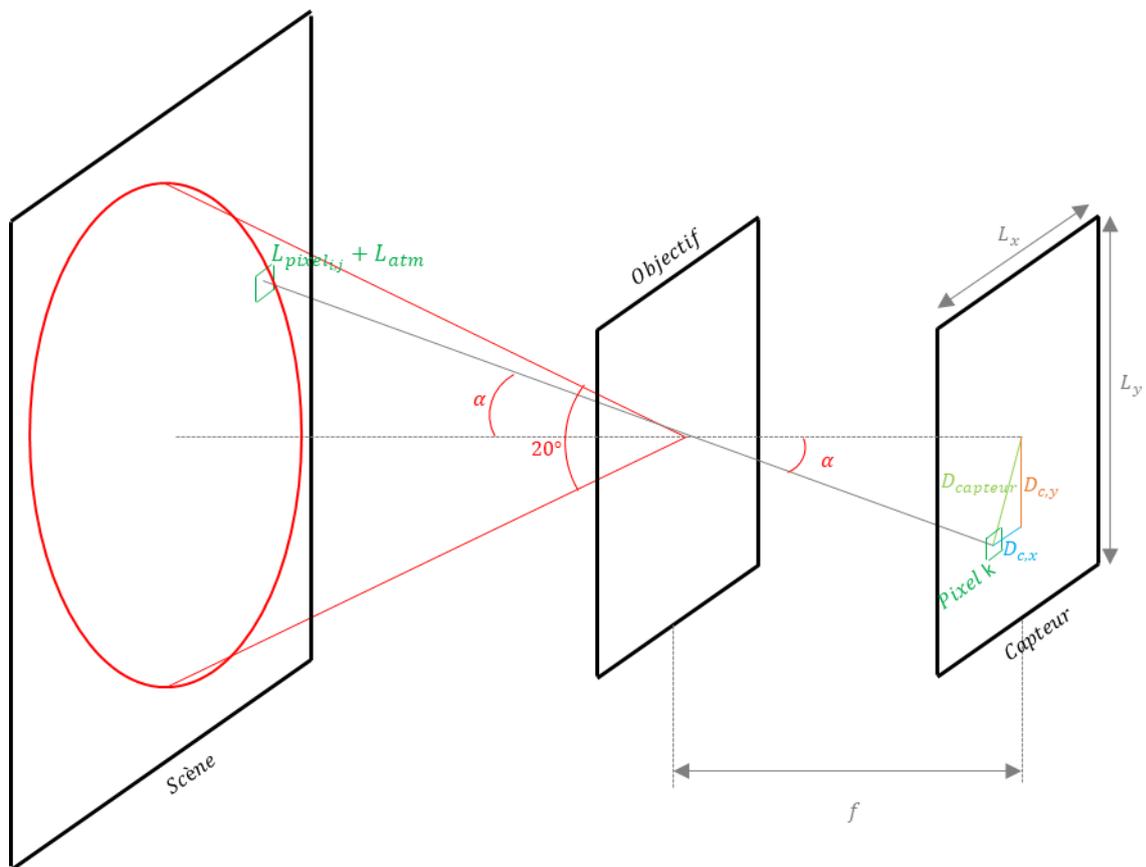


Figure 3-41 Résumé de la méthode de calcul du L_{20} pour une image donnée

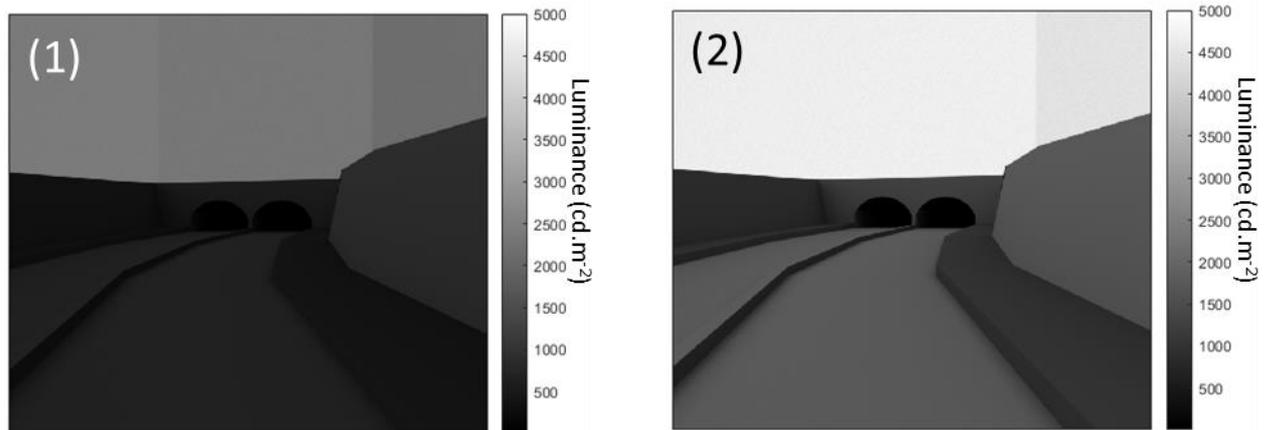


Figure 3-42 Exemples de cartes de luminance obtenues (résultats présentés dans Matlab) avec l'algorithme de calcul. (1) Conditions du 23/11/2019 à 12:08 (ciel couvert); (2) Conditions du 17/05/2020 à 12:08 (ciel bleu)

3.4.3 Comparaison des résultats de simulation avec les données CAMEL

L'objectif de cette section est de finaliser le calage du modèle numérique en vérifiant que les luminances de voile obtenues par simulation restent proches de celles mesurées sur le terrain par le dispositif CAMEL. Une étape préliminaire nécessaire a donc été de présenter les données CAMEL (valeur de luminance toutes les minutes dans le fichier original) de la même manière que les résultats de simulation (données tous les quarts d'heure), afin de pouvoir les comparer entre eux. Les données CAMEL disponibles toutes les minutes ont donc été moyennées par quart d'heure (pour une luminance de voile issue des résultats de simulation donnée à l'instant t , on prend la moyenne de $t-7$ minutes à $t+7$ minutes pour les données CAMEL).

De nombreuses versions ont été testées sous OCEAN jusqu'à obtenir des résultats de simulation relativement proches des données mesurées. Les deux principaux paramètres d'entrée de la simulation qui ont été modifiés au cours de ces différentes versions étaient les facteurs de réflexion des matériaux composant le modèle, ainsi que l'orientation de la caméra donnant les résultats, du fait des incertitudes entourant ces deux variables. Les modifications de visée de la caméra sous OCEAN se sont notamment faites suite aux premiers résultats, qui montraient un décalage relativement marqué entre l'heure d'apparition du pic de luminance le soir (dû à l'apparition du soleil dans le champ de vision de la caméra) pour les données CAMEL et pour les résultats de simulation. Pour les facteurs de réflexion, les résultats de simulation ont montré des valeurs de luminance de voile bien plus élevées que celles des données CAMEL, et ces derniers ont donc été diminués au fur-et-à-mesure des différentes versions de simulation effectuées. Les facteurs de réflexion pris en compte pour la version de simulation finale sont indiqués en Tableau 3-22.

Tableau 3-22 Evolutions des facteurs de réflexion passés en paramètre de la modélisation entre la première et la dernière version de simulation

	Chaussée	Herbes vertes gauche	Herbes sèches droite	Roches sales gauche	Roches propres droite	Fronton supérieur	Fronton inférieur
Facteur de réflexion première version	0.2	0.12	0.15	0.19	0.4	0.44	0.62
Facteur de réflexion dernière version	0.1	0.12	0.12	0.19	0.3	0.3	0.3

Les premiers résultats donnant généralement des luminances de voile trop élevées, les valeurs de facteurs de réflexion jugées trop importantes ont été diminuées au fur-et-à-mesure des différentes versions testées. Ce résultat était attendu du fait que les valeurs de facteurs de réflexion utilisées pour les surfaces verticales en première approche étaient probablement surestimées (voir section **3.4.1.2 Propriétés de réflexion des matériaux**). L'idéal aurait été de pouvoir faire une mesure classique de facteur de réflexion, directement sur les différentes surfaces verticales présentes dans le champ de vision de la caméra (voir **section 2.2.2.1 Maquette**). Cela n'a malheureusement pas été possible pour des raisons de sécurité et d'accès restreint au site autoroutier. Une autre possibilité aurait été de prendre une photographie en se plaçant dos au portail d'entrée, afin d'avoir une carte de luminance permettant d'estimer la valeur d'éclairement vertical incident sur les frontons.

La comparaison des données entre luminances de voiles simulées et mesurées s'est faite du 18/09/2019 au 02/06/2020, sur tous les quarts d'heure compris entre ces deux dates. Un exemple de comparaison graphique mensuelle entre ces deux jeux de données est présenté en **annexe I : Comparaison mensuelle des données L_{20} mesurées par CAMEL et simulées sous OCEAN pour la tranchée couverte du Noiret (mois de mars 2020)**. Une première étape a été d'identifier des profils de luminance de voile journaliers représentatifs de ce qui a pu être observé sur de nombreux jours. L'objectif de cette étape préliminaire a été d'identifier d'éventuelles erreurs récurrentes. Les jours choisis correspondaient à différents types de conditions d'ensoleillement pour couvrir le maximum de cas de figure possibles.

Ces profils sont présentés en Figure 3-43, en et en Figure 3-45. Il s'agit des profils obtenus pour la dernière version de simulation.

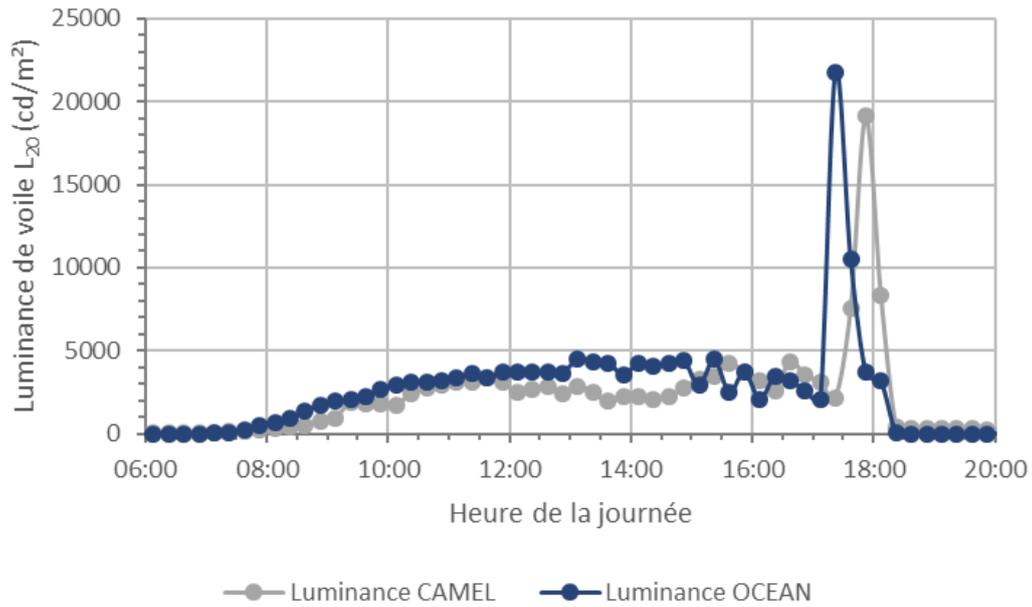


Figure 3-43 Profil de luminance de voile L_{20} mesuré et simulé pour la journée du 03/03/2020 (nuageux + pic d'ensoleillement en fin de journée)

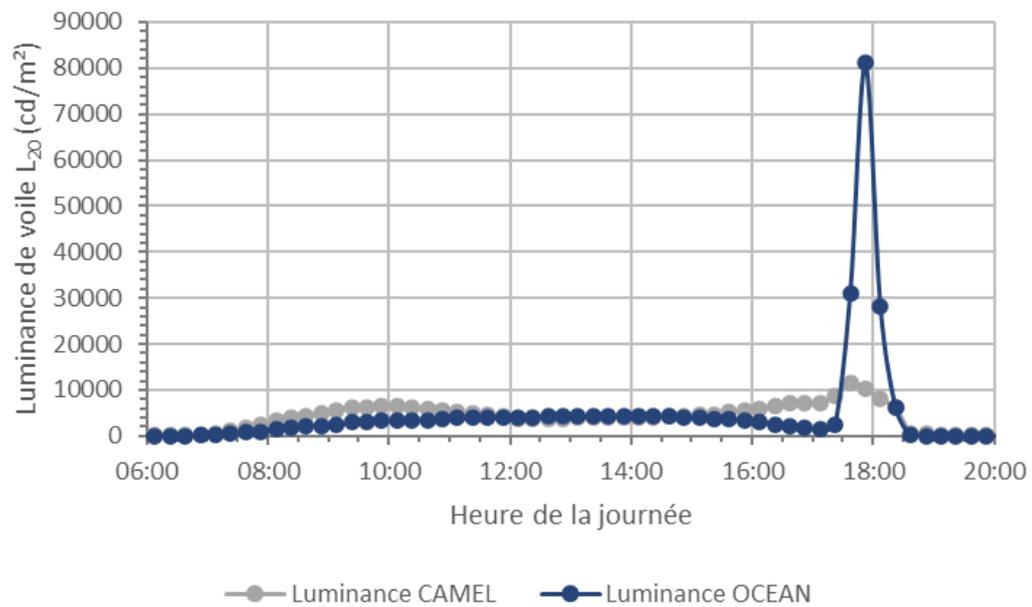


Figure 3-44 Profil de luminance de voile L_{20} mesuré et simulé pour la journée du 18/03/2020 (ciel bleu + pic d'ensoleillement en fin de journée)

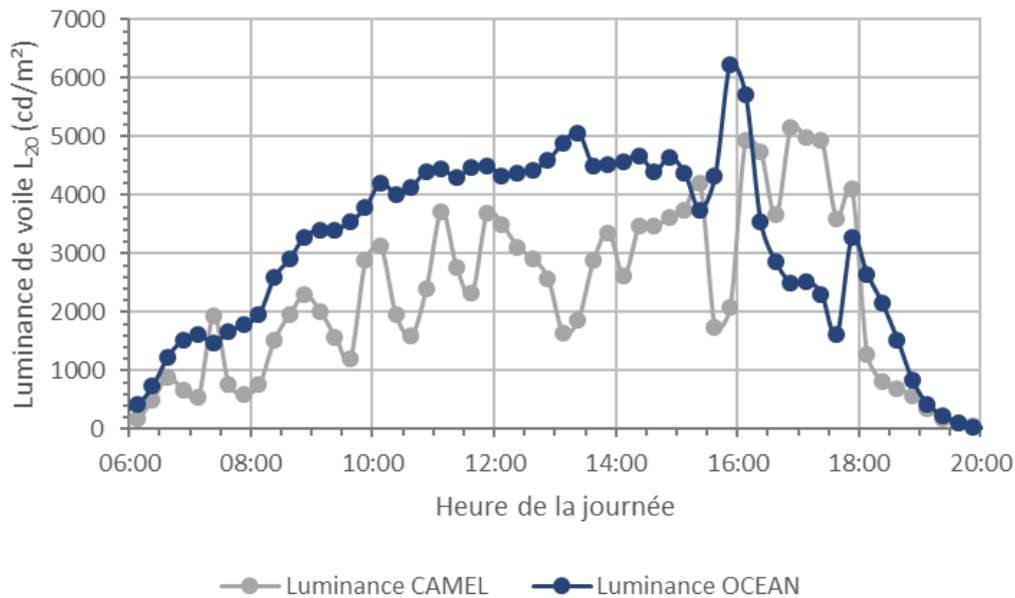


Figure 3-45 Profil de luminance de voile L_{20} mesuré et simulé pour la journée du 06/05/2020 (nuageux)

Les résultats ont montré un décalage du pic de luminance de voile pouvant être observé le soir de certains jours (Figure 3-43). Ce dernier correspond à l'apparition du soleil dans le champ de vision de la caméra ou de la sonde CAMEL. Les deux explications pouvant être apportées à ce décalage sont les suivantes : d'une part les simulations s'appuient sur un maillage du ciel, ce qui signifie que dès lors que le soleil se trouve dans une maille, la totalité de celle-ci se verra attribuée la luminance de l'astre. Ainsi, si le soleil se trouve dans une maille qui impacte directement le L_{20} de la simulation, sans pour autant être dans le champ de vision de la sonde CAMEL, le pic de luminance de voile sera visible dans les simulations sans l'être dans les données réelles. La Figure 3-46 montre les mailles présentes dans le cône L_{20} pris en compte dans les simulations (champ de vision théorique de CAMEL). Comme on peut le constater, le soleil peut notamment se trouver dans la maille 136, sans pour autant être directement présent dans le champ de vision de CAMEL. D'autre part, des imprécisions sur l'orientation de la scène et de la caméra ont pu être réalisées dans le modèle, ce qui pourrait expliquer également les décalages de pics par rapport aux données réelles. Enfin, comme mentionné précédemment, les données satellitaires ont tendance à surestimer l'éclairement énergétique global pour les faibles hauteurs de soleil, ce qui pourrait également expliquer que le pic de luminance soit vu plus tôt dans les simulations que dans les mesures réelles.

De la même manière que précédemment, pour certains profils un pic de luminance de voile était observable en fin de journée pour les données simulées, mais pas pour les données réelles (). Ce cas peut s'expliquer par le fait que le soleil ne passe jamais dans le champ de vision du dispositif CAMEL, mais pénètre néanmoins dans une des mailles de ciel qui impactent le champ de vision de la caméra dans la simulation. A nouveau, si on se réfère à la Figure 3-46,

on peut voir que le soleil peut pénétrer dans la maille 136 puis disparaître derrière l'horizon sans jamais passer dans le cône L_{20} dans certains cas de figure bien précis.

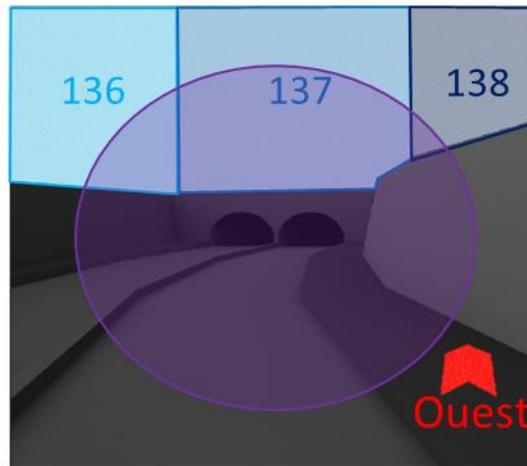


Figure 3-46 Représentation des zones de ciel 136, 137 et 138 telles que vues par la caméra sous OCEAN (paramètres finaux retenus pour la position de la caméra). Le cercle violet donne la zone de mesure du L_{20}

Un autre phénomène observable sur de nombreux profils, est une luminance de voile matinale réelle plus élevée que celle simulée (). Les premières hypothèses émises pour expliquer ces résultats portaient sur le facteur de réflexion du portail d'entrée qui serait trop faible. Au cours des tests menés sur les différentes versions, il est apparu que la modification de ce paramètre pouvait corriger l'écart entre les luminances du matin, mais entraînait alors des valeurs de luminance simulée en milieu de journée bien plus élevée que celles réelles. De plus, les changements apportés au facteur de réflexion du portail d'entrée ne modifiait pas la forme de la courbe : les profils de luminance de voile réelle par temps ensoleillé présentaient généralement un accroissement des valeurs le matin, une baisse en milieu de journée, puis une nouvelle augmentation le soir, tandis que les profils simulés montraient un accroissement jusqu'en milieu de journée, puis une baisse constante jusqu'au soir (exception faite des cas où on observait le pic de luminance dû à l'apparition du soleil dans le champ de vision de la caméra). Une autre explication envisageable serait une mauvaise prise en compte de la luminance de voile d'atmosphère dans les données simulées due à la distance entre le site d'étude et la station de collecte des données de visibilité météorologique (le tunnel du Noiret et la station SYNOP de Saint Exupéry sont situés à environ 85 km l'un de l'autre). En effet, les luminances des éléments de décor prises en compte par la sonde CAMEL sont impactées par l'atmosphère que la lumière doit traverser avant d'arriver au capteur (dispersion de la lumière en traversant la couche d'air séparant le point de mesure de la sonde). Cet impact, que l'on nomme luminance de voile d'atmosphère, dépend fortement des conditions météorologiques du site, et notamment de la présence ou non de brouillard qui peut être un phénomène relativement localisé. La distance entre le site et la station de collecte des données ne permet évidemment pas de retranscrire d'éventuels épisodes de baisse de visibilité localisés au niveau du site. Ainsi, si ce dernier est sujet à un léger brouillard en matinée se dissipant en milieu de

journée, la luminance de voile d'atmosphère serait alors plus élevée le matin, augmentant ainsi la luminance de voile totale, et elle faiblirait en milieu de journée, donnant une luminance de voile plus faible. Au vu des données collectées à la station SYNOP de Saint Exupéry, ce phénomène de brouillard matinal n'est pas observable, les écarts matinaux entre simulations et mesures réelles pourraient donc potentiellement s'expliquer par cela. Les éventuels épisodes de brouillard matinaux n'ont pas pu être vérifiés sur site et cette justification reste donc purement une hypothèse, quoique vraisemblable.

On a également pu observer que les pics de luminance de voile du soir étaient moins abrupts dans les données réelles que dans les données simulées (). En pratique, on observe une augmentation progressive de la luminance de voile avant l'apparition du pic, tandis que pour les données simulées, le pic apparaît généralement après une baisse des niveaux de luminance. Pour expliquer ce phénomène, les coefficients d'influence des zones de ciel sur la valeur de L_{20} simulée ont été calculés. Chaque zone de ciel a été allumée successivement pour une luminance moyenne de référence (10000 cd.m^{-2}) et le L_{20} résultant a été calculé pour chacun de ces cas de figure. Ensuite, toutes les zones de ciel ont été allumées simultanément et une nouvelle valeur de L_{20} a été calculée. L'équation [3-22] donne ensuite le coefficient d'influence d'une zone de ciel sur la valeur de L_{20} calculée.

$$C_{z_j} = \frac{L_{20j}}{\sum_j L_{20j}} \quad [3-22]$$

Avec C_{z_j} le coefficient d'influence de la zone de ciel j sur la valeur de L_{20} calculée ;

L_{20j} la luminance de voile mesurée lorsque seule la zone de ciel j est allumée à la luminance moyenne de référence (cd.m^{-2}).

Les résultats obtenus montrent que la somme des coefficients d'influence des zones 136 (0.14), 137 (0.61) et 138 (0.02) est supérieure à 0.75. Ces trois zones représentent donc une influence énorme sur le résultat final obtenu pour la luminance de voile. En analysant le fichier d'éclairage naturel, on s'aperçoit que lorsque le soleil est dans une zone de ciel, on a très peu d'impact sur les zones adjacentes en termes de luminance diffuse, cela pourrait s'expliquer par le fait que le trouble atmosphérique est globalement faible au niveau du site du Noiret, la zone circumsolaire serait alors relativement étroite et on aurait peu d'impact sur les zones de ciel adjacentes. Ainsi, tant que la maille dans laquelle se trouve le soleil n'est pas une des mailles influençant directement le L_{20} , la luminance de voile obtenue par modélisation climatique décroît avec les luminances diffuses des zones de ciel. Cela explique que l'on n'ait pas d'accroissement progressif des niveaux de luminance de voile avant l'apparition du pic dû au soleil dans les simulations.

Enfin, en analysant la Figure 3-45, on s'aperçoit que dans le cas d'un temps nuageux, la simulation suit la tendance générale de luminance de voile observée pour les mesures réelles, mais elle ne parvient pas à représenter fidèlement les variations importantes de ces mesures. La simulation a tendance à lisser les résultats obtenus. Cela s'explique notamment par le fait

que les images satellites à l'origine des données ont une résolution spatiale de l'ordre d'un rectangle de 5 km (longitude) par 7km (latitude), il est par conséquent difficile de caractériser correctement les variations locales dans l'opacité de la couverture nuageuse.

Dans un second temps, les valeurs annuelles obtenues ont été comparées afin d'avoir un aperçu plus global des résultats. La Figure 3-47 et la Figure 3-48 comparent les résultats obtenus entre septembre 2019 et juin 2020 pour les données simulées et mesurées. Seules les données pour lesquelles un éclairage horizontal global supérieur à 100 lx était mesuré ont été prises en compte dans cette étude statistique.

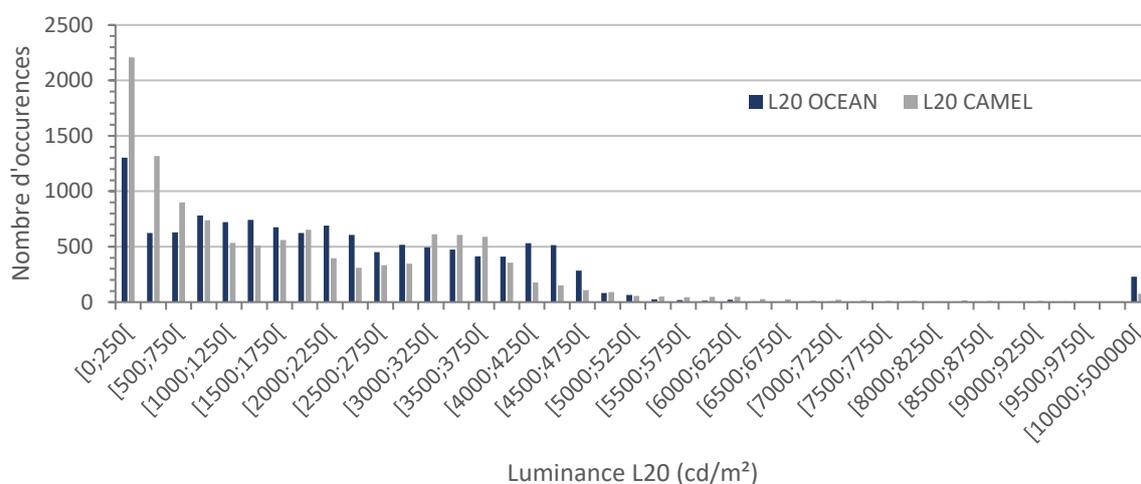


Figure 3-47 Histogramme des luminances de voile L_{20} pour les données mesurées et simulées. Les données prises en compte sont celles pour lesquelles l'éclairage horizontal global est supérieur à 100 lx.

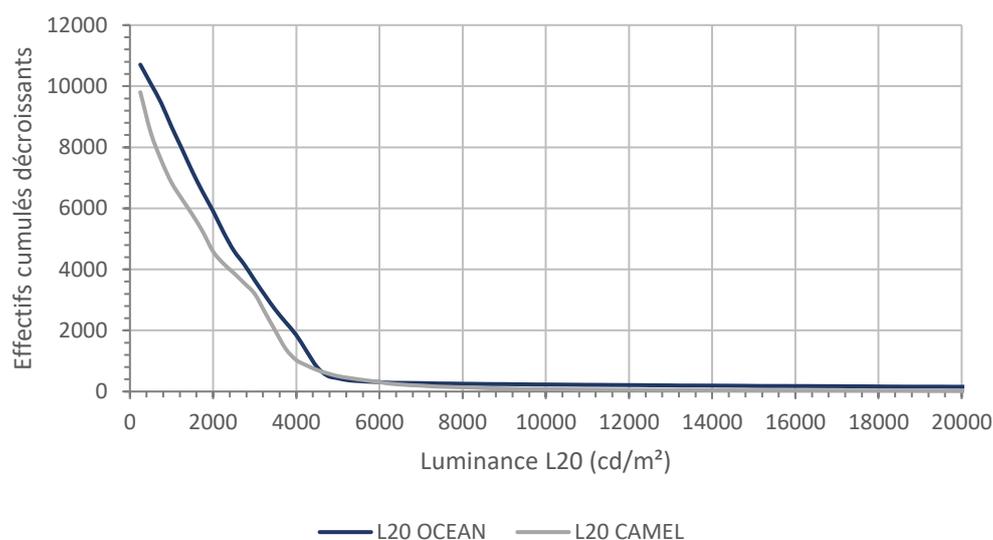


Figure 3-48 Effectifs cumulés décroissants des luminances de voile L_{20} pour les données mesurées et simulées. Les données prises en compte sont celles pour lesquelles l'éclairage horizontal global est supérieur à 100 lx.

Tableau 3-23 Comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées pour les luminances de voile L_{20}

	Nombre de données	Moyenne des données mesurées	MBE	RMSE	rMBE	rRMSE	R2 Pearson
L_{20}	24777	928.7 cd/m ²	408.5 cd/m ²	4324 cd/m ²	44%	466%	0.42

Les résultats ont montré des écarts relativement importants entre les données simulées et les données réelles, avec une corrélation moyenne entre les deux jeux de données (coefficient de Pearson de 0.42). L'analyse de l'histogramme montre qu'on a plus de données CAMEL que de données OCEAN dans la plage couvrant 0 à 750 cd/m². A contrario, les données OCEAN sont plus nombreuses pour la plage allant de 3750 à 4750 cd/m². Les profils d'effectifs cumulés montrent des résultats relativement proches visuellement.

Le calage de la modélisation climatique a mis en avant certaines erreurs sur les données simulées. Les pistes explicatives sont rappelées ci-après.

- (1) Le maillage peut-être trop grossier de la voûte céleste constitue potentiellement une source d'erreur, le problème se faisant principalement sentir dans le cas où le soleil se retrouvait dans le champ de vision de la caméra utilisée pour la simulation, alors qu'il n'était pas dans celui de la sonde CAMEL. Une piste d'amélioration envisageable serait d'affiner le maillage du ciel dans un premier temps, il convient néanmoins de garder à l'esprit que les temps de simulation augmenteront nécessairement. Afin de limiter cette augmentation des temps de simulation, il serait envisageable d'adopter un maillage dans lequel les mailles occupées par le soleil dans l'année seraient plus fines, et les autres mailles plus grandes, comme le montre l'exemple de la Figure 3-49 (<https://recherche.cstb.fr/fr/offres/expertises/eclairage/>). Cet exemple de maillage comporte 359 zones, soit une densité de mailles environ 2.5 fois plus importante que celle de la CIE. Il serait alors possible de voir si ce type de maillage pourrait potentiellement améliorer la qualité des résultats de simulations. Il est à noter que ce maillage dépend de la course du soleil dans le ciel, il ne peut donc être appliqué qu'à un lieu précis ou une zone de latitude donnée pour laquelle la trajectoire du soleil est valable pour les mailles plus petites. Ce type de maillage peut être généré pour n'importe quel endroit dans le monde, mais la zone de mailles plus fines devra être modifiée en fonction du lieu considéré.

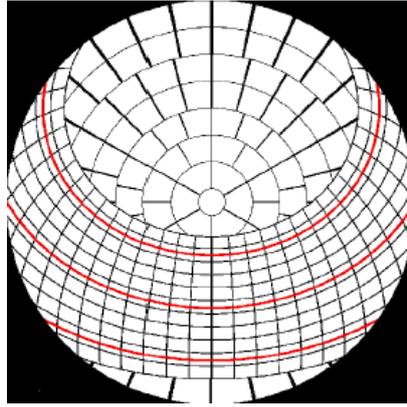


Figure 3-49 Exemple de maillage de ciel plus fin prenant en compte un plus grand nombre de zones au niveau de la course du soleil (<https://recherche.cstb.fr/fr/offres/expertises/eclairage/>)

- (2) La distance séparant le site d'étude et la station de collecte des données de visibilité peut poser problème quant à la validité des luminances de voile d'atmosphère calculées. Cette approximation devrait être supprimée pour le modèle dynamique final, puisque des données SYNOP sont disponibles à proximité immédiate du tunnel faisant office de cas d'étude pour son application.
- (3) Les données simulées ont du mal à représenter fidèlement les variations de luminance de voile par temps nuageux. Comme mentionné précédemment, compte tenu de sa résolution spatiale, le satellite ne peut pas fournir des informations sur les variations locales à l'intérieur de la zone de 5 km par 7 km. De plus, l'appareil voit les masses nuageuses du dessus, il estime ensuite leur transmission à partir du facteur de réflexion de leur sommet, mais il n'a aucune information sur la structure et la composition de la masse nuageuse. Cet aspect peut difficilement être amélioré et se heurte aux limites technologiques des satellites utilisés pour collecter les données.
- (4) Les différences entre les hypothèses de simulation et les données de terrain réelles (géométrie, orientation de la scène ou de la caméra, facteurs de réflexion des matériaux, ...) peuvent également apporter des erreurs dans les résultats finaux de simulation.

Ces éléments permettent d'expliquer en partie les écarts constatés entre les données réelles et les données simulées. Le modèle ainsi conçu permet tout de même de modéliser une année de luminance de voile avec des profils journaliers visuellement proches de ceux observés en conditions réelles.

3.5 Conclusion du chapitre

Le logiciel OCEAN a été retenu pour être au cœur de notre environnement de simulation. L'objectif de ce dernier est de pouvoir modéliser l'éclairage naturel disponible en amont d'un tunnel à l'année, ainsi que son éclairage artificiel. En d'autres termes, il s'agit de produire une simulation de l'éclairage pour ce tunnel sur un an, en tenant compte notamment des

conditions climatiques et de trafic pour l'ouvrage considéré. La première étape de validation pour l'éclairage artificiel s'est déroulée en deux temps. Premièrement, les valeurs d'éclairement sur la chaussée du modèle 3D de la maquette, obtenues par simulation pour les spectres 2000K LM, 3000K LM et 5000K LM présentés en **chapitre 2 Contenu spectral et visibilité**, ont été confrontées à des mesures réelles effectuées sur la maquette. L'analyse des profils longitudinaux en éclairage pour les mesures réelles et pour les résultats simulés a mis en évidence des écarts entre les deux jeux de données. Il est apparu que l'origine de l'erreur des résultats de simulation était imputable aux valeurs de flux des luminaires passées en paramètre. A l'issue de cette analyse, le flux de sortie affecté aux luminaires dans la simulation a été ajusté afin de réduire au maximum les écarts entre les résultats de simulation et les mesures réelles. Une fois ce flux ajusté, les résultats en luminance (chaussée et piédroit) ont été testés en réalisant 3 simulations différentes pour chacun des spectres cités ci-dessus. Ces simulations correspondent à 3 modélisations différentes des propriétés de réflexion des matériaux de la maquette : une première basée sur une BRDF lambertienne, une seconde basée sur la BRDF en intensité mesurée au goniospectrophotomètre, et une dernière sur la BRDF spectrale mesurée avec le même appareil. Les résultats de simulation obtenus pour les luminances de chaussée et de piédroit ont montré des écarts relativement importants avec les données mesurées (rMBE moyenne pour les mesures sur la chaussée pour la BRDF lambertienne : 47.7%, rRMSE moyenne : 48.7% ; rMBE moyenne pour les mesures sur la chaussée pour la BRDF en intensité corrigée : 40.7%, rRMSE moyenne : 42.7% ; rMBE moyenne pour les mesures sur la chaussée pour la BRDF spectrale corrigée : 32.7%, rRMSE moyenne : 37.7%). Comme les valeurs d'éclairement obtenues par simulation ont été ajustées au mieux sur les valeurs mesurées, ces erreurs sont vraisemblablement imputables soit aux mesures LMK, soit à la modélisation des propriétés de réflexion des matériaux de la maquette. Au vu des aberrations chromatiques observées sur les résultats issus des simulations en BRDF mesurées (voir Figure 3-31), cette dernière hypothèse semble la plus plausible. Il convient néanmoins de noter que les simulations en BRDF spectrales corrigées, qui donnent les résultats les plus proches des données réelles, surestiment les valeurs de luminance finales obtenues, ce qui pourrait s'avérer dangereux dans le cadre d'un dimensionnement de tunnel.

Dans un deuxième temps, le développement du modèle pour le calcul de la luminance de voile a permis de modéliser toutes les 15 minutes les variations de cette dernière. Le modèle permet de tenir compte des variations d'éclairage naturel au niveau du site considéré en s'appuyant sur des données satellites, sur la géométrie du site, sa photométrie, ainsi que sur des données de visibilité météorologiques permettant de calculer la luminance de voile d'atmosphère. Tous ces éléments sont passés en paramètre de l'algorithme afin de calculer la luminance L_{20} au niveau du portail d'entrée du tunnel considéré, tous les quarts d'heure sur n'importe quelle période de temps souhaitée (sous réserve de la disponibilité des données climatiques). Les données ainsi simulées ont été comparées à des mesures L_{20} réalisées sur le site d'étude à l'aide d'un appareil dédié. Le calage du modèle a mis en lumière des écarts entre résultats de simulations et mesures réelles. Des éléments d'explication ont été recherchés pour comprendre ces écarts observés, puis des pistes d'améliorations ont été proposées afin

de les réduire, notamment l'utilisation d'un maillage de ciel plus fin, ou encore la fiabilisation des données terrain (géométrie, propriétés de réflexion, direction de visée du capteur utilisé pour les mesures de luminance de voile, ...). Cette approche innovante consistant à caractériser les luminances de voile à partir de données satellitaires permet d'assurer une disponibilité immédiate des données. Ces dernières sont plus précises qu'un simple calendrier d'ensoleillement préétabli, puisqu'elles tiennent compte des variations climatiques et des mouvements des masses nuageuses. Enfin, le travail par simulation permet également d'anticiper les économies d'énergie possibles afin de statuer sur la pertinence de la mise en œuvre de scénarios d'éclairage optimisés dans un tunnel. Les modalités de développement de ces scénarios d'éclairage optimisés, étape finale du modèle dynamique, seront présentées dans la partie suivante.

Il est à noter que la luminance de voile a été calculée sous la forme du L_{20} pour le cas de figure de la tranchée du Noiret, afin de pouvoir comparer les valeurs obtenues avec celles de CAMEL. Pour rappel, d'autres méthodes de dimensionnement utilisent le voile de Fry L_{FRY} ou la luminance de voile équivalente L_{seq} pour l'évaluation de la luminance de voile. L'environnement développé permet également de calculer ces variables à partir des images simulées du portail d'entrée du tunnel. Le calcul de L_{seq} sera notamment réalisé au chapitre 4 sur le cas d'étude considéré pour l'application du modèle dynamique.

Chapitre 4 : Scénarios d'éclairage intelligent

4.1 Objectifs et démarche

4.1.1 Objectif

L'objectif du modèle dynamique est de produire une simulation de l'éclairage dans un tunnel sur un an. Cette simulation doit permettre de prendre en compte les variations climatiques (variations de conditions lumineuses aux abords du tunnel, visibilité, état du sol), ainsi que les variations de trafic (vitesse, débit de véhicules).

4.1.2 Démarche

Un des buts recherchés sera notamment d'évaluer la consommation énergétique annuelle de plusieurs scénarios d'éclairage appliqués à un modèle de tunnel. Un des scénarios sera dit de référence et reprendra les règles de dimensionnement et de pilotage actuellement utilisées pour la majorité des ouvrages français équipés en LEDs. Les autres scénarios viendront proposer des variations par rapport à ces règles et permettront d'évaluer les écarts en termes de consommations énergétiques qui en découleraient.

4.1.3 Tranchée couverte d'Antony

Le tunnel retenu pour le développement de ce modèle dynamique est la tranchée couverte d'Antony en Île-de-France. Cet ouvrage permet le passage de l'A86 sous les D920, D77 et D986 (voir Figure 4-1). L'ouvrage originel devait compter deux tubes, mais des contraintes de travaux ont empêché de finaliser le tube sud qui n'a jamais été mis en circulation. L'exploitant de cette tranchée couverte, la DiRIF, souhaite réaliser des travaux de rénovation de l'éclairage dans de nombreux ouvrages à proximité (Courneuve, Taverny, Fontenay, Fresnes-Antony, B5 Echangeur A14-A86). C'est donc dans ce contexte qu'elle a demandé au CETU d'étudier des solutions pour mettre en place des installations d'éclairage plus efficaces énergétiquement parlant, en creusant notamment la piste de l'asservissement des installations à la vitesse de trafic. Dans ce contexte, le CETU a proposé d'équiper la partie du tube sud encore inexploitée de systèmes d'éclairage expérimentaux afin de tester différentes solutions techniques pouvant être ensuite appliquées au tube nord et aux autres tunnels cités précédemment. Ce projet porte le nom de DELTA pour « Démonstrateur Eclairage LED du Tunnel d'Antony ». Un des objectifs recherchés dans ce projet est notamment l'asservissement du flux lumineux des sources à la vitesse réelle du trafic. Le choix de site pour la modélisation s'est donc naturellement tourné vers ce tunnel expérimental en développement, puisqu'à terme les résultats obtenus par simulation pourront être testés directement sur le terrain, afin d'attester de leur validité.

Le tube étudié est le tube sud, qui n'est actuellement pas circulé. Cependant, l'implantation des luminaires choisie pour la simulation annuelle s'appuie sur une étude photométrique réalisée par Comatelec Schröder (une des entreprises partenaires du projet DELTA), traitant ce tube comme un tunnel circulé en unidirectionnel à 4 voies.



Figure 4-1 Photographie aérienne de la tranchée couverte d'Antony (Géoportail)

4.2 Pistes de réflexion sur l'éclairage intelligent

4.2.1 Asservissement aux conditions de luminosité extérieure

Comme on a pu le voir précédemment, les luminances de voile perçues par un conducteur à l'approche d'un tunnel vont fortement impacter sa capacité à détecter d'éventuels obstacles situés sur la chaussée à l'intérieur de l'ouvrage. Les 3 méthodes présentées au **chapitre 1 : Méthode de dimensionnement** prennent en compte une luminance de voile liée à la luminosité de l'environnement entourant le portail d'entrée du tunnel, bien que le calcul associé à cette luminance de voile ne soit pas exactement le même pour les différentes méthodes. La valeur obtenue pour cette luminance de voile, qui est évidemment directement reliée aux conditions de ciel observées sur le site du tunnel, va impacter les valeurs de luminance à mettre en œuvre en zones d'entrée et de transition afin d'assurer l'adaptation spatiale et temporelle des conducteurs. Pour des questions de sécurité, les conditions climatiques prises en compte pour la conception de l'installation d'éclairage sont donc les plus défavorables, c'est-à-dire celles qui vont mener aux luminances de voile les plus élevées (la luminance de voile maximale atteinte pendant au moins 75 heures sur une année pour la CIE par exemple (CIE 88 2004)). Il convient ensuite de piloter cet éclairage en fonction des conditions de luminosité extérieure afin d'éviter que l'installation ne surconsomme la plupart du temps en fournissant des niveaux de luminance bien plus élevés que nécessaire. Actuellement, les recommandations dispensées par le CETU intègrent déjà l'asservissement

des installations de renfort LEDs aux conditions de luminosité extérieure. En pratique, le dimensionnement de l'installation est fait pour un niveau de voile donné (fort, moyen ou faible, voir section **1.3.2.1 Zone d'entrée** sur les règles de dimensionnement). Une valeur de luminance de voile L_{20} est associée à ce niveau de voile, on la notera $L_{20_{dim}}$ ci-après. Ensuite, la courbe de décroissance de luminance à l'intérieur de l'ouvrage établie par le dimensionnement est déclinée tous les 10% (une nouvelle courbe donnant 90% des valeurs de la courbe initiale en tous points, puis 80%, ...). Le choix du niveau de gradation utilisé dans le tunnel est déterminé par un luminancemètre positionné à la distance d'arrêt calculée pour la vitesse réglementaire, en amont du portail d'entrée : ce dernier mesure le L_{20} au niveau du portail d'entrée puis la valeur obtenue permet de piloter le flux fourni par l'installation de renfort (pour exemple, si le L_{20} vaut 85% de la valeur de $L_{20_{dim}}$, le niveau de gradation à 90% de l'installation de renfort est utilisé). Il est évident que plus le nombre de scénarios prédéfinis sera important, plus les économies d'énergie seront conséquentes puisque les niveaux de luminance à l'intérieur du tunnel seront au plus proche du besoin réel.

4.2.2 Asservissement au trafic

Les méthodes de dimensionnement étudiées dans le **chapitre 1 : Méthode de dimensionnement** mettent en évidence un impact direct de la vitesse sur les niveaux de luminance à mettre en œuvre en zone de renfort. Plus la vitesse d'approche des conducteurs sera faible et moins les besoins en luminance en zone de renfort seront élevés. Actuellement, le dimensionnement de l'éclairage des tunnels routiers est réalisé en prenant en compte la vitesse limite sur la portion de route considérée. Ainsi, si le tunnel étudié est sujet aux congestions, les niveaux de luminance étant dimensionnés pour la vitesse réglementaire, ils seront trop élevés et entraîneront des consommations inutiles lorsque la vitesse de trafic est réduite du fait des congestions. Le fait d'asservir l'installation d'éclairage à la vitesse du trafic permettrait donc de réaliser des économies d'énergie, le modèle numérique est utilisé pour évaluer à combien celles-ci pourraient s'élever.

4.2.3 Asservissement à l'état du sol

Les méthodes de dimensionnement prennent en compte une chaussée mouillée pour le calcul de la distance d'arrêt, puisque cela constitue le cas le plus défavorable pour les conducteurs. Cela signifie qu'en cas de beau temps et de chaussée sèche, les niveaux délivrés par l'installation d'éclairage seront surdimensionnés. En effet, la distance d'arrêt sera moindre sur route sèche, ce qui signifie que les luminances de voile seront également moins élevées puisque leur évaluation se fera pour une position de référence plus proche du portail d'entrée du tunnel. En outre, pour les méthodes L_{20} et L_{seq} qui se basent sur un profil de décroissance de luminance prédéfini, la longueur de la zone d'entrée est égale à la distance d'arrêt, ce qui signifie qu'un dimensionnement pour chaussée sèche réduira la longueur de cette zone qui

est très énergivore. Ainsi, l'asservissement de l'installation d'éclairage aux conditions d'état du sol pourrait également permettre de réaliser des économies d'énergie, ces dernières seront évaluées à l'aide du modèle numérique.

4.2.4 Application du modèle dynamique

4.2.4.1 Contraintes liées à l'algorithme et choix de la méthode

L'objectif du modèle dynamique et de l'algorithme de calcul associé est de pouvoir comparer un scénario de référence typique du dimensionnement actuellement utilisé en tunnel routier, avec des scénarios introduisant des paramètres supplémentaires, afin d'évaluer les écarts constatés notamment en termes de consommations énergétiques. Comme mentionné précédemment, les principales pistes d'optimisation sont une prise en compte plus poussée des conditions de luminosité extérieure, un asservissement de l'éclairage à la vitesse de trafic, ainsi qu'aux conditions de sol (chaussée sèche ou mouillée). Ces deux éléments imposent d'avoir accès conjointement à des données climatiques du site d'étude et des données de trafic de la portion de route contenant le tunnel étudié.

Dans un second temps, les propriétés de réflexion des matériaux du tunnel doivent pouvoir être modélisées, avec une importance toute particulière pour les propriétés de réflexion de la chaussée qui impactent énormément les valeurs des luminances finales mesurées.

Enfin, les propriétés photométriques des luminaires doivent également être modélisées, et leur efficacité lumineuse doit être connue afin de pouvoir réaliser des calculs de consommations énergétiques.

En première approche, l'algorithme développé devait s'appuyer sur la méthode CETU telle que présentée dans le document « Méthode de dimensionnement de l'éclairage des tunnels routiers » (CETU 1998). Il est cependant apparu assez rapidement que l'absence de profil de décroissance des luminances prédéterminé, et l'utilisation d'un processus itératif dans le calcul des luminances de besoin, allait complexifier grandement l'algorithme. Il a donc été choisi de baser le modèle sur la méthode L_{seq} présentée dans le guide de la CIE de 2004 (CIE 88 2004), celle-ci prenant en compte un plus grand nombre de paramètres que la méthode L_{20} , tout en étant plus simple que la méthode CETU. La méthode L_{seq} se base sur la prise en compte de trois luminances de voile distinctes : L_{seq} , L_{atm} et L_{pb} (voir section **1.2.1.2 Origines de la méthode de la luminance de voile L_{seq} (CIE 88 2004)**). Le guide de la CIE propose des valeurs fixes pour l'évaluation des luminances de voile d'atmosphère et de pare-brise, tandis que le CETU propose des fonctions linéaires (3 coefficients possibles : voiles fort, moyen ou faible, voir section **1.3.2.1 Zone d'entrée**) en fonction de la distance par rapport à l'entrée du tunnel. Ces deux méthodes d'évaluation des luminances de voile sont plutôt bien adaptées pour un dimensionnement unique, mais elles sont plus contraignantes dans une optique d'asservissement puisqu'elles sont discrétisées. La solution idéale serait d'utiliser des équations donnant la luminance de voile d'atmosphère et de pare-brise en fonction des

conditions de luminosité à l'approche du tunnel. Le choix pour l'évaluation des luminances de voile d'atmosphère et de pare-brise dans le modèle dynamique s'est donc porté sur la méthode de Padmos (Padmos 1984), qui est présentée dans la section **1.2.1.2 Origines de la méthode de la luminance de voile L_{seq} (CIE 88 2004)** et qui sera plus amplement détaillée dans la section **4.2.4.3 Algorithme de calcul**. Les expressions développées par Padmos présentent l'avantage d'être des fonctions continues donnant des résultats plus précis dans le cadre d'un asservissement.

4.2.4.2 Modélisation de la tranchée couverte d'Antony

Comme mentionné précédemment, le développement du modèle dynamique s'est effectué sur le tunnel d'Antony, et ce pour plusieurs raisons :

- Des boucles de comptage sont disponibles sur la portion contenant le tube circulé et permettent donc de récupérer des valeurs de vitesse de trafic tous les quarts d'heure.
- Le tube circulé est sujet aux congestions, ce qui en fait un candidat idéal pour évaluer les économies d'énergie qui peuvent être réalisées en asservissant l'installation d'éclairage à la vitesse réelle du trafic.
- Les scénarios pourront potentiellement être mis en place dans le tube expérimental afin de réaliser des tests plus exhaustifs sans impacter la sécurité des usagers.

Géométrie

A l'aide de mesures sur site, de plans, de données satellites et d'approximations réalisées à partir de Google Street View, le tracé des deux tubes de la tranchée d'Antony a pu être représenté, ainsi que la modélisation des principaux masques alentours (immeubles, arbres, ...). Le modèle 3D du site du tunnel d'Antony a été réalisé sous Sketchup et est présenté en Figure 4-2. L'application du modèle dynamique se fait sur le tube sud du tunnel, c'est-à-dire le tube expérimental non circulé. L'implantation des luminaires est issue d'une étude photométrique réalisée par l'entreprise Comatelec Schröder dans le cadre du projet DELTA. Elle correspond à une implantation théorique adaptée pour répondre aux besoins de luminance du tube sud, si ce dernier était circulé en unidirectionnel avec 4 voies de circulation dans le sens est vers ouest (hypothèse de dimensionnement utilisée dans le projet DELTA). Les conditions de trafic théoriques sont extrapolées à partir des données collectées sur le tube nord.

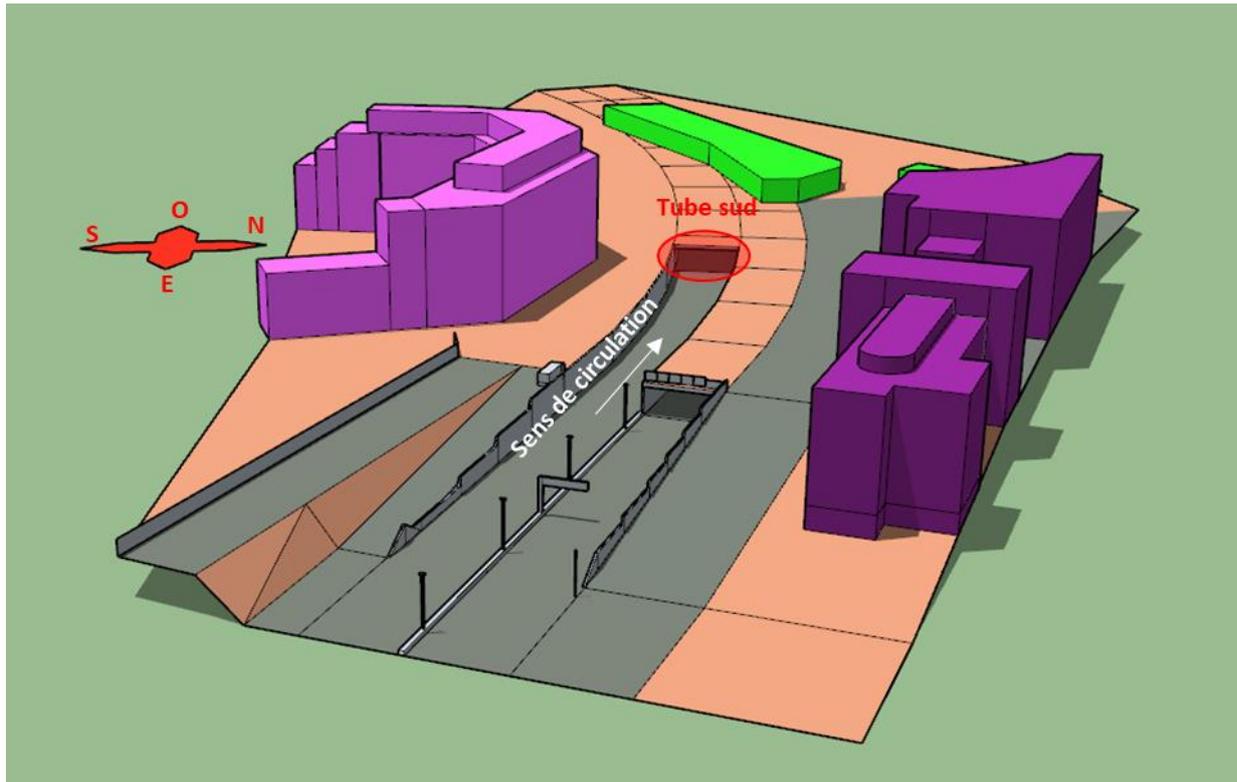


Figure 4-2 Modèle Sketchup du site de la tranchée couverte d'Antony. Le tube étudié par la suite est le tube sud, circulé dans le sens est vers ouest

Propriétés de réflexion des matériaux

Ce modèle 3D a été ensuite importé sous OCEAN pour réaliser des simulations physico-réalistes de l'environnement du tunnel. En ce qui concerne les propriétés de réflexion des matériaux, les simulations sous OCEAN ont été réalisées en diffus et en achromatique (luminance constante dans toutes les directions après réflexion de la lumière d'une source sur les surfaces du modèle, et facteur de réflexion considéré comme constant sur tout le spectre). Les facteurs de réflexion des différentes surfaces sont présentés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 Facteurs de réflexion des surfaces du modèle 3D

Surfaces	Facteur de réflexion
Arbres	0.1
Chaussée (hors tube étudié)	0.24
Chaussée tunnel (simulations contre-flux)	0.24
Chaussée tunnel (simulations symétriques)	0.18
Bâtiment nord	0.43
Bâtiment sud	0.3
Murs à l'extérieur de la tranchée	0.3
Piédroit	0.4
Plafond	0.1
Portail d'entrée	0.3
Sol	0.12

Des valeurs typiquement utilisées en modélisation de projets d'éclairage urbains ont été utilisées. Les valeurs prises pour la chaussée du tunnel correspondent aux coefficients de clarté indiqués dans le dossier pilote du CETU (CETU 2000) pour un revêtement R2, pour des installations à contre-flux (entre 0.22 et 0.26) ou des installations symétriques (0.18). Les valeurs de réflexion des bâtiments correspondent à des moyennes pondérées de leur surface vitrée (0.1) et non vitrée (blanc à 0.6 et beige à 0.5). L'évaluation des surfaces vitrées des bâtiments s'est faite en utilisant les images disponibles sous Google Street View.

Propriétés photométriques des luminaires

Le calage du modèle sur la maquette de tunnel, présenté en section **3.3 Modélisation de la section courante**, avait mis en évidence un impact important de la photométrie des luminaires sur la justesse des résultats de simulation. Les fichiers IES des luminaires utilisés dans l'étude photométrique ont donc été récupérés et appliqués dans les simulations OCEAN. Les caractéristiques des luminaires sont présentées dans le Tableau 4-2. Ces derniers sont de la marque Comatelec Schröder, et les fichiers IES correspondant ont donc été récupérés sur le site éponyme.

Tableau 4-2 Caractéristiques des luminaires utilisés pour les simulations

Rôle dans le tunnel	Type de luminaire	Puissance	Contre-flux / symétrique	Température de couleur
Renfo type 1	TFLEX Module 2	356 W	Contre-Flux	5700 K
Renfo type 2	TFLEX Module 1	178 W	Contre-Flux	5700 K
Renfo type 3	TFLEX Module 1	85 W	Contre-Flux	5700 K
Base	TFLEX Combi 1	178 W	Symétrique	5700 K / 3000 K

Il est à noter que les luminaires utilisés dans le cadre du projet DELTA sont des luminaires expérimentaux, la combinaison modèle / température de couleur a été développée spécifiquement pour le projet (pour exemple, les TFLEX en 5700 K ne sont pas commercialisés).

Les luminaires de l'installation de base sont équipés de deux platines LEDs de température de couleur différentes (3000 K et 5700 K). Les résultats de l'expérience psycho-visuelle présentés en **chapitre 2 : Contenu spectral et visibilité** ont montré que la dégradation de la visibilité pour les faibles niveaux lumineux augmente avec la température de couleur, il a donc été décidé dans le cadre du projet DELTA de tester les deux températures de couleur extrêmes mises en place en tunnel pour des sources LEDs. L'objectif est de pouvoir ensuite créer des températures de couleur intermédiaires en mixant ces deux extrêmes. Pour l'installation de renfort, il a été décidé de conserver la température de couleur la plus susceptible d'être mise

en œuvre en tunnel et présentant la meilleure efficacité lumineuse, parmi les deux températures de couleur de l'installation de base.

L'installation de renfort est composée de trois types de luminaires différents (Renfort type 1, 2 et 3). Ces luminaires sont classés des plus puissants (type 1) aux moins puissants (type 3). Au fur-et-à-mesure que le besoin en luminance dans le tunnel diminue, les renforts type 1 sont de plus en plus espacés (ce procédé est appelé « installation à pas variable »), puis ils sont remplacés par des renforts type 2 lorsque l'espacement devient trop important pour assurer des valeurs d'uniformités de luminance de chaussée acceptables. Le même principe est répété pour les renforts type 2 qui sont, à terme, remplacés par les renforts type 3.

Données d'éclairage naturel

Les données d'éclairage naturel utilisées pour le site d'Antony sont présentées dans un fichier du même type que celui utilisé pour la validation de la modélisation de l'éclairage naturel sur le tunnel du Noiret. Pour rappel, elles se basent sur les estimations satellitaires Helioclim 3 associées aux modèles de Pérez (Pérez et al. 1990), qui permettent de définir la luminance de chacune des 145 zones de ciel considérée dans le fichier final (voir Figure 3-37), ainsi que l'éclairement lumineux horizontal au niveau du sol. Les données d'éclairage naturel sont à nouveau indiquées tous les quarts d'heure et elles couvrent toutes l'année 2019 (voir section 3.4.2.2 Fichier d'éclairage naturel des luminances du ciel et du soleil).

Données de trafic

Le modèle dynamique utilise également un fichier de données de trafic collectées par la DiRIF et mis à disposition du CETU dans le cadre du projet DELTA. Ces données de trafic sont disponibles en plusieurs points de mesure au niveau de stations de comptage exploitées par la DiRIF. La Figure 4-3 présente la position des différentes stations situées à proximité du tunnel d'Antony.

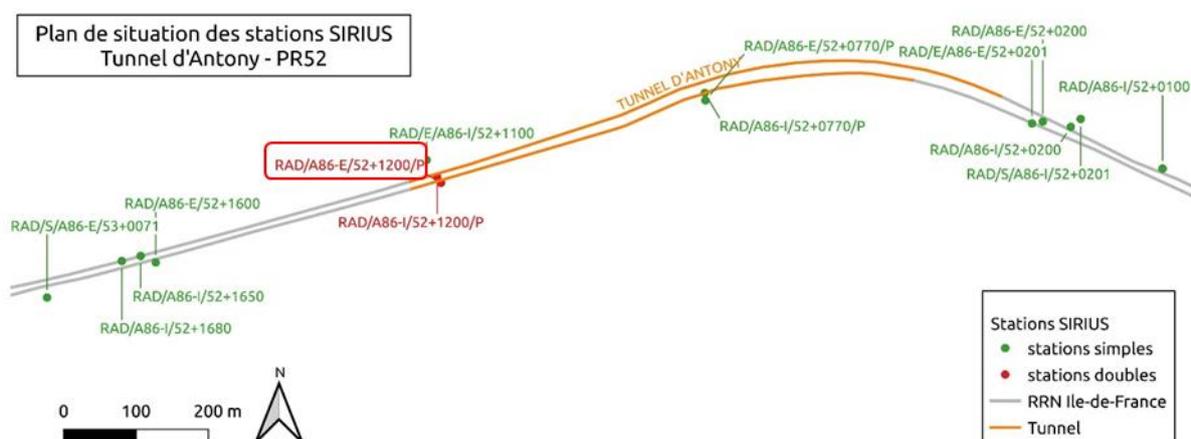


Figure 4-3 Plan de situation des stations de comptage SIRIUS pour le tunnel d'Antony

Les données utilisées dans l'algorithme de calcul sont celles de la station intitulée A86-E/52+1200P (entourée en rouge sur la Figure 4-3). Cette station a été choisie car elle est prioritaire en maintenance et donc plus fiable. Après analyse des données obtenues pour les différentes stations de comptage situées à l'entrée, à la sortie ou à l'intérieur du tunnel d'Antony, il apparaît effectivement que les valeurs de vitesse obtenues pour cette station sont les plus plausibles au vu des limitations imposées dans l'ouvrage. Il est à noter que les données sont lacunaires. L'objectif a donc été de reconstruire à partir de plusieurs années, une année typique de données de trafic pour la station de comptage prise en compte, avec un intervalle de temps de 15 minutes entre chaque mesure. Pour ce faire, les données de 2019 ont été complétées par des données de 2020 pour les périodes manquantes dans le fichier. Fort heureusement, les périodes manquantes de 2019 ne coïncident pas avec les périodes de confinement de 2020, ce qui ne nous aurait pas permis de représenter des conditions de trafic « typique » pour la tranchée d'Antony. Pour les périodes non disponibles à la fois en 2019 et en 2020, les règles suivantes ont été utilisées :

- On utilise les données des instants juste avant ou juste après afin d'éviter les interpolations.
- Si seule la vitesse manque, on utilise celle des instants avant ou après qui correspond à un débit proche.
- S'il manque plus de 4 ou 5 périodes de mesure, on va chercher dans le jour d'avant ou d'après les données de cette période, en faisant attention à la différence entre jours de semaine, samedis, dimanches et jours fériés.

Un fichier de données de trafic a ainsi pu être reconstitué pour une année représentative (en pratique cette année reconstituée sera considérée comme l'année 2019 dans la suite), avec des valeurs disponibles tous les quarts d'heure. A titre d'exemple, la Figure 4-4 représente les conditions de trafic typiques pour une semaine complète (semaine du 4 au 10 mars 2019).

La Figure 4-4 met bien en exergue les problématiques de congestion en semaine, pour les horaires correspondant au début ou à la fin des journées de travail (ralentissement de la vitesse de trafic entre 7h et 10h, puis entre 16h et 19h). L'asservissement aux conditions de trafic semble donc bien faire sens pour ce tunnel. On note que le trafic est bien moins perturbé le week-end, comme on pouvait s'y attendre.

La création du fichier de données de trafic est plus amplement détaillée en **annexe L : Note sur les fichiers de données de trafic de la DiRIF**.

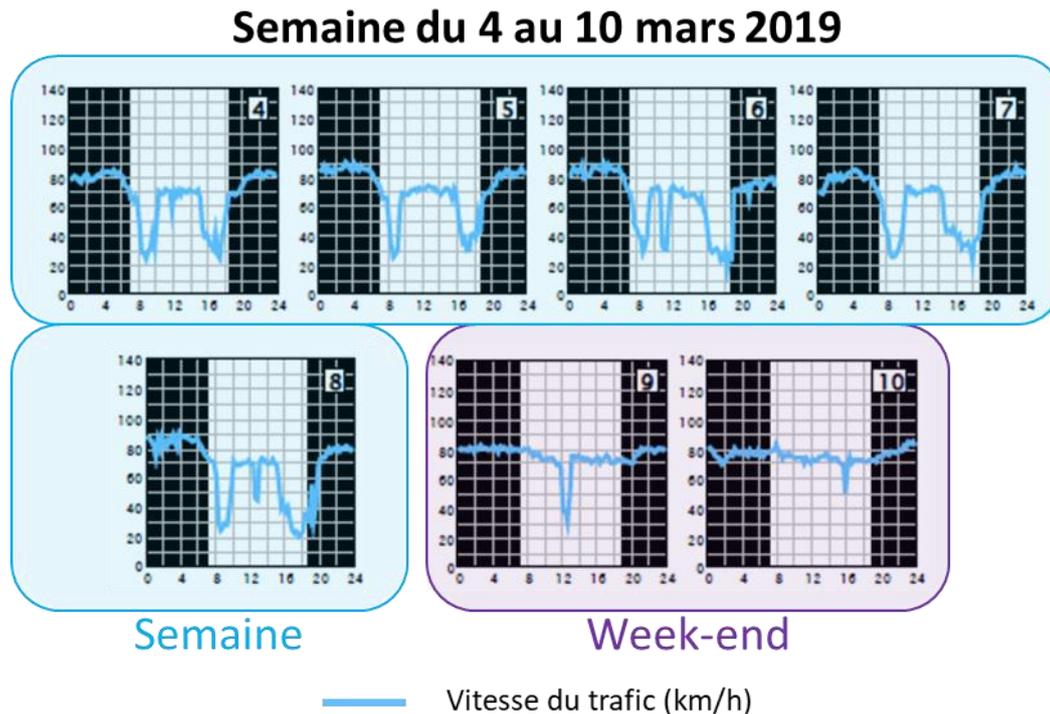


Figure 4-4 Conditions de trafic typiques pour une semaine complète au niveau de la tranchée couverte d'Antony (semaine du 4 au 10 mars 2019)

Données de visibilité et d'état du sol

Comme on l'a vu dans le **chapitre 3 : Environnement de modélisation**, des données de visibilité météorologiques collectées via le réseau SYNOP sont nécessaires afin de pouvoir calculer la luminance de voile d'atmosphère de Padmos et de l'ajouter artificiellement aux résultats de simulation. Pour ce chapitre, on s'intéressera également aux données d'état du sol qui sont disponibles dans les mêmes fichiers que la visibilité météorologique. La station SYNOP la plus proche du site de la tranchée couverte d'Antony est la station d'Orly (moins de 6 km entre les deux sites). Les fichiers de données prennent en compte de très nombreux paramètres. Pour les besoins de cette étude, seuls l'état du sol, la visibilité, l'humidité et la température seront utilisés (les deux derniers paramètres ne servent pas directement dans le modèle climatique mais permettent de vérifier la cohérence du paramètre état du sol). Les fichiers SYNOP donnent les valeurs des paramètres étudiés toutes les 3 heures et couvrent toute l'année 2019 (4 enregistrements sont manquants et ont été complétés à partir d'enregistrements du jour d'avant ou du jour même à d'autres horaires). De plus, 69 données d'état du sol sont manquantes sur l'année 2019, elles ont été complétées en utilisant les conditions de ciel des données satellitaires, ainsi que les températures et les humidités relatives. Enfin, une fois ce fichier trihoraire complété, il a été décliné en fichier donnant des valeurs tous les quarts d'heure en réalisant une interpolation linéaire pour les paramètres de visibilité, de température et d'humidité, et en considérant que la variable état du sol était

constante sur tous les quarts d'heure compris entre h-1.5 et h+1.5. Les codes associés à l'état du sol sont présentés en Tableau 4-3.

Tableau 4-3 Codes pour l'état du sol tels que présentés dans les fichiers originaux

0	Surface du sol sèche
1	Surface du sol humide
2	Surface du sol mouillée (eau stagnante en mares, petites ou grandes à la surface)
3	Inondé
4	Surface du sol gelée
5	Verglas au sol
6	Poussière ou sable meuble sec ne couvrant pas complètement le sol
7	Couche fine de poussière ou de sable meuble couvrant complètement le sol
8	Couche épaisse ou d'épaisseur moyenne de poussière ou de sable meuble couvrant complètement le sol
9	Très sec avec fissure
10	Sol en grande partie couvert de glace
11	Neige compacte ou mouillée (avec ou sans glace) couvrant moins de la moitié du sol
12	Neige compacte ou mouillée (avec ou sans glace) couvrant au moins la moitié du sol mais ne le couvrant pas complètement
13	Couche uniforme de neige compacte ou mouillée couvrant complètement le sol
14	Couche non uniforme de neige compacte ou mouillée couvrant complètement le sol
15	Neige sèche poudreuse couvrant moins de la moitié du sol
16	Neige sèche poudreuse couvrant au moins la moitié du sol (mais ne le couvrant pas complètement)
17	Couche uniforme de neige sèche poudreuse couvrant complètement le sol
18	Couche non uniforme de neige sèche poudreuse couvrant complètement le sol
19	Neige couvrant complètement le sol – congères élevées

Un fichier donnant notamment l'état du sol et la visibilité météorologique tous les quarts d'heure au niveau du site d'Antony a donc été ainsi créé. Dans notre cas, l'intérêt des données d'état du sol est de savoir si la chaussée est sèche ou mouillée, ce qui conditionnera la formule de calcul utilisée pour la distance d'arrêt. Les catégories 6, 7, 8 ou 9 ne sont pas observables au site d'Orly pour la période considérée. On distingue donc la catégorie 0, qui représente un sol sec, de toutes les autres catégories observables qui représentent une chaussée humide ou verglacée. En s'intéressant maintenant aux données de l'année 2019 en ce qui concerne l'état du sol et la visibilité, la Figure 4-5 présente le pourcentage de données d'état du sol classées

par catégorie et la Figure 4-6 présente la courbe de fréquence cumulée des valeurs de visibilité météorologique.

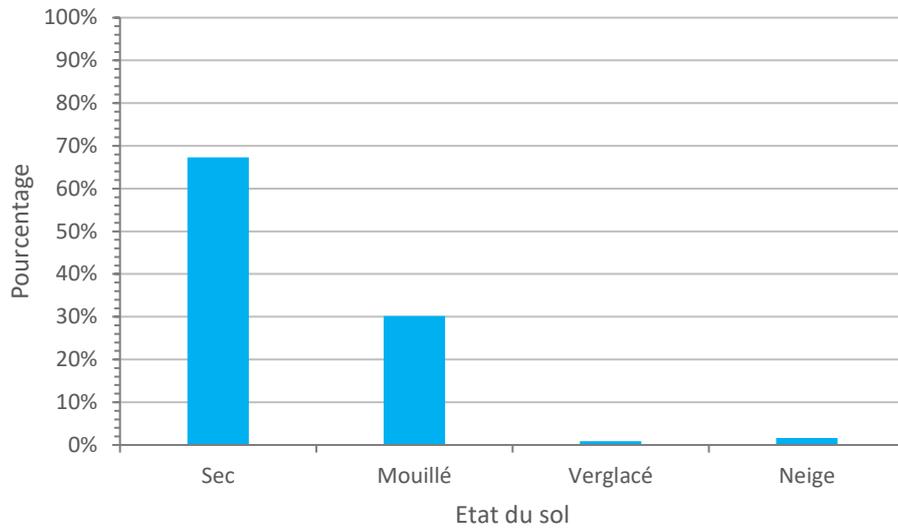


Figure 4-5 Répartition en catégories d'état du sol des données trihoraires collectées via SYNOP Orly

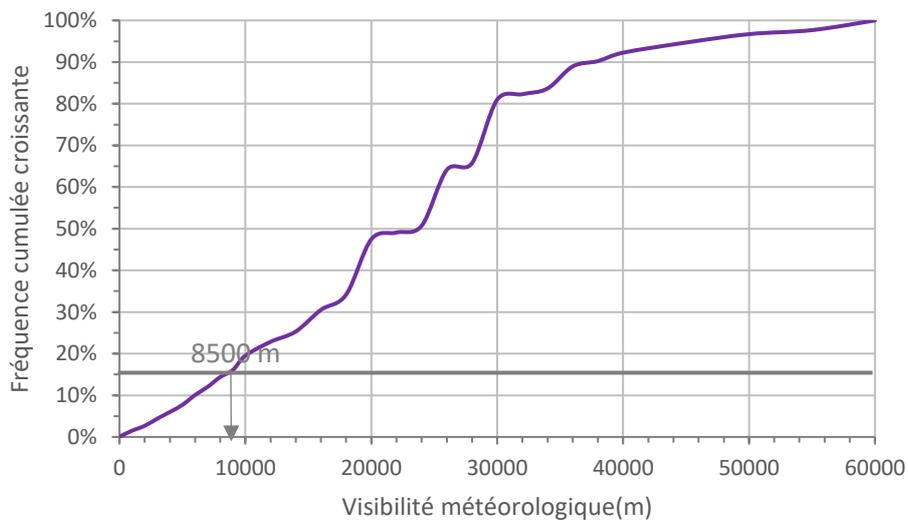


Figure 4-6 Courbe des fréquences cumulées croissantes des données de visibilité météorologiques sur l'année 2019 (données issues de SYNOP Orly)

On constate que la majorité des données d'état du sol indiquent une chaussée sèche sur l'année 2019 (plus de 65% des données). L'asservissement à ces dernières semblent donc faire sens puisqu'en prenant en compte uniquement une chaussée mouillée dans le calcul de la distance d'arrêt, on la surestimerait plus de 65% du temps.

4.2.4.3 Algorithme de calcul

Cette section détaille le fonctionnement de l'algorithme de calcul utilisé pour la modélisation dynamique de l'éclairage de la tranchée d'Antony. L'objectif de ce modèle est de reproduire les conditions de dimensionnement et d'exploitation d'un tunnel routier.

L'algorithme s'est décomposé en 3 étapes principales distinctes :

- L'établissement du besoin en termes de luminance, c'est-à-dire le profil de décroissance des niveaux de luminance de chaussée à l'intérieur du tunnel ;
- La mise en application des niveaux lumineux nécessaires dans le tunnel ;
- La vérification de la qualité du scénario d'éclairage proposé.

Besoin en luminance

La première partie de l'algorithme vise à déterminer le besoin en termes de luminance de chaussée à mettre en œuvre dans le tunnel, et plus particulièrement en zone de renfort (zone d'entrée et zone de transition). Comme mentionné précédemment, l'établissement du besoin en luminance se base sur la méthode L_{seq} présentée par la CIE, la méthode CETU induisant une trop grande complexité dans l'algorithme. La détermination de la luminance L_{seq} nécessite d'avoir une image du tunnel afin d'évaluer l'impact des différents éléments de décor dans le champ de vision du conducteur à l'approche de l'ouvrage. Une telle image est créée en appliquant la même méthode que celle décrite dans la section **3.4.2.4 Calcul de L_{20}** . Le modèle 3D de la tranchée couverte d'Antony est importé sous OCEAN et 145 simulations sont réalisées (une pour chaque zone de ciel détaillée en Figure 3-37). La Figure 4-7 montre la vision de la caméra modélisée sous OCEAN avec les zones de ciel 139, 109 et 80 allumées.

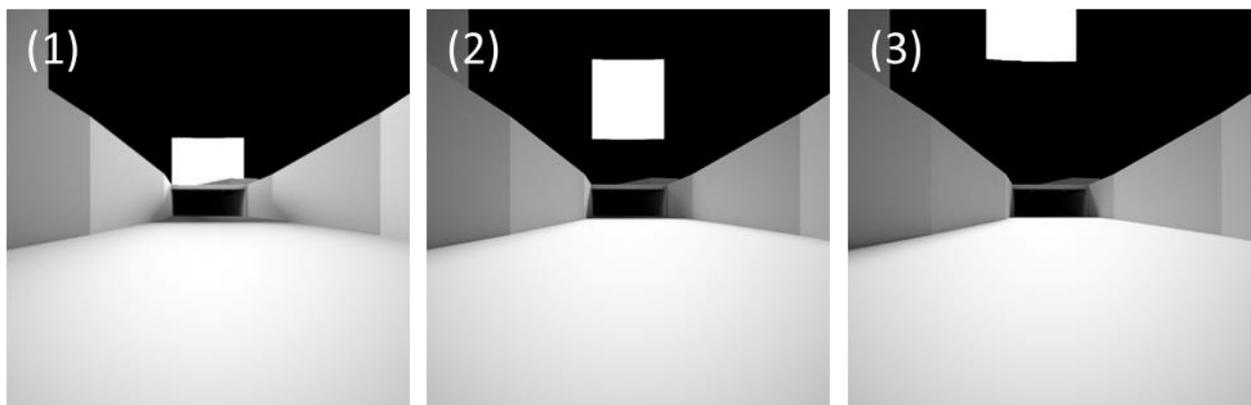


Figure 4-7 Point de vue de la caméra utilisée pour l'évaluation des luminances de voile sur le tube sud de la tranchée couverte d'Antony. (1) Zone de ciel 139 allumée ; (2) Zone de ciel 109 allumée ; (3) Zone de ciel 80 allumée.

Ces 145 simulations constituent des données d'entrée dans l'algorithme utilisé pour déterminer le besoin en termes de luminance de chaussée dans le tunnel. La position de la caméra modélisée sous OCEAN pour créer les 145 simulations de référence correspond à une

hauteur de 1.5 m et une distance par rapport au portail d'entrée égale à la distance d'arrêt. Pour rappel, cette dernière est calculée selon l'équation [4-1].

$$DA = v t_0 + \frac{v^2}{2gf(v)} \quad [4-1]$$

Avec DA la distance d'arrêt (m) ;

v la vitesse (m.s⁻¹) ;

t_0 le temps de réaction (s) ;

g l'accélération de la pesanteur à la surface de la terre (m.s⁻²) ;

f le coefficient de friction de la chaussée comme fonction de la vitesse.

Pour le calcul de la distance d'arrêt de référence (position de la caméra dans les simulations), la vitesse utilisée correspond à la vitesse maximale réglementaire de 70 km/h (19.4 m/s), le temps de réaction est pris égal à 1 s, le coefficient de friction est pris pour une chaussée mouillée. La distance d'arrêt de référence est donc égale à 74.3 m. Les équations [4-2] et [4-3] rappellent les coefficients de friction pour chaussée sèche et pour chaussée mouillée (voir section **2.2.2.1 Maquette**). Pour rappel, la Figure 2-1 montre le comportement de ces fonctions.

$$\begin{cases} f_s = -0.00008 v^2 + 0.0077 v + 0.4838 & \text{si } v \leq 60 \text{ km/h} \\ f_s = (0.47 - 0.66) \frac{v-60}{140-60} + 0.66 & \text{si } v > 60 \text{ km/h} \end{cases} \quad [4-2]$$

$$f_m = -6.702 \times 10^{-8} v^3 + 3.407 \times 10^{-5} v^2 - 0.005694 v + 0.6059 \quad [4-3]$$

Avec f_s le coefficient de friction pour chaussée sèche ;

v la vitesse (km.h⁻¹) ;

f_m le coefficient de friction pour chaussée mouillée.

La méthode présentée ci-après est valable pour une condition d'éclairage naturel donnée, c'est-à-dire pour un quart d'heure choisi dans le fichier d'éclairage naturel.

Pour le quart d'heure considéré, le fichier d'éclairage naturel donne les valeurs de luminance des 145 zones de ciel. Ces données, combinées aux 145 simulations de référence, permettent de créer une vue de l'entrée du tunnel correspondant aux conditions d'éclairage naturel du moment, exactement comme cela a été fait pour la tranchée couverte du Noiret au chapitre 3. Pour rappel, la méthode utilisée est présentée en équation [3-13] de la section **3.4.2.4 Calcul de L_{20}** .

Le calcul de L_{seq} se fait ensuite sur cette image recomposée en utilisant la formule de Stiles Holladay (Padmos 1984) présentée en équation [4-4].

$$L_{seq} = \sum (L_{pixel_{ij}} \tau_{pb} + L_{atm} \tau_{pb} + L_{pb}) \Omega_{ij} \frac{10 \cos \theta_{ij}}{\theta_{ij}^2} \quad [4-4]$$

Avec τ_{pb} le facteur de transmission du pare-brise (pris égal à 0.8) ;

Ω_{ij} l'angle solide sous lequel est vu le pixel i,j depuis la position d'observation (sr) ;

θ_{ij} l'angle entre le centre de l'image et le pixel i,j (degré). Cette somme est faite pour des angles θ_{ij} compris entre 1 et 20°, les pixels ne correspondant pas à ce critère ne sont pas pris en compte dans le calcul.

Il est à noter que l'équation [4-4] est valable lorsque la distance d'arrêt est égale à la distance d'observation (74.3 m). En effet, les Ω_{ij} et θ_{ij} doivent être les angles solides et les angles tels que perçus par le conducteur à la distance d'arrêt. Dans le cadre d'un asservissement à la vitesse, cette distance d'arrêt ne sera pas nécessairement égale à la distance d'arrêt de référence, qui correspond à la distance prise en compte entre la caméra et le portail d'entrée du tunnel pour les 145 simulations de référence. Ainsi, les valeurs de Ω_{ij} et θ_{ij} doivent être déclinées en Ω_{ij_p} et θ_{ij_p} qui désignent les valeurs perçues depuis la distance d'arrêt et non depuis la distance d'observation fixée pour les 145 simulations de référence. Ces valeurs sont données par les équations [4-5] et [4-6].

$$\Omega_{ij_p} = \frac{2\pi(1-\cos 20^\circ)}{n_{pixel_{20^\circ}}} \quad [4-5]$$

$$\theta_{ij_p} = \arctan\left(\frac{74.3 \tan \theta_{ij}}{DA}\right) \quad [4-6]$$

Avec Ω_{ij_p} l'angle solide sous lequel est vu le pixel i,j depuis la distance d'arrêt (sr) ;

$n_{pixel_{20^\circ}}$ le nombre de pixels de l'image pour lesquels $\theta_{ij_p} \leq 20$;

θ_{ij_p} l'angle entre le centre de l'image et le pixel i,j lorsqu'on se place à la distance d'arrêt (degré).

L'équation [4-4] devient donc, dans le cas où la distance d'arrêt diffère de la distance d'observation choisie pour les simulations de référence (c'est-à-dire dans le cas où la distance d'arrêt est différente de 74.3 m) :

$$L_{seq} = \sum (L_{pixel_{ij}} \tau_{pb} + L_{atm} \tau_{pb} + L_{pb}) \Omega_{ij_p} \frac{10 \cos \theta_{ij_p}}{\theta_{ij_p}^2} \quad [4-7]$$

L_{atm} et L_{pb} doivent être connus pour mener ce calcul à bien. Les expressions établies par Padmos (Padmos 1984) pour les calculer sont présentées en équations [4-8] et [4-9].

$$L_{atm} = \left(3.8 \frac{DA}{V_m}\right) L_0 \left(1 + \frac{3.8 \times 150}{V_m}\right) \quad [4-8]$$

$$\begin{cases} L_{pb} = \frac{(0.093 + 0.00018 \times 40) L_0 \left(1 + \frac{3.8 \times 150}{V_m}\right)}{40} DA & \text{si } DA < 40m \\ L_{pb} = (0.093 + 0.00018 DA) L_0 \left(1 + \frac{3.8 \times 150}{V_m}\right) & \text{si } DA \geq 40m \end{cases} \quad [4-9]$$

Avec V_m la visibilité météorologique (m) ;

L_0 la luminance moyenne dans un cône de 20° d'ouverture totale évaluée 150 m en amont de l'entrée du tunnel (cd.m⁻²).

On retrouve le même terme supplémentaire dans la formule de L_{pb} que dans celle de L_{atm} qui avait été présentée en équation [3-21] en section 3.4.2.4 **Calcul de L_{20}** . Ce terme correspond toujours à l'ajout de l'impact de la luminance de voile d'atmosphère sur la valeur de L_0 .

La visibilité météorologique est indiquée tous les quarts d'heure dans le fichier de Météo France, comme on l'a vu dans la section 3.4.2.3 **Fichier des visibilités météorologiques « visiground »**. La luminance L_0 est évaluée à partir de l'image finale représentant les conditions de luminance du quart d'heure pris en compte dans le fichier d'éclairage naturel. Pour ce faire, l'angle d'ouverture de 20° à 150 m doit être adapté pour la distance d'arrêt utilisée dans les simulations. De la même façon que pour l'équation [4-6], la relation [4-10] permet de répondre à cette problématique.

$$\theta_{DO} = \arctan\left(\frac{\tan(10^\circ) 150}{74.3}\right) \quad [4-10]$$

Avec θ_{DO} le demi-angle au sommet du cône à prendre en compte depuis la distance d'arrêt de référence, pour avoir un champ de vision équivalent à celui offert par le cône de demi-angle au sommet 10° à 150 m (degré).

La méthode L_{seq} s'appuie sur un profil de décroissance prédéterminé, présenté en Figure 4-8. Cette méthode est relativement simple puisqu'une fois la variable L_{th} évaluée, le besoin en luminance de chaussée en tous points de la courbe peut être calculé à partir de cette valeur.

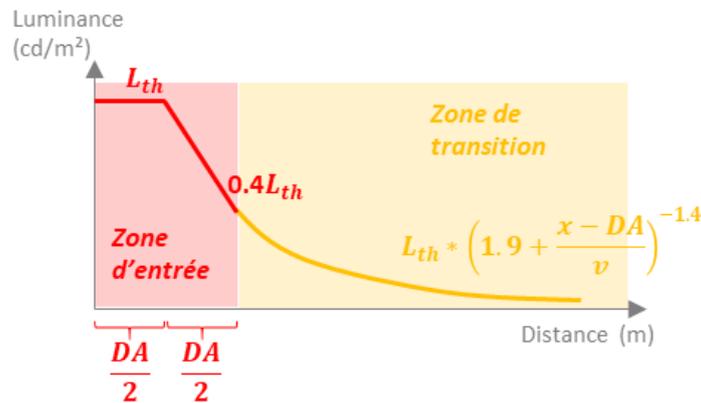


Figure 4-8 Schéma de décroissance de luminance typique adopté par la CIE pour les zones de renfort et de transition

La luminance de seuil (L_{th}) est calculée grâce à l'équation [4-11].

$$L_{th} = \frac{\tau_{pb} L_{atm} + L_{pb} + L_{seq}}{\left(\tau_{pb} \frac{\tau_{atm}}{C_m}\right) \left(\frac{\rho_t}{\pi q_c} - 1\right) - \tau_{pb} \tau_{atm}} \quad [4-11]$$

Avec τ_{atm} le facteur de transmission de l'atmosphère (pris égal à 1) ;

C_m le seuil de contraste perçu (pris égal à -0.28) (CIE 88 2004) ;

ρ_t le facteur de réflexion de la cible (pris égal à 0.2) ;

q_c le paramètre de qualité de contraste (pris égal à 0.6 pour une installation contre-flux).

La courbe de décroissance de luminance admissible en fonction des conditions de luminances de voile peut ainsi être établie. Cette courbe est valable pour les conditions climatiques prises en considération.

Modélisation des niveaux de luminance fournis par l'installation de renfort et de base

L'étape suivante de la modélisation est de déterminer les niveaux de luminance produits par l'installation d'éclairage pour répondre au besoin établi précédemment. Pour cela, de nouvelles simulations sont menées sous OCEAN, le capteur utilisé n'est plus une caméra permettant de calculer la luminance de chaque pixel de l'image, mais un capteur appelé « Surface light map » mesurant toutes les valeurs d'éclairement sur un matériau du modèle 3D choisi. La chaussée est segmentée en zones de calcul transversales de 40 cm de large et espacées de 2 m (de centre à centre, le centre de la première zone est à 1 m du portail d'entrée). Une première simulation (présentée en Figure 4-9) permet de repérer la position des zones de calcul sur l'image résultante. Ensuite, une simulation est faite pour chaque rangée de luminaires de l'installation de renfort (62 rangées), et pour chacune de ces simulations, la valeur moyenne d'éclairement sur chaque zone de calcul est récupérée à l'aide d'un programme Matlab développé dans ce but. Les résultats sont stockés dans un tableau de la forme donnée en équation [4-12].

$$\begin{pmatrix} E_{ref_{11}} & \cdots & E_{ref_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{ref_{m1}} & \cdots & E_{ref_{mn}} \end{pmatrix} \quad [4-12]$$

Avec n le nombre de rangées de luminaires (62) et m le nombre de zones de calcul (137) ;

$E_{ref_{ij}}$ l'éclairement de référence calculé sur la zone de calcul i lorsque la rangée de luminaires j de l'installation de renfort est allumée (lx).

La Figure 4-10 montre des exemples de résultats de simulation obtenus pour différentes rangées de luminaires de l'installation de renfort.



Figure 4-9 Simulation OCEAN donnant les 137 zones de calcul utilisées pour l'évaluation des éclairagements sur la chaussée

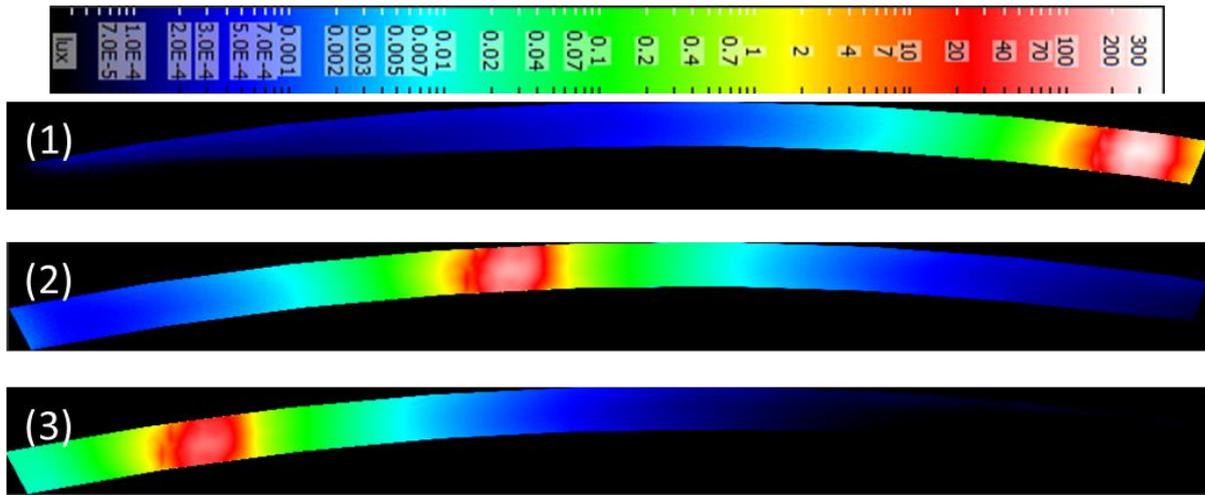


Figure 4-10 Simulations OCEAN donnant les éclairagements sur la chaussée pour différentes rangées de luminaires allumées. (1) Première rangée pour le renfort de type 1 (voir Tableau 4-2) ;(2) Première rangée pour le renfort de type 2 ;(3) Première rangée pour le renfort de type 3.

Afin de pouvoir comparer les besoins et les niveaux fournis par l'installation, le profil de décroissance de luminance admissible est converti en profil de décroissance des niveaux d'éclairage grâce à l'équation [4-13].

$$E = \frac{\pi L}{c_{renf}} \quad [4-13]$$

Avec c_{renf} le coefficient de clarté de la chaussée valable pour l'installation de renfort (contre-flux), pris égal à 0.24 (CETU 2000).

Un algorithme développé sous Matlab permet ensuite d'optimiser le flux de sortie des luminaires de renfort afin d'obtenir des éclairagements les plus proches possibles de ceux stipulés dans les besoins. Cet algorithme s'appuie sur la fonction « fmincon » (minimum d'une fonction non linéaire à plusieurs variables avec contraintes) et cherche le vecteur colonne x tel que l'équation [4-14] soit minimale, tout en vérifiant l'inégalité [4-15].

$$\sum_i \sum_j E_{ref_{ij}} x_j \quad [4-14]$$

$$\begin{pmatrix} \sum_j E_{ref_{1j}} x_j \\ \dots \\ \sum_j E_{ref_{mj}} x_j \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} E_{besoin_1} \\ \dots \\ E_{besoin_m} \end{pmatrix} \quad [4-15]$$

Avec i l'indice de la zone de calcul ;

j l'indice de la rangée de luminaires de l'installation de renfort ;

E_{besoin_i} Le besoin en éclairage au niveau de la zone de calcul i (lx).

Le vecteur x ainsi obtenu en résolvant ce problème donne les facteurs correctifs à appliquer aux flux de chaque rangée de luminaires, afin que la courbe de décroissance d'éclairage fournie par l'installation soit supérieure à la courbe de besoin, tout en étant la plus proche

possible. En résumé, la résolution de ce problème permet d'optimiser les flux des rangées de luminaires pour obtenir les éclairagements les plus performants possibles en termes de consommations énergétiques, tout en assurant la sécurité des usagers. Les luminances obtenues après application du facteur correctif sont données par l'équation [4-16].

$$L_{renf_i} = \sum_j E_{ref_{ij}} x_j \frac{c_{renf}}{\pi} \quad [4-16]$$

Avec L_{renf_i} la luminance fournie par l'installation de renfort au niveau de la zone de calcul i (cd.m^{-2}).

On peut ainsi comparer le besoin en luminance de chaussée et les niveaux produits par l'installation.

En ce qui concerne l'installation de base, une seule simulation est effectuée avec tous les luminaires la constituant allumés. Le résultat obtenu sous OCEAN est présenté en Figure 4-11.

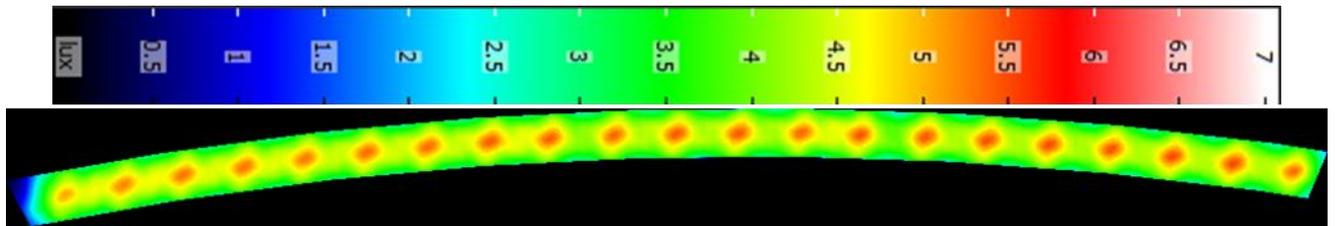


Figure 4-11 Simulations OCEAN donnant les éclairagements sur la chaussée pour l'installation de base allumée

Les éclairagements de référence pour toutes les zones sont calculés grâce à un programme Matlab à nouveau, les résultats sont stockés dans un vecteur colonne de longueur $m = 137$. L'équation [4-17] donne l'éclairement moyenné sur toutes les zones de calcul à l'intérieur du tunnel pour l'installation de base.

$$E_{moybase} = \frac{\sum_{i=1}^m E_{ref_{base_i}}}{m} \quad [4-17]$$

Avec $E_{moybase}$ l'éclairement moyen produit par l'installation de base sur toutes les zones de calcul du tunnel (lx) ;

$E_{ref_{base_i}}$ l'éclairement moyen produit sur la zone de calcul i par l'installation de base (lx) ;

m le nombre de zones de calcul dans le tunnel ($m = 137$).

Le facteur correctif du flux de l'installation de base est donné par l'équation [4-18].

$$x_{base} = \frac{E_{besoinbase}}{E_{moybase}} \quad [4-18]$$

Avec x_{base} le facteur correctif du flux de l'installation de base ;

$E_{\text{besoin}_{\text{base}}}$ le besoin en éclairage sur la chaussée pour l'installation de base (lx).

Le besoin en éclairage peut être déduit du besoin en luminance grâce à l'équation [4-19].

$$E_{\text{besoin}_{\text{base}}} = \frac{\pi}{c_{\text{base}}} L_{\text{besoin}_{\text{base}}} \quad [4-19]$$

Avec $L_{\text{besoin}_{\text{base}}}$ le besoin en luminance de chaussée pour l'installation de base (cd.m^{-2}) ;

c_{base} le coefficient de clarté de la chaussée valable pour l'installation de base (symétrique), pris égal à 0.18 (CETU 2000).

Les luminances résultant de l'installation de base pour chaque zone de calcul sont ensuite données par l'équation [4-20].

$$L_{\text{base}_i} = E_{\text{ref}_{\text{base}_i}} x_{\text{base}} \frac{c_{\text{base}}}{\pi} \quad [4-20]$$

Avec L_{base_i} la luminance issue de l'installation de base et calculée sur la zone de calcul i (cd.m^{-2}).

L'équation [4-21] donne l'expression totale de la luminance issue de l'installation d'éclairage artificiel.

$$L_{\text{art}_i} = L_{\text{ref}_i} + L_{\text{base}_i} \quad [4-21]$$

Avec L_{art_i} la luminance issue de l'éclairage artificiel calculée au niveau de la zone i (cd.m^{-2}).

Calcul des consommations énergétiques des installations de renfort et de base

La formule de calcul pour les consommations énergétiques s'appuie sur le ratio du flux émis par le luminaire sur le flux maximum de ce même luminaire (J. Zhao, Feng, et Yang 2021). L'équation [4-22] donne le flux pour une rangée de luminaire de l'installation de renfort.

$$\phi_j = \phi_{\text{ref}_j} x_j \quad [4-22]$$

Avec ϕ_j le flux de la rangée j pour un quart d'heure donné (lm) ;

ϕ_{ref_j} le flux de référence (flux maximal) d'un seul luminaire utilisé sur la rangée j (lm).

L'équation [4-23] donne le ratio du flux d'une rangée de l'installation de renfort sur le flux maximum de cette rangée.

$$d_{\text{renf}} = \frac{\phi_j}{2 \phi_{\text{ref}_j}} \quad [4-23]$$

L'équation [4-24] détaille le calcul de la consommation énergétique d'une rangée pour un quart d'heure donné (càd une condition du fichier d'éclairage naturel).

$$E_{n_{\text{renf}_j}} = 0.25 \times 2 P_{\text{ref}_j} d_{\text{renf}} \quad [4-24]$$

Avec En_{renf_j} l'énergie consommée par la rangée j de l'installation de renfort pour un quart d'heure donné (Wh) ;

P_{ref_j} la puissance de référence d'un seul luminaire de la rangée j (W).

Enfin, l'équation [4-25] donne la consommation énergétique totale de l'installation de renfort pour un quart d'heure donné.

$$En_{renf} = \sum_j En_{renf_j} \quad [4-25]$$

Le flux corrigé de la totalité de l'installation de base est ensuite donné par l'équation [4-26].

$$\phi_{base} = x_{base} \phi_{ref_{base}} \quad [4-26]$$

Avec ϕ_{base} le flux de la totalité de l'installation de base (lm) ;

$\phi_{ref_{base}}$ le flux de référence utilisé pour la totalité de l'installation de base dans la simulation OCEAN (cette donnée étant importée depuis un fichier IES, elle correspond au flux maximal d'un des luminaires de l'installation de base) (lm).

L'équation [4-27] donne le ratio du flux de l'installation de base sur son flux maximum.

$$d_{base} = \frac{\phi_{base}}{\phi_{ref_{base}} n_{lumi}} \quad [4-27]$$

Avec n_{lumi} le nombre de luminaires qui composent l'installation de base (42).

Enfin, l'équation [4-28] donne la consommation énergétique de l'installation de base pour un quart d'heure donné.

$$En_{base} = 0.25 n_{lumi} P_{ref_{base}} d_{base} \quad [4-28]$$

Avec En_{base} l'énergie consommée par l'installation de base pour un quart d'heure donné (Wh) ;

$P_{ref_{base}}$ la puissance de référence d'un luminaire de l'installation de base (W).

La consommation d'énergie totale de l'installation d'éclairage pour un quart d'heure donné peut être obtenue grâce à l'équation [4-29].

$$En_{tot} = En_{renf} + En_{base} \quad [4-29]$$

Impact de la lumière naturelle

Pour cette étape, 145 nouvelles simulations sous OCEAN sont nécessaires en utilisant à nouveau le capteur permettant de calculer les valeurs d'éclairement sur la chaussée du tunnel. Une simulation est réalisée pour chaque zone de ciel, et les valeurs moyennes d'éclairement

pour chaque zone de calcul et chaque zone de ciel sont à leurs tours stockées dans une matrice de la forme donnée en équation [4-30].

$$\begin{pmatrix} E_{nat,ref_{11}} & \cdots & E_{nat,ref_{1p}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{nat,ref_{m1}} & \cdots & E_{nat,ref_{mp}} \end{pmatrix} \quad [4-30]$$

Avec p le nombre de zones de ciel (145) et m le nombre de zones de calcul (137) ;

$E_{nat,ref_{ij}}$ l'éclairement de référence calculé sur la zone i lorsque la zone de ciel j est allumée (lx).

L'équation [4-31] donne ensuite l'éclairement moyen sur la zone de calcul i provenant de la zone de ciel j pour des conditions d'éclairage naturel données.

$$E_{nat_{ij}} = E_{nat,ref_{ij}} \frac{L_{ciel_j}}{L_{ciel,ref}} \quad [4-31]$$

Avec L_{ciel_j} la luminance moyenne de la zone de ciel j pour la condition d'éclairage naturel considérée (cd.m^{-2}) ;

$L_{ciel,ref}$ la luminance moyenne de la zone de ciel j prise en compte dans les simulations ($10\,000 \text{ cd.m}^{-2}$).

Les éclairements peuvent ensuite être convertis en luminance en utilisant l'équation [4-32].

$$L_{nat} = \frac{c_{nat}}{\pi} E_{nat} \quad [4-32]$$

Avec c_{nat} le coefficient de clarté de la chaussée (valable pour la lumière naturelle, pris égal à 0.18 (CETU 2000)). On choisit un coefficient de clarté ayant la même valeur que celui pris pour une installation symétrique, puisque le coefficient valable pour le contre flux n'aurait pas vraiment de sens ici (la source de lumière est dans le dos du conducteur pas en face de lui).

L'équation [4-33] donne la luminance résultant des conditions de luminosité extérieure sur la zone de calcul à l'intérieur du tunnel.

$$L_{nat_i} = \sum_j E_{nat_{ij}} \frac{c_{nat}}{\pi} \quad [4-33]$$

Avec L_{nat_i} la luminance issue de l'éclairage naturel et calculée sur la zone i (cd.m^{-2}).

Enfin, la relation [4-34] donne la luminance résultante totale sur chaque zone de calcul à l'intérieur du tunnel.

$$L_{tot_i} = L_{art_i} + L_{nat_i} \quad [4-34]$$

Evaluation des uniformités

Afin de quantifier la qualité de l'éclairage à l'intérieur du tunnel, les uniformités générales et longitudinales ont été calculées. Pour ce faire, une méthode similaire à celle utilisée pour l'évaluation des luminances dans la maquette de tunnel (présentée en section **3.3.2.4 Résultats en luminance**) a été appliquée. Dans un premier temps, la grille d'uniformité utilisée dans la norme NF EN 13201-3 a été représentée dans le modèle 3D Sketchup (grille de 30 m de long qui débute 60 m après l'entrée du tunnel), puis une simulation est réalisée sous OCEAN pour une caméra placée au centre de la largeur du portail d'entrée à une hauteur de 1.5 m. Le rendu visuel de cette simulation est présenté en Figure 4-12.

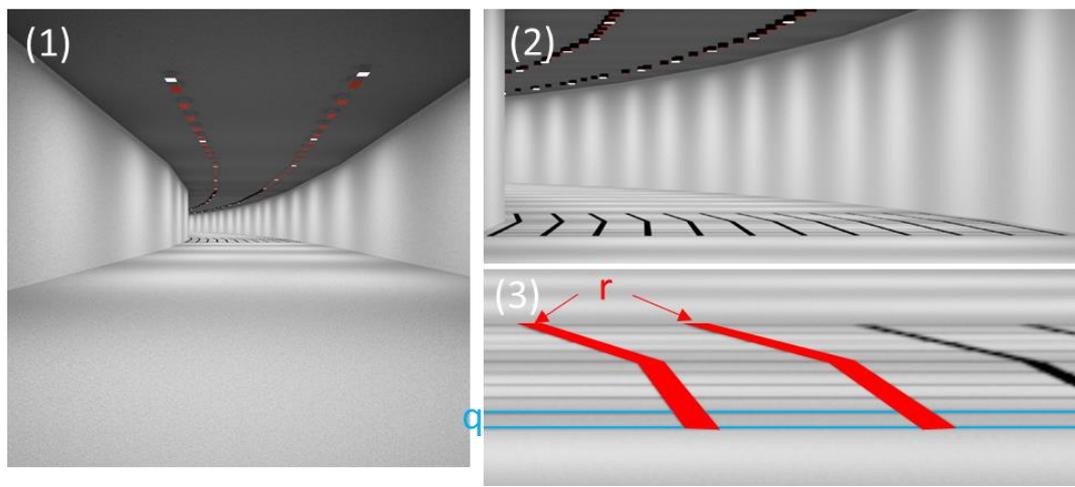


Figure 4-12 Rendus visuels issus de simulations OCEAN pour différentes vues de la grille d'uniformité des luminances de chaussée utilisée. (1) Vue depuis l'entrée du tunnel ; (2) Vue proche ; (3) Zoom sur une portion de la grille : l'indice r désigne les « colonnes » et l'indice q désigne les « lignes ».

A partir de cette image, les coordonnées des pixels correspondant aux intersections de la grille d'uniformité ont été récupérées sous Matlab. Ensuite, une simulation a été réalisée pour chaque rangée de luminaires de l'installation de renfort avec la même caméra que celle utilisée pour la Figure 4-12 (1)). Une simulation a également été réalisée pour l'installation de base. Des exemples de résultats sont présentés en Figure 4-13.

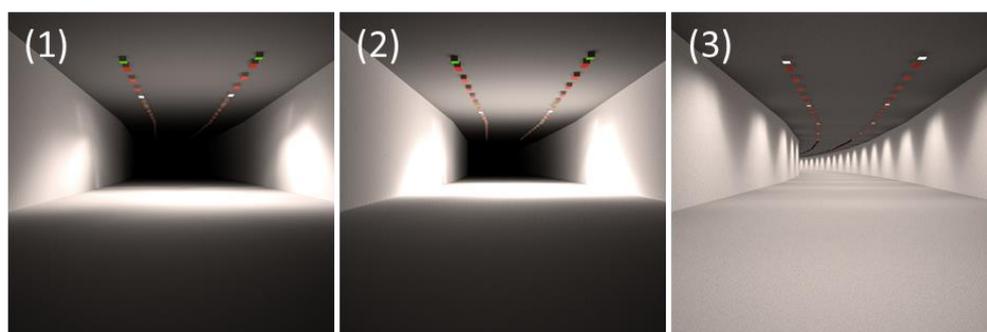


Figure 4-13 Rendus visuels issus de simulations OCEAN avec différentes rangées de luminaires allumées. (1) Quatrième rangée pour le renfort de type 1 ; (2) Septième rangée pour le renfort de type 1 ; (3) Toutes les rangées pour l'installation de base.

Pour chacune de ces simulations, une moyenne a été réalisée sur un carré de 9 pixels autour de chaque pixel situé au niveau d'un des points de la grille de calcul. Des valeurs de luminance moyennes correspondant aux luminances calculées au niveau des points de la grille ont ainsi été obtenues pour chaque simulation. Ces résultats ont été stockés dans une variable. Une fois le vecteur x des facteurs correctifs de flux des différentes rangées de luminaires déterminé (voir équation [4-14]), les valeurs de luminance moyennes au niveau des points de la grille, pour les conditions d'éclairage étudiées, ont pu être calculées selon l'équation [4-35].

$$M_{qr} = \left(\sum_j M_{ref\ j\ qr} x_j \right) + M_{ref\ base\ qr} x_{base} \quad [4-35]$$

Avec M_{qr} la moyenne de luminance résultante pour le point situé ligne q et colonne r dans la grille d'uniformité ($cd.m^{-2}$) ;

$M_{ref\ j\ qr}$ la moyenne de luminance obtenue au niveau du point situé ligne q et colonne r dans la grille d'uniformité, pour la simulation de référence de la rangée de luminaires j de l'installation de renfort ($cd.m^{-2}$) ;

x_j le facteur correctif à appliquer au flux de la rangée de luminaires j de l'installation de renfort ;

$M_{ref\ base\ qr}$ la moyenne de luminance obtenue au niveau du point situé ligne q et colonne r dans la grille d'uniformité, pour la simulation de référence de l'installation de base ($cd.m^{-2}$) ;

x_{base} le facteur correctif à appliquer au flux de l'installation de base.

Une fois ces valeurs déterminées, les calculs des uniformités générales (U_g) et longitudinales (U_l) ont été menés selon les équations [4-36] et [4-37].

$$U_g = \frac{\min(M_{qr}) \times q \times r}{\sum_q \sum_r M_{qr}} \quad [4-36]$$

$$U_l = \min_r \left(\frac{\min_q(M_{qr})}{\max_q(M_{qr})} \right) \quad [4-37]$$

Les valeurs d'uniformité ont ainsi pu être calculées pour chaque condition d'éclairage testée.

Schéma simplifié de l'algorithme

La Figure 4-14 présente un schéma simplifié résumant le fonctionnement de l'algorithme de calcul présenté ci-dessus.

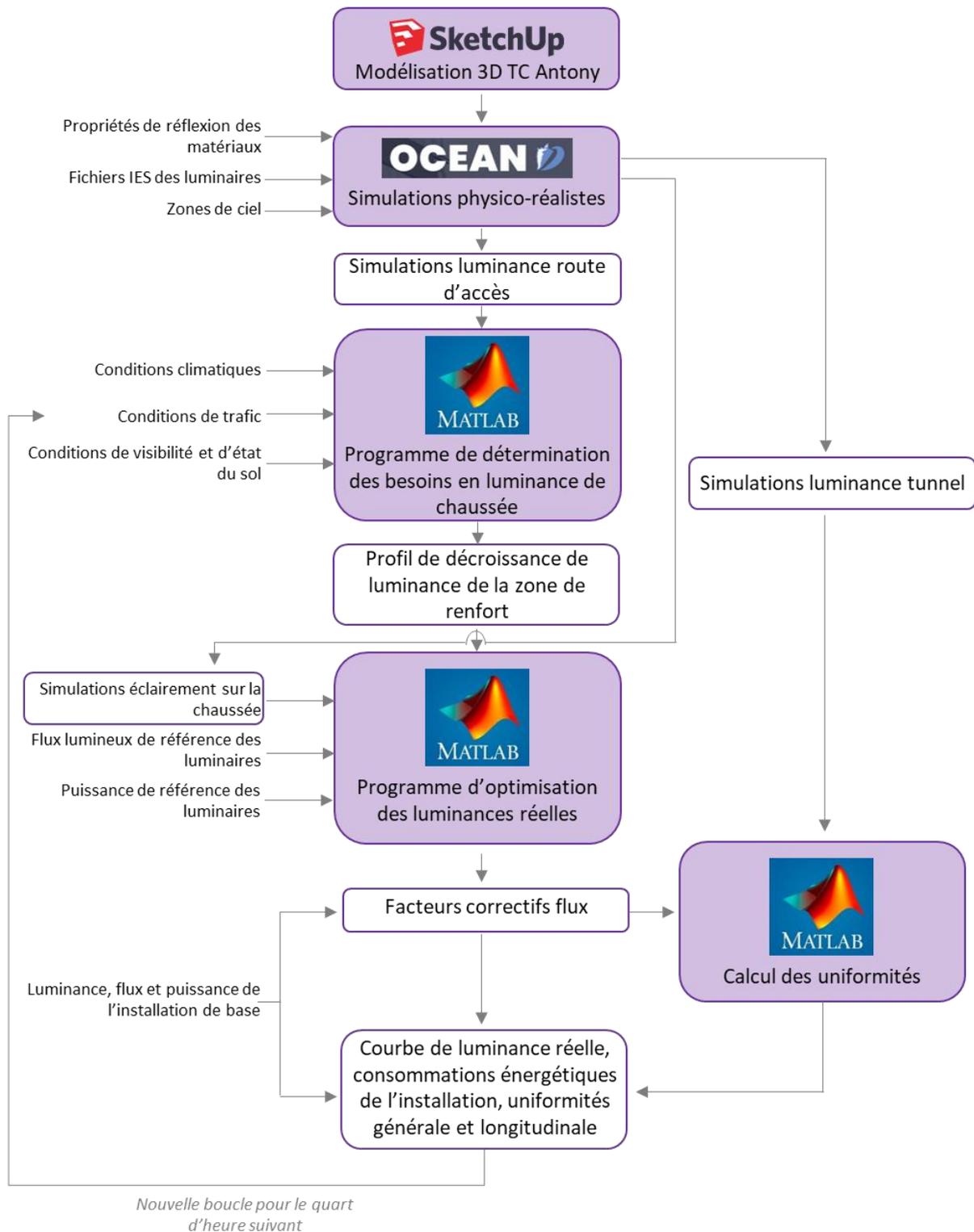


Figure 4-14 Schéma résumé de l'algorithme de calcul du modèle dynamique

4.3 Scénarios d'éclairage testés

4.3.1 Présentation des scénarios et hypothèses associées

Une fois le modèle développé, différents scénarios ont été testés afin d'envisager des pistes de recherche pour réaliser des économies d'énergie sur les installations d'éclairage LEDs en tunnel. Quatre scénarios ont été créés et évalués grâce au modèle dynamique décrit ci-dessus : un scénario dit de référence (scénario ref), un scénario avec un asservissement poussé aux conditions de luminosité extérieure (scénario L), un scénario asservi aux conditions de luminance et de trafic (scénario LT), et un scénario asservi aux conditions de luminosité, de trafic et d'état du sol (scénario LTES). Les hypothèses de dimensionnement et les modalités d'asservissement sont décrites dans la section suivante.

4.3.1.1 Hypothèses de dimensionnement

La première étape est de faire tourner l'algorithme de calcul simplement pour évaluer les luminances de voile à l'année afin d'identifier les conditions de dimensionnement de l'ouvrage (conditions les plus défavorables prises en compte pour la conception du profil de décroissance maximal). Pour ce faire, les quarts d'heure du fichier d'éclairage naturel pour lesquels le soleil est directement dans le champ de vision du L_{seq} ne sont pas pris en compte puisque l'installation d'éclairage ne peut pas permettre de compenser une luminance de voile aussi élevée. La règle de dimensionnement considérée dans le modèle est celle de la CIE, prenant en compte la 75^{ème} heure la plus défavorable comme condition de référence. Afin d'obtenir cette valeur, les données de luminance de voile L_{seq} obtenues tous les quarts d'heure (exception faite des quarts d'heure pour lesquels le soleil est directement dans le champ de vision du conducteur) sont moyennées pour obtenir des valeurs sur une heure. Ces valeurs horaires sont ensuite classées par ordre décroissant et la 75^{ème} valeur la plus élevée est retenue pour le dimensionnement. Le même procédé est répété pour les valeurs de L_{20} et de L_0 . Des valeurs de dimensionnement doivent également être obtenues pour les luminances de voile d'atmosphère et de pare-brise. Pour les calculer, la valeur de V_m dépassée 85 % du temps (voir Figure 4-6) est utilisée, comme le préconise Padmos (Padmos 1984). Les valeurs de dimensionnement utilisées sont résumées en Tableau 4-4.

Tableau 4-4 Paramètres pris en compte pour le dimensionnement du profil de luminance de référence

L_{seqdim}	162.3 cd/m ²
L_{20dim}	3957 cd/m ²
L_{0dim}	4721 cd/m ²
V_{mdim}	8500 m
v_{dim}	70 km/h

Le profil de décroissance admissible associé à ces valeurs de dimensionnement est présenté en Figure 4-15 Il est obtenu en appliquant l'équation [4-11] pour les valeurs indiquées dans le Tableau 4-4, puis en utilisant le profil de décroissance prédéfini de la CIE, indiqué en Figure 4-8.

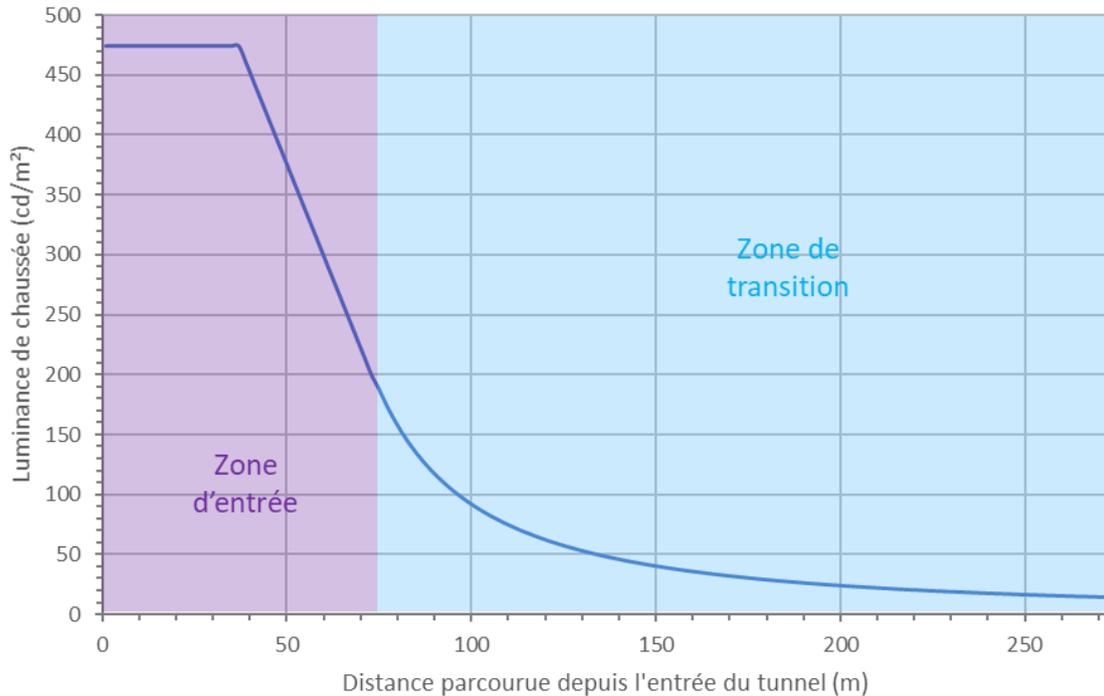


Figure 4-15 Profil de besoin de luminance de chaussée établi pour le dimensionnement (=profil maximum de besoin, l'installation ne peut pas aller au-delà)

En ce qui concerne le pilotage de l'installation d'éclairage, lorsque l'éclairement horizontal global (indiqué dans le fichier d'éclairage naturel, voir section **3.4.2.2 Fichier d'éclairage naturel des luminances du ciel et du soleil**) passe en dessous de 100 lx, le tunnel passe en régime de nuit et l'installation de renfort s'éteint. Cette stratégie de pilotage est commune à tous les scénarios détaillés ci-après.

4.3.1.2 Présentation des scénarios

Scénario de référence (ref)

Le premier scénario constitue un état de référence pour lequel les règles de pilotage de l'installation sont les plus proches possibles de celles actuellement recommandées par le CETU pour les LEDs. Le profil de décroissance maximum pris en compte est celui présenté en Figure 4-15. Il est décliné en 9 niveaux de gradation (90% des valeurs de la courbe, 80 %, 70 %, ...). L'installation est pilotée par l'intermédiaire de l'évaluation du L_{20} tous les quarts d'heure : le rapport $L_{20}/L_{20_{aim}}$ donne le niveau de gradation à mettre en œuvre dans le tunnel (pour

exemple, si $L_{20}/L_{20_{dim}}$ est compris entre 0.81 et 0.90, le besoin de luminance dans le tunnel est celui correspondant à 90% du profil de décroissance maximum). En pratique, l'image résultant des conditions d'éclairage naturel passées en paramètre était produite chaque quart d'heure pour ce scénario et le L_{20} était évalué depuis la distance d'observation. Le ratio $L_{20}/L_{20_{dim}}$ était ensuite calculé et le profil de décroissance, ainsi que la courbe de luminance fournie par l'installation de renfort en étaient déduits. Ces deux éléments étaient prédéterminés et le ratio $L_{20}/L_{20_{dim}}$ permettait simplement de savoir quel niveau de gradation allait être utilisé par l'installation. Ainsi, le processus de calcul présenté dans la section **4.2.4.3 Algorithme de calcul**, et notamment l'optimisation du flux des luminaires pour répondre au besoin préétabli, était réalisé pour chaque niveau de gradation de 10 % et les résultats étaient stockés dans une variable. Le calcul d'optimisation n'était donc pas effectué pour chaque quart d'heure du fichier d'éclairage naturel : en fonction de la valeur de $L_{20}/L_{20_{dim}}$, les résultats adéquats étaient directement récupérés et appliqués.

Pour ce qui est de l'installation de base, les niveaux de luminance retenus sont de 6 cd/m² en journée et de 2 cd/m² pour le régime de nuit (CETU 2000).

Scénario asservi en luminance (L)

Comme on a pu le voir, le scénario de référence est déjà asservi à la luminance puisque l'évaluation du L_{20} permet de piloter l'installation. Cependant, il s'appuie sur des paliers préétablis qui, même s'ils s'approchent du besoin réel, sont surdimensionnés. Ce premier scénario test vise à s'affranchir de ces paliers et à adapter la courbe de luminance produite par l'installation aux besoins à chaque instant. En clair, l'image résultant des conditions d'éclairage naturel est produite chaque quart d'heure, puis le besoin est calculé selon le procédé décrit en section **4.2.4.3 Algorithme de calcul** et l'optimisation du flux des luminaires est réalisée sur ce besoin calculé. On réalise donc un calcul d'optimisation pour chaque quart d'heure sans avoir de résultats préétablis comme pour le scénario de référence. Il est à noter que le profil de décroissance présenté en Figure 4-15 constitue le profil de besoin maximal : dans le cas où les conditions de luminances de voile imposeraient un besoin plus élevé, ce dernier est écrêté et c'est le profil présenté ci-dessus qui est retenu.

En ce qui concerne l'installation de base, le choix a été fait pour les scénarios tests d'appliquer les résultats obtenus lors de l'expérimentation psycho-visuelle présentée en section **2.3.6.2 Application à l'éclairage de section courante**. Ainsi, la température de couleur des luminaires utilisés dans les simulations étant de 5700 K, les résultats obtenus pour la LED blanche à 5000 K ont été appliqués ici, indépendamment du jour ou de la nuit. Les données collectées pour le seuil de visibilité 4 ont été retenues, puisqu'elles constituent des conditions de sécurité pour les conducteurs (ils sont capables de reconnaître un obstacle sur la chaussée avec précision). Le besoin en termes de luminance de chaussée pour l'installation de base est donc de 2.9 cd/m², de jour comme de nuit.

Scénario asservi en luminance et à la vitesse de trafic (LT)

De la même façon que pour le scénario L, les calculs de besoin et d'optimisation du flux de sortie des luminaires sont réalisés tous les quarts d'heure. Cependant, le scénario L ne tient compte que des conditions d'éclairage naturel, tandis que le scénario LT se base également sur les données de vitesse de trafic. En pratique, la distance d'arrêt est recalculée chaque quart d'heure en fonction de la vitesse de trafic (lorsque la vitesse dépasse la vitesse de référence, cette dernière est utilisée pour le calcul). Les luminances de voile sont ensuite évaluées à la distance d'arrêt calculée (voir équations [4-5], [4-6] et [4-7]) et les besoins sont déterminés à partir de ces résultats. Une fois le besoin déterminé, le calcul d'optimisation est réalisé chaque quart d'heure comme pour le scénario L.

Le besoin de l'installation de base est le même que celui fixé pour le scénario L.

Scénario asservi en luminance, à la vitesse de trafic et à l'état du sol (LTES)

Ce troisième scénario test reprend les principes d'asservissement du scénario LT, en tenant également compte de l'état du sol. En pratique, le calcul de la distance d'arrêt tous les quarts d'heure s'appuie sur la vitesse de trafic, mais également sur l'état du sol (sec ou mouillé). Le coefficient de frottement appliqué dans l'équation [4-1] (distance d'arrêt) est habituellement valable pour chaussée mouillée, mais en prenant en compte un coefficient de frottement pour chaussée sèche, les valeurs de distance d'arrêt calculée vont diminuer. Une fois cette nouvelle distance d'arrêt calculée, la même méthode que pour le scénario LT est appliquée.

Le besoin de l'installation de base est à nouveau le même que pour le scénario L.

4.3.2 Résultats obtenus

Les résultats obtenus se séparent en plusieurs catégories : la vérification de la sécurité des usagers, les consommations énergétiques des scénarios, et la qualité de l'éclairage proposé.

4.3.2.1 Conditions de sécurité

La première étape de vérification est de comparer les résultats obtenus pour la courbe de luminance fournie par l'installation avec le profil de décroissance de besoin. Cette étape a été réalisée pour les différents scénarios sur plusieurs journées tests. Les résultats obtenus pour la journée du 14 mai 2019 prise en exemple (jour de semaine ensoleillé avec un sol sec) sont présentés en Figure 4-16.

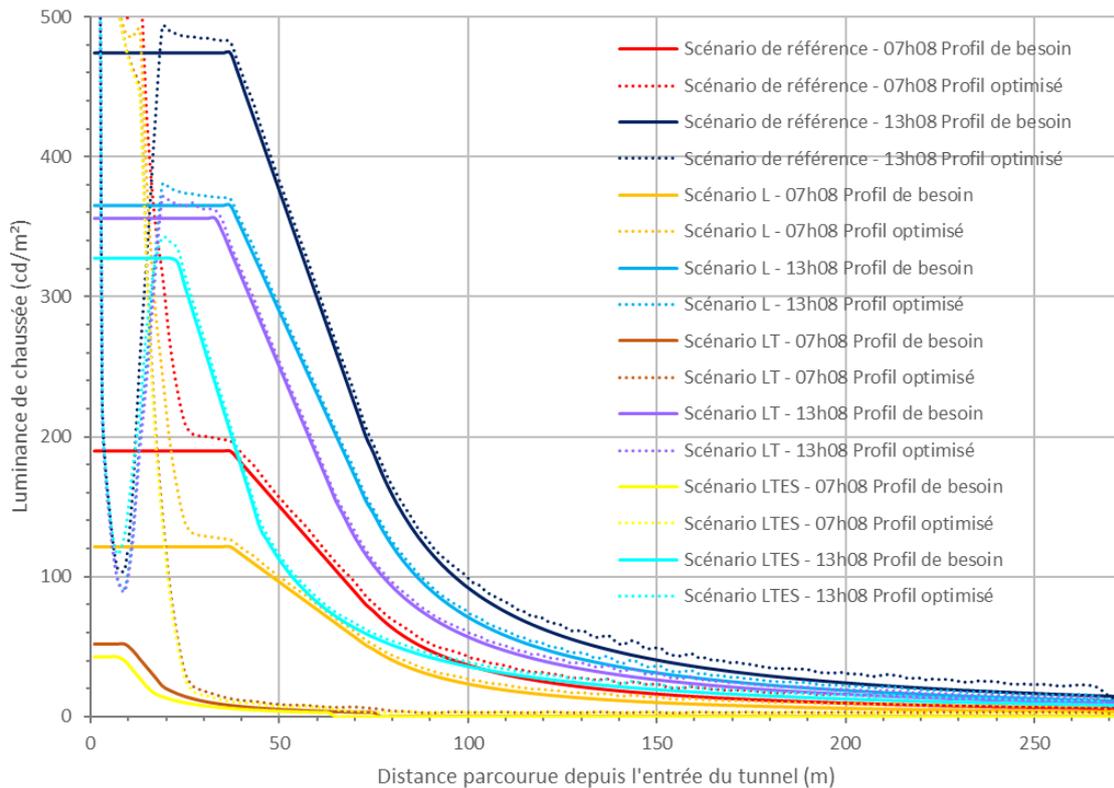


Figure 4-16 Profils de luminance de besoin et profils de luminance optimisés par le modèle dynamique à 07h08 et 13h08 le 14/05/2019 pour les 4 scénarios testés

On note que la courbe de luminance produite par l'installation est bien supérieure à la courbe de besoin pour les heures considérées et les scénarios testés, exception faite des 20 premiers mètres à l'intérieur du tunnel. Cette dernière constatation est due à une hypothèse de dimensionnement faite pour l'installation d'éclairage issue de la doctrine CETU : l'éclairage n'est pas renforcé sur les premiers mètres à l'intérieur du tunnel, jusqu'à une distance égale à la plus grande diagonale du profil en travers intérieur du tunnel (17.6 m). Cette hypothèse est faite en s'appuyant sur le fait que la pénétration de la lumière naturelle suffit à combler le besoin. On remarque sur le graphique ci-dessus que pour ce tunnel, dont le portail d'entrée est plutôt tourné vers l'Est, seul le profil de 07h08 bénéficie d'une forte pénétration de la lumière naturelle (environ 25 m). Pour le profil de 13h08, l'influence de la lumière naturelle ne se fait ressentir au maximum que sur les 10 premiers mètres à l'intérieur du tunnel. Cette constatation était vraie pour de nombreux profils sur la plupart des journées tests prises en compte. On constate donc que pour la plupart des profils, une zone à l'entrée du tunnel ne satisfait pas les besoins de luminance nécessaires à la bonne visibilité des conducteurs. Afin de quantifier l'influence de la lumière du jour à l'intérieur de l'ouvrage, un calcul des facteurs de lumière du jour moyens sur chaque zone de calcul de la chaussée a été réalisé. Une simulation a été effectuée sous OCEAN pour un ciel CIE de type 1 (ciel couvert). Le résultat obtenu est présenté en Figure 4-17.

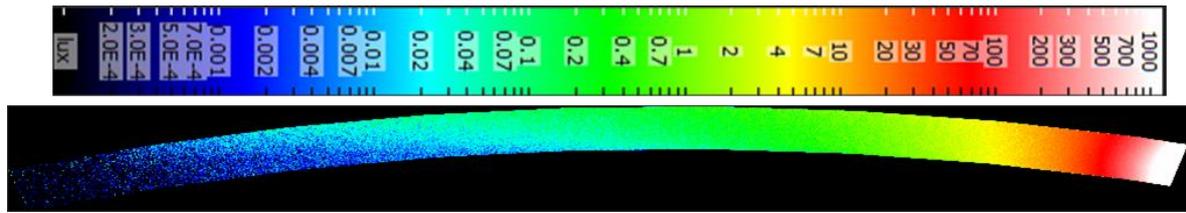


Figure 4-17 Résultats de simulation OCEAN pour un ciel CIE de type 1 (ciel couvert, luminance zénithale de 5000 cd/m²)

L'équation [4-38] donne l'éclairement horizontal théorique sous un ciel couvert.

$$E_h = \frac{7 \pi L_z}{9} \quad [4-38]$$

Avec E_h l'éclairement horizontal (lx) ;

L_z la luminance zénithale (cd.m⁻²).

Le facteur de lumière du jour de chaque pixel de la chaussée peut ensuite être calculé selon l'équation [4-39].

$$FLJ_k = \frac{E_k}{E_h} \quad [4-39]$$

Avec FLJ_k le facteur de lumière du jour au niveau du pixel k ;

E_k l'éclairement calculé dans la simulation pour le pixel k.

On effectue ensuite la moyenne de ces valeurs de facteurs de lumière du jour sur chacune des zones de calcul de la chaussée. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 4-18.

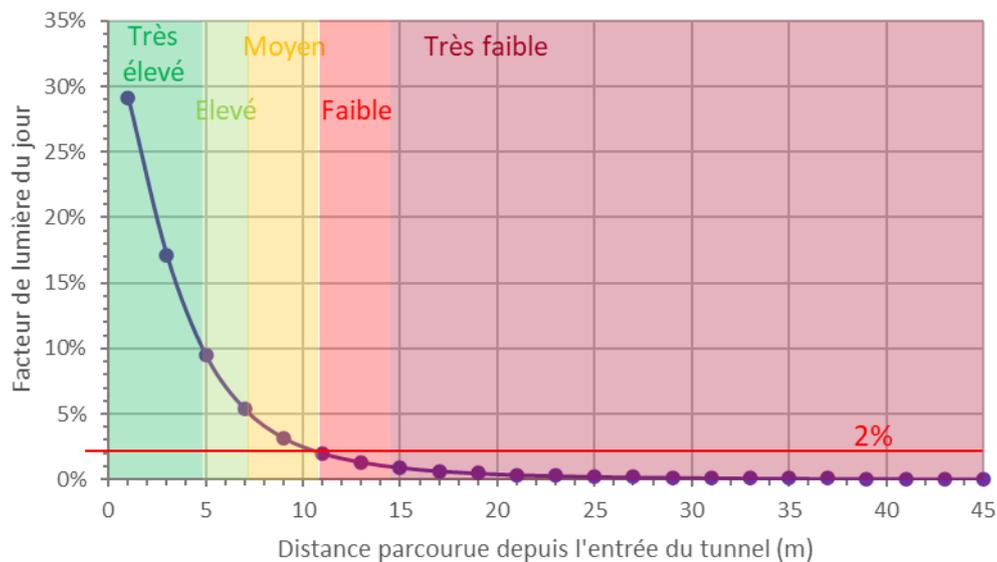


Figure 4-18 Facteurs de lumière du jour moyens sur chaque zone de calcul de la chaussée (voir Figure 4-9)

Conventionnellement, on considère qu'un facteur de lumière du jour inférieur à 2% nécessite l'usage d'éclairage artificiel. On s'aperçoit donc ici que cette valeur est atteinte pour une distance à l'intérieur du tunnel d'environ 11 m. L'influence de la lumière naturelle se fait donc très peu sentir au-delà de cette distance dans la plupart des cas.

Un algorithme a été développé dans un second temps afin de vérifier pour chaque quart d'heure et chaque scénario, que pour la plage de mesure 19 m – 267 m, les niveaux fournis par l'installation étaient bien toujours supérieurs aux besoins. Les résultats de cet algorithme confirment bien ce prérequis, les niveaux de luminance obtenus à l'intérieur du tunnel respectent donc les conditions de sécurité établies par les règles de la CIE.

4.3.2.2 Consommations énergétiques

Vérification de la cohérence des résultats

Dans un second temps, Les consommations énergétiques de chacun des 4 scénarios ont été évaluées à l'aide du modèle dynamique. Une première étape préliminaire a été de tester la cohérence des résultats obtenus. Pour ce faire, les données de consommations énergétiques ont été tracées quotidiennement pour toute l'année 2019 afin de mettre en évidence d'éventuelles anomalies et de comprendre leur origine le cas échéant.

Certains tracés quotidiens sont présentés en exemple dans la Figure 4-20. La Figure 4-19 présente des profils de consommations anormalement élevés qui seront analysés ci-après.

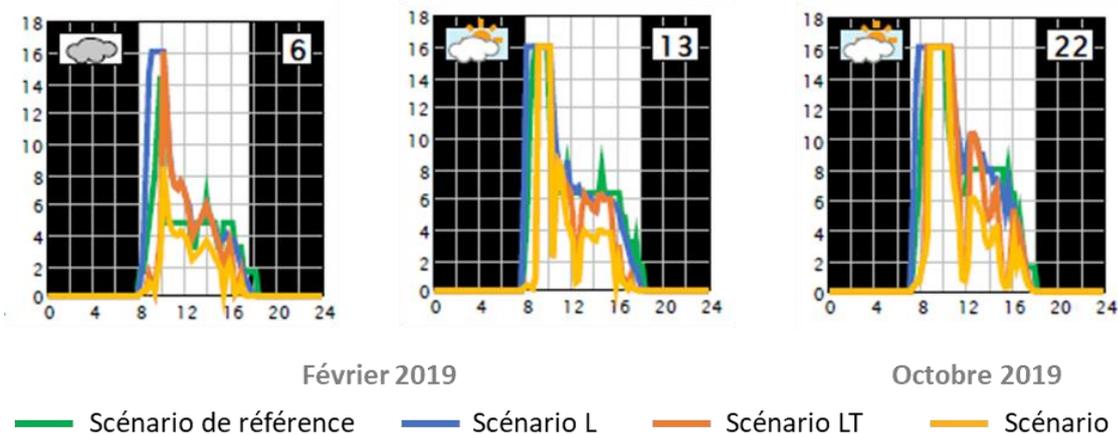


Figure 4-19 Exemples de profils de consommation de l'installation de renfort atypiques pour les journées du 6 et 13 février 2019 et du 22 octobre 2019. L'axe des ordonnées donne la consommation électrique en kWh et l'axe des abscisses donne l'heure d'hiver.

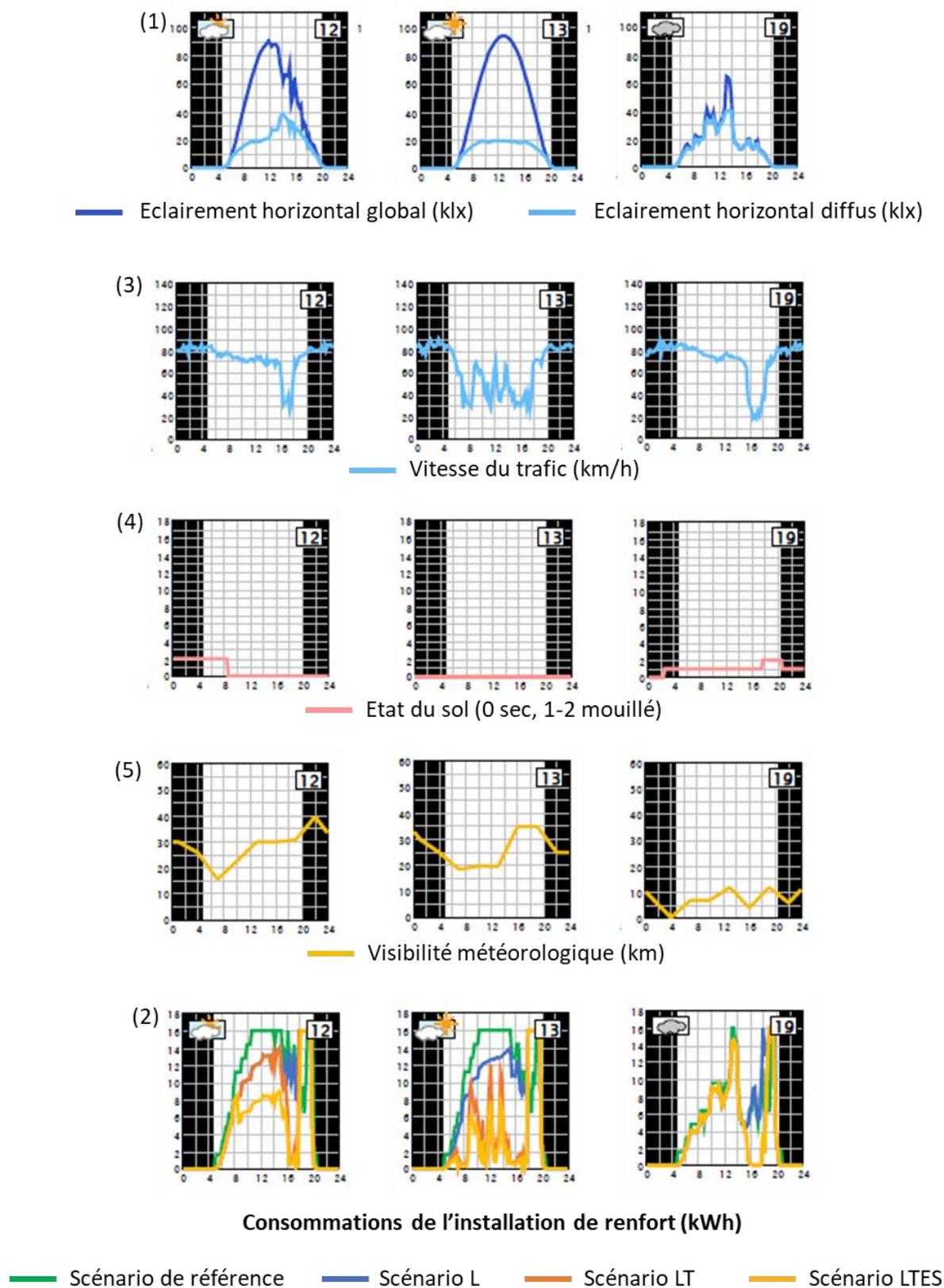


Figure 4-20 Exemples de tracés journaliers pour les journées du 12, 13 et 19 mai 2019. (1) Eclairages horizontaux globaux et diffus (klx) ; (2) Consommations de l'installation de renfort (kWh) ; (3) Vitesse de trafic (km/h) ; (4) Etat du sol ; (5) Visibilité météorologique (km). L'axe des abscisses désigne l'heure d'hiver.

L'analyse de la Figure 4-20 permet de mieux comprendre les synergies entre les différentes variables passées en paramètre de l'algorithme et les niveaux de luminance à mettre en œuvre à l'intérieur du tunnel (ou les consommations de l'installation de renfort). Les résultats présentés portent sur les journées du dimanche 12 mai, du lundi 13 mai et du dimanche 19 mai 2019. Les journées du 12 et du 13 sont ensoleillées, tandis que la journée du 19 présente un ciel couvert. On constate tout d'abord que les différences de consommations énergétiques de l'installation de renfort entre le scénario de référence et le scénario L sont plus importantes sur les journées ensoleillées. En analysant ensuite les journées du 12 et du 13 mai qui présentent globalement les mêmes conditions d'ensoleillement, on remarque que les scénarios L et LT présentent les mêmes consommations énergétiques pour l'installation de renfort avant 16h le 12 mai. En comparaison, sur la journée du 13, les consommations simulées pour le scénario LT sont moindres que celles du scénario L. Cette différence de profil entre les deux journées est bien corrélée avec les écarts de vitesse constatés entre les deux journées : On n'a aucun écart le dimanche avant 16h entre les scénarios L et LT du fait que la vitesse enregistrée aux abords de l'ouvrage est proche de la vitesse limite autorisée (absence de congestion le week-end). En revanche, les consommations du scénario LT sont plus faibles que celles du scénario L le lundi quand le tunnel est sujet à des phénomènes de congestion toute la journée et que la vitesse enregistrée est plus faible que la vitesse limite autorisée. Ces consommations plus faibles sont dues au fait que les distances d'arrêt calculées à partir de vitesses inférieures à 70 km/h, sont plus courtes que la distance d'arrêt de dimensionnement, ce qui implique que la zone d'entrée sera plus courte et que les luminances de voile évaluées seront moins impactées par le ciel. L'asservissement à la vitesse semble donc donner des résultats cohérents. En considérant ensuite les journées du 12 et du 19 mai, qui présentent des conditions de trafic similaires, mais des conditions climatiques différentes, on constate à nouveau des écarts plus ou moins importants entre tous les scénarios testés. En comparant notamment les scénarios LT et LTES, on remarque des écarts visibles sur la journée du 12 mai en termes de consommations énergétiques de l'installation de renfort, tandis que ces écarts sont inexistantes sur la journée du 19 mai. Ce résultat s'explique par le fait que la chaussée est sèche le 12 mai sur la majorité de la journée, tandis qu'elle est mouillée sur toute la journée du 19. Ainsi, le calcul de la distance d'arrêt le 19 se fera sur une chaussée mouillée, comme pour tous les autres scénarios d'étude, tandis qu'il se fera sur une chaussée sèche le 12 : la distance d'arrêt ainsi obtenue sera donc plus faible que celle calculée pour les autres scénarios, ce qui impactera directement le profil de luminance mis en place dans le tunnel (zone d'entrée plus courte et luminance de voile vraisemblablement plus faible du fait que son évaluation se fait plus proche du portail d'entrée et que le cône de vision pris en compte considère donc une zone de ciel plus restreinte).

Les résultats obtenus s'expliquent donc plutôt bien en considérant les conditions d'éclairage naturel, la vitesse de trafic, l'état du sol, ainsi que les conditions de visibilité météorologiques. Quelques consommations isolées a priori anormalement élevées (voir Figure 4-19) ont été repérées le matin. Il s'est en fait avéré qu'elles étaient dues à des conditions de brouillard (V_m faible). Ces dernières conduisent à des valeurs de luminance de voile d'atmosphère très

élevées (voir équation [4-8] (luminance de voile d'atmosphère)), et donc à un besoin en luminance de chaussée également important. Aucune autre donnée aberrante inexplicable n'a été recensée.

Traitement des résultats

Les résultats obtenus pour les 4 scénarios en termes de consommations énergétiques pour l'installation de renfort ont ensuite été traités, ils sont présentés en Figure 4-21 et en Figure 4-22.

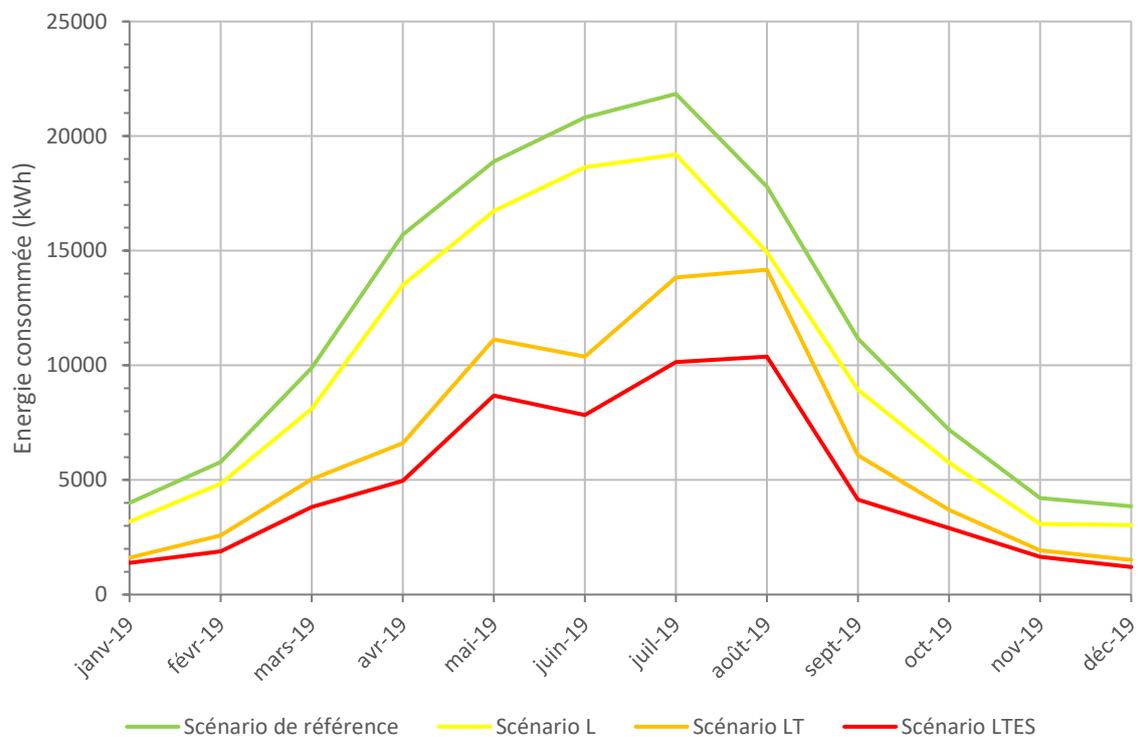


Figure 4-21 Consommations énergétiques mensuelles calculées pour l'installation de renfort sur les différents scénarios d'étude

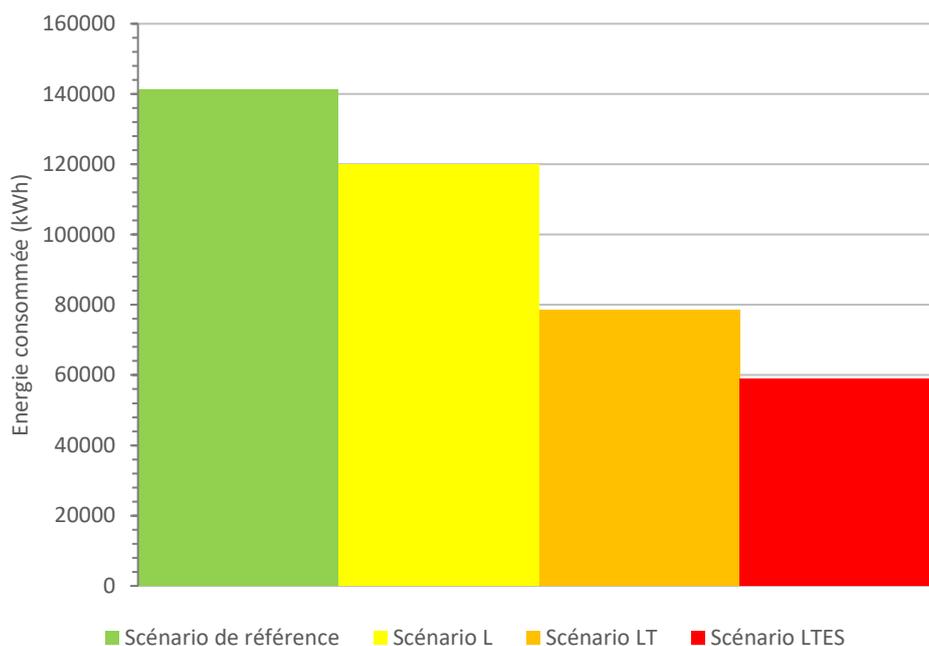


Figure 4-22 Consommations énergétiques annuelles calculées pour l'installation de renfort sur les différents scénarios d'étude

Les écarts de consommations énergétiques entre les différents scénarios testés sont présentés en Tableau 4-5 pour l'installation de renfort.

Tableau 4-5 Résumé des écarts de consommations annuelles entre les différents scénarios d'étude pour l'installation de renfort

Scénarios	Consommations énergétiques annuelles (kWh)	Ecart par rapport à la référence	Ecart par rapport au scénario précédent
Référence	141100		
Scénario L	119932	-15.0%	-15.0%
Scénario LT	78569	-44.3%	-34.5%
Scénario LTES	58991	-58.2%	-24.9%

Les résultats présentés ci-dessus ne tiennent compte que de l'installation de renfort. Le Tableau 4-6 donne les écarts de consommations énergétiques mesurés pour la totalité de l'installation d'éclairage.

Tableau 4-6 Consommations énergétiques annuelles totales et écarts de consommations entre les différents scénarios d'étude

Scénarios	Consommations énergétiques renfort (kWh)	Consommations énergétiques base (kWh)	Ecart total par rapport à la référence (kWh)	Part du renfort dans l'écart total	Part de la base dans l'écart total
Référence	141100	27071			
Scénario L	119932	19066	29173	72.6%	27.4%
Scénario LT	78569	19066	70536	88.7%	11.3%
Scénario LTES	58991	19066	90114	91.1%	8.9%

A partir des résultats de la Figure 4-21 on peut déduire que les écarts de consommations énergétiques mensuelles sont compris entre 10 et 27 % entre le scénario de référence et le scénario L pour l'installation de renfort. Ces pourcentages sont plus élevés pour les mois de septembre à janvier, du fait que les valeurs de consommations pour le scénario de référence sont plus faibles pendant cette période que durant les mois d'été. L'écart annuel entre ces deux scénarios est de 15%. Ainsi, en réalisant un asservissement parfait aux conditions de luminosité extérieure (c'est-à-dire en effectuant un calcul de dimensionnement pour chaque quart d'heure), on pourrait vraisemblablement économiser 15% de consommations énergétiques par rapport aux règles de pilotage actuellement conseillées par le CETU.

Les écarts mensuels entre le scénario L et le scénario LT sont compris entre 5 et 51%. Les valeurs oscillent entre 30% et 50% d'économies d'énergie pour tous les mois de l'année, exception faite du mois d'août pour lequel on a seulement une baisse de 5% entre les deux scénarios. Les gains annuels entre le scénario L et le scénario LT sont de 34.5%. Ce gain énergétique est donc uniquement imputable à l'asservissement de l'installation de renfort à la vitesse de trafic. Il apparaît ainsi que la mise en place d'un système d'asservissement à la vitesse pour des tunnels sujets à des congestions récurrentes permettrait de réaliser des économies d'énergie importantes. Les gains cumulés d'un asservissement parfait à la luminance et à la vitesse (comparaison des consommations énergétiques du scénario de référence et du scénario LT) sont de 44.3% dans le cas de notre étude.

La comparaison des scénarios LT et LTES montre des gains énergétiques potentiels de 24.9% pour l'installation de renfort. Ce gain énergétique est associé à l'asservissement de cette dernière aux conditions de sol. Comme mentionné précédemment, le dimensionnement de l'installation dépend fortement de la vitesse de trafic, cependant ce paramètre n'entre pas directement en ligne de compte dans les calculs menés : c'est la distance d'arrêt qui est utilisée. Cette dernière est évidemment liée à la vitesse des véhicules approchant le tunnel, d'où l'impact de celle-ci sur les niveaux lumineux à mettre en place en renfort, mais elle dépend aussi de l'état de la chaussée, et plus particulièrement de son caractère sec ou mouillé. Les calculs de dimensionnement se doivent de prendre en compte les situations les plus

défavorables afin de parer à toute éventualité : le calcul de la distance d'arrêt de référence est donc toujours fait pour une chaussée mouillée. Cependant, en cas d'asservissement de l'installation de renfort aux conditions d'état de sol (et donc de chaussée), il est possible d'adapter les coefficients de friction pris en compte dans l'équation [4-1] (distance d'arrêt) et de calculer le besoin réel pour une chaussée sèche au lieu d'une chaussée mouillée. Cet aspect a rarement été traité (à notre connaissance) dans les études portant sur les méthodes de pilotage des installations d'éclairage en tunnel. Carni en fait mention dans un article (Carni et al. 2013), mais sans proposer d'ordre de grandeur en termes d'économie d'énergie possibles. Au vu des résultats obtenus à l'aide du modèle dynamique, il apparaît que la prise en compte de ce paramètre pourrait permettre de réaliser des économies d'énergie non négligeables.

En considérant maintenant l'installation de base, la mise en place d'un régime unique basé sur les résultats de l'expérience psycho-visuelle présentée en section 2.3.6.2 **Application à l'éclairage de section courante**, pourrait permettre de réaliser des économies d'énergie par rapport aux règles actuellement utilisées (régime jour / régime nuit). Ces économies d'énergie sont relativement importantes puisqu'elles constituent 27.4% des économies totales entre le scénario de référence et le scénario L.

4.3.2.3 Qualité de l'éclairage

Pour finir, les uniformités générales et longitudinales ont été évaluées pour chacun des scénarios présentés ci-dessus, selon la méthode présentée en section 4.2.4.3 **Algorithme de calcul**. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4-23, dans la Figure 4-24 et dans le Tableau 4-7.

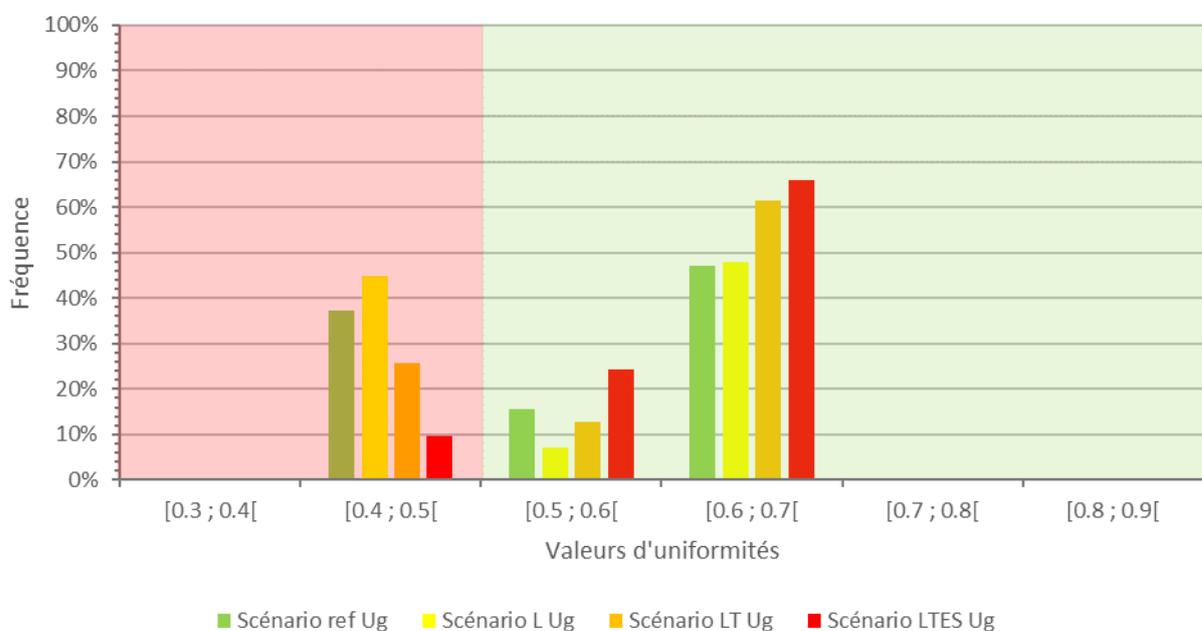


Figure 4-23 Répartition des valeurs d'uniformité générale pour tous les quarts d'heure de l'année 2019 (le rectangle rouge indique des valeurs inférieures aux recommandations CETU, tandis que le rectangle vert indique des valeurs supérieures)

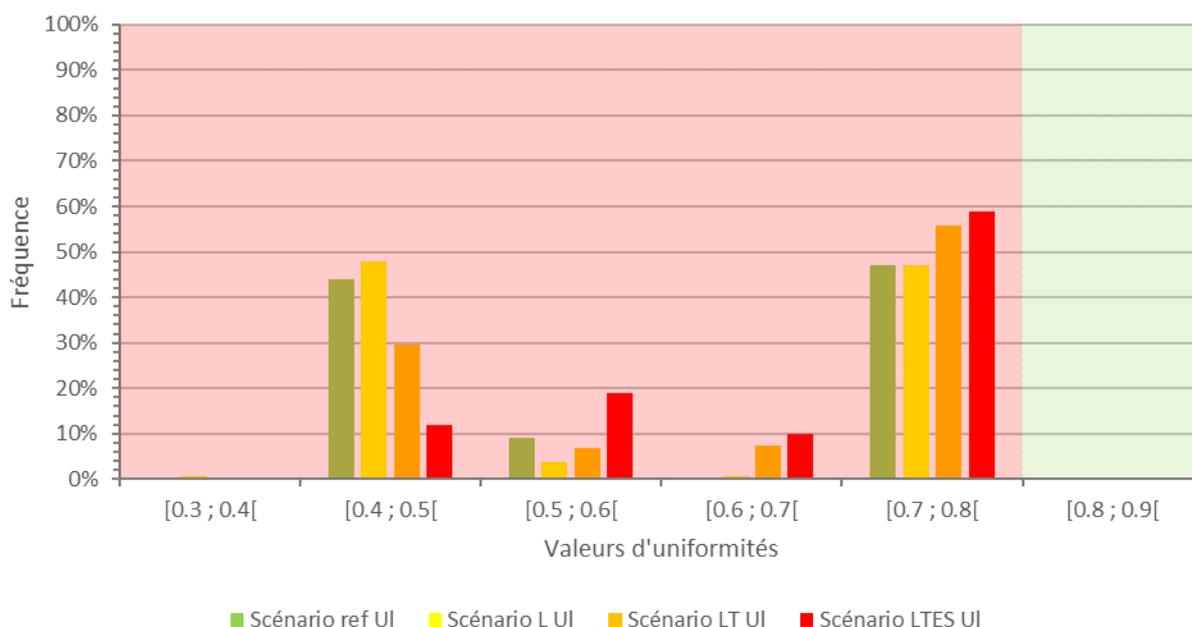


Figure 4-24 Répartition des valeurs d'uniformité longitudinale pour tous les quarts d'heure de l'année 2019 (le rectangle rouge indique des valeurs inférieures aux recommandations CETU, tandis que le rectangle vert indique des valeurs supérieures)

Tableau 4-7 Uniformités générales et longitudinales minimales, moyennes et maximales pour les 4 scénarios d'étude

Scénarios	Uniformité générale				Uniformité longitudinale			
	Régime nuit	Minimum	Moyenne (Ecart-Type)	Maximum	Régime nuit	Minimum	Moyenne (Ecart-Type)	Maximum
Référence	0.69	0.47	0.58 (ET=0.10)	0.69	0.74	0.43	0.59 (ET=0.14)	0.74
Scénario L	0.69	0.41	0.58 (ET=0.10)	0.69	0.74	0.37	0.58 (ET=0.15)	0.74
Scénario LT	0.69	0.41	0.61 (ET=0.09)	0.69	0.74	0.36	0.63 (ET=0.14)	0.78
Scénario LTES	0.69	0.41	0.63 (ET=0.08)	0.69	0.74	0.36	0.66 (ET=0.11)	0.78

Les zones rouges sur les graphiques indiquent des valeurs inférieures à celles recommandées par le CETU.

Les uniformités générales et longitudinales ont été évaluées pour chacun des scénarios, selon la méthode présentée en section 4.2.4.3 **Algorithme de calcul**. Les valeurs recommandées par le CETU pour ces grandeurs sont rappelées dans le Tableau 4-8, elles sont également présentées en **annexe C : Critères complémentaires pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage**.

Tableau 4-8 Recommandations CETU pour les uniformités générale et longitudinale pour les luminances de chaussée

Uniformité générale	≥ 0.5
Uniformité longitudinale	≥ 0.8

Pour l'uniformité générale, les résultats montrent que 62.6% des quarts d'heure évalués sur l'année 2019 présentent une uniformité générale supérieure ou égale à 0.5 pour le scénario de référence, 55.1% pour le scénario L, 74.2% pour le scénario LT et 90.3% pour le scénario LTES.

Pour l'uniformité longitudinale, les valeurs sont toujours inférieures à celles recommandées par le CETU. Néanmoins, les scénarios LT et LTES présentent des valeurs moyennes (respectivement 0.63 et 0.66) sur l'année 2019 sensiblement plus élevées que celles des scénarios de référence et L (respectivement 0.59 et 0.58).

4.3.3 Discussion

Cette section cherche à analyser et expliquer les résultats présentés dans la partie précédente.

4.3.3.1 Consommations énergétiques

Les scénarios tests sont évidemment des scénarios théoriques idéaux puisqu'un dimensionnement est réalisé pour chaque condition évaluée (tous les quarts d'heure). Ils ne permettent donc pas de mettre en place des profils de décroissance préétablis comme le fait le scénario de référence. Bien que le modèle dynamique se base sur les règles de dimensionnement dérivées de la méthode L_{seq} , l'objectif est ici de déterminer un ordre de grandeur d'économie d'énergie imputable aux différents asservissements mis en place. Comme les procédés d'évaluation des luminances de voile restent relativement similaires d'une méthode de dimensionnement à l'autre, l'ordre de grandeur ainsi obtenu est vraisemblablement transposable pour les autres méthodes présentées dans le **chapitre 1 : Méthodes de dimensionnement**.

Les économies annuelles constatées entre le scénario de référence et le scénario L sont non négligeables (15%), mais la mise en place des règles de pilotage adéquates pour les obtenir apporterait de la complexité dans l'installation. En effet, la plupart des automates de pilotage des installations d'éclairage en tunnel se basent actuellement sur des scénarios préétablis et codés dans l'appareil. Le postulat du scénario L est de refaire un dimensionnement du besoin chaque quart d'heure à partir des valeurs de luminances de voile L_{seq} mesurées. En pratique, cela signifie que le scénario L ne s'appuie pas sur un nombre fini de scénarios d'éclairage, et que l'automate doit donc être capable de gérer lui-même le calcul de dimensionnement chaque quart d'heure. Il convient de déterminer si les économies apportées contrebalancent

cette complexité afin de statuer sur l'évolution potentielle des règles de pilotage vis-à-vis des conditions de luminosité extérieure.

En ce qui concerne la comparaison des scénarios L et LT, l'analyse des conditions de trafic en août montre que ce mois est très peu sujet aux congestions (probablement du fait des vacances prises par de nombreuses personnes réalisant habituellement des déplacements domicile-travail) : la vitesse est donc proche de la vitesse limite et l'asservissement ne permet pas de modifier l'éclairage de l'installation de renfort pour ce mois-ci. La Figure 4-25 présente la vitesse de trafic médiane de chaque quart d'heure de la journée pour un mois donné, durant les jours de semaine (samedi et dimanche sont exclus). Les données montrent bien des congestions journalières correspondant aux horaires de départ ou de retour du travail les jours de semaine pour tous les mois de l'année, excepté pour le mois d'août.

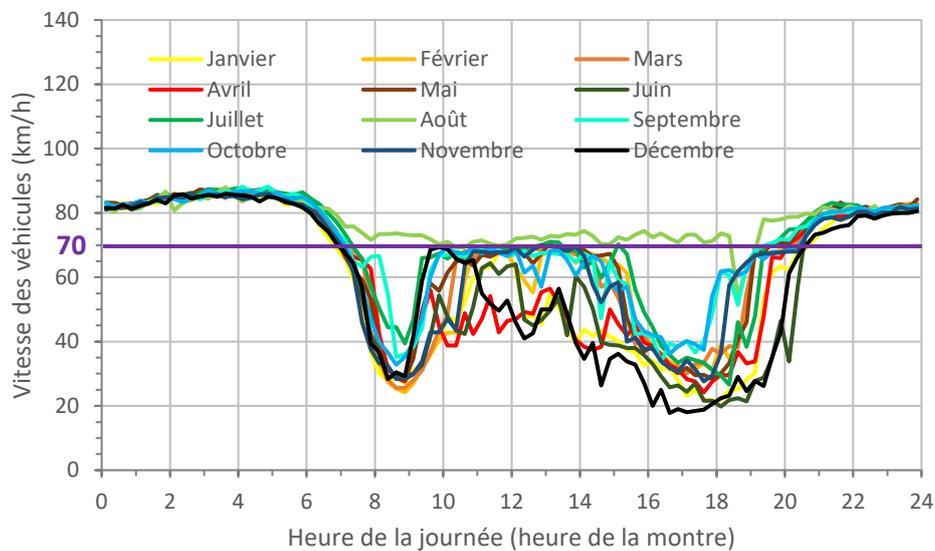


Figure 4-25 Médianes mensuelles des vitesses de véhicules pour les jours de la semaine sur l'année 2019 (les samedis et dimanches sont exclus)

On peut confronter les gains cumulés d'un asservissement parfait à la luminance et à la vitesse pour notre étude (44.3%) avec ceux obtenus par d'autres auteurs dans le cadre de l'étude de l'impact du contrôle de l'installation d'éclairage sur les consommations énergétiques. Certaines de ces études ont été menées par simulation, comme c'est le cas du travail présenté ci-dessus (Shuguang 2015; Salata et al. 2016; J. Zhao, Feng, et Yang 2021), tandis que d'autres ont été mises en place directement sur le terrain (Zeng et al. 2011). Nous nous intéresserons ici uniquement aux études asservissant l'installation de renfort d'éclairage à la fois aux conditions de luminosité extérieure et aux conditions de vitesse de trafic. Les résultats obtenus ont montré des gains énergétiques de l'ordre de 20 à 35% pour les études par simulation (Shuguang 2015; J. Zhao, Feng, et Yang 2021). Les différences mesurées sont moins conséquentes que celles obtenues dans notre cas (44.3%). Cet écart peut en partie s'expliquer par le fait que le modèle dynamique présenté ci-dessus offre un asservissement parfait aux

conditions de luminosité extérieure et de vitesse de trafic, ce qui signifie que les résultats obtenus en termes d'économies d'énergie constituent une limite haute. Les travaux de simulations menés par Shuguang et Zhao se basent plutôt sur des scénarios prédéfinis et des paliers de niveaux de luminance, ce qui les rend plus facile à mettre en œuvre en conditions réelles, mais ce qui réduit les économies d'énergie offertes.

La Figure 4-26 présente le nombre de quart d'heure par mois pour lesquels on a des conditions de chaussée sèche et de chaussée mouillée. On constate un nombre beaucoup plus important de quarts d'heure de chaussée sèche sur les mois d'avril à septembre. Cependant les écarts entre les scénarios LT et LTES se font principalement sentir sur les mois de juillet et d'août. Deux raisons expliquent cela : premièrement, le dimensionnement pour chaussée mouillée perd de son sens en été puisque le sol est sec la plupart du temps (voir Figure 4-26) ; deuxièmement, les vitesses de trafic sont globalement plus élevées du fait que les congestions sont moins présentes en juillet et en août, et l'écart de distance d'arrêt entre chaussée mouillée et chaussée sèche est d'autant plus important que la vitesse de référence prise en compte dans le calcul est élevée.

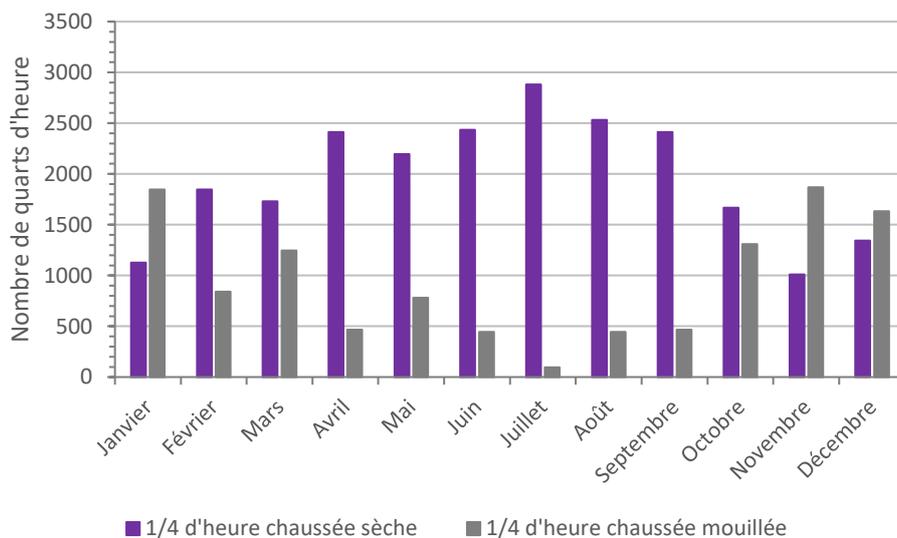


Figure 4-26 Répartition des quarts d'heure de chaque mois en conditions de chaussée sèche ou de chaussée mouillée

Le résultat obtenu en considérant l'installation de base (27.4% des économies d'énergie totales entre le scénario de référence et le scénario L) doit être considéré prudemment. En effet, les données collectées avec l'expérience psycho-visuelle ont été obtenues en laboratoire et des tests supplémentaires seraient probablement nécessaires avant de les implémenter en tunnel. Ces résultats s'appuient sur un panel d'observateurs jeunes (moins de 30 ans) qui n'est pas représentatif de la population pouvant circuler en tunnels routiers, les niveaux lumineux obtenus devraient donc être probablement modifiés par un facteur correctif lié à l'âge pris en compte pour le conducteur de référence. Enfin, le régime jour / nuit utilisé par le CETU est généralement complété par un régime nuit réduit qui permet de baisser

les niveaux de luminance pendant les périodes de « creux » en termes de trafic pour certains tunnels (généralement une plage d'horaires comprise entre 22h et 4 h) et qui n'est pas pris en compte ici dans notre scénario de référence. Toutes ces constatations, associées au fait qu'une fois les 3 asservissements mis en place, les économies d'énergie obtenues grâce au pilotage de l'installation de base ne représentent plus que 8.9% des économies totales par rapport au scénario de référence, permettent d'affirmer que le potentiel de gains énergétiques pour l'installation de renfort est bien plus intéressant et plus prometteur que celui de l'installation de base.

En ce qui concerne la mise en œuvre pratique de ces asservissements, l'utilisation de radars, de capteurs de trafic ou d'autres dispositifs (Shuguang 2015; Zeng et al. 2011; J. Zhao, Feng, et Yang 2021) est envisageable, et a déjà été réalisée dans des études précédentes. Pour ce qui est de l'asservissement à l'état du sol, plusieurs méthodes ont été étudiées (Misener 1998; Sillion et Fosslau 2014a; 2014b). Ce genre d'asservissement n'a encore jamais été mis en place, mais il existe des systèmes relativement compacts basés sur la détection de réflexions infrarouges qui pourraient être utilisés dans ce but.

4.3.3.2 Qualité de l'éclairage

En ce qui concerne la pénétration de la lumière naturelle à l'intérieur de l'ouvrage, on a pu constater que les facteurs de lumière du jour moyens calculés sur les zones de calcul de la chaussée deviennent très faibles à partir de 15 mètres à l'intérieur de la tranchée couverte d'Antony. La règle actuellement utilisée par le CETU pour le dimensionnement de l'installation de renfort est de ne pas renforcer l'éclairage sur une distance égale à la plus grande diagonale du profil en travers intérieur du tunnel. Dans notre cas d'étude, cela signifie que les luminaires de l'installation de renfort ne commencent à éclairer qu'à partir de 17.6 m à l'intérieur du tunnel. La Figure 4-18 nous montre donc que nous sommes dans la catégorie des facteurs de lumière du jour « très faibles » depuis 3 m avant de commencer à éclairer. En analysant également les profils de décroissance présentés en Figure 4-16, et ceux établis pour les journées tests prises en compte, on s'aperçoit que, exception faite des profils de luminance établis le matin, on a une zone de mauvaise visibilité en entrée de tunnel pour laquelle on n'a pas d'éclairage de renfort et la lumière naturelle ne suffit pas à assurer le besoin en termes de luminance de chaussée. Ce travail de simulation semble donc remettre en question le choix de la position du début de la zone de renforcement.

En ce qui concerne les résultats obtenus pour les calculs d'uniformité longitudinale qui sont tous inférieurs aux valeurs recommandées par le CETU, il est à noter que l'évaluation de l'uniformité longitudinale se fait dans la zone de renfort dans notre cas d'étude. Cela signifie que cette évaluation va tenir compte de la décroissance des niveaux de luminance inhérente aux règles de dimensionnement de la CIE. On peut illustrer cela sur la Figure 4-27 prise en exemple.

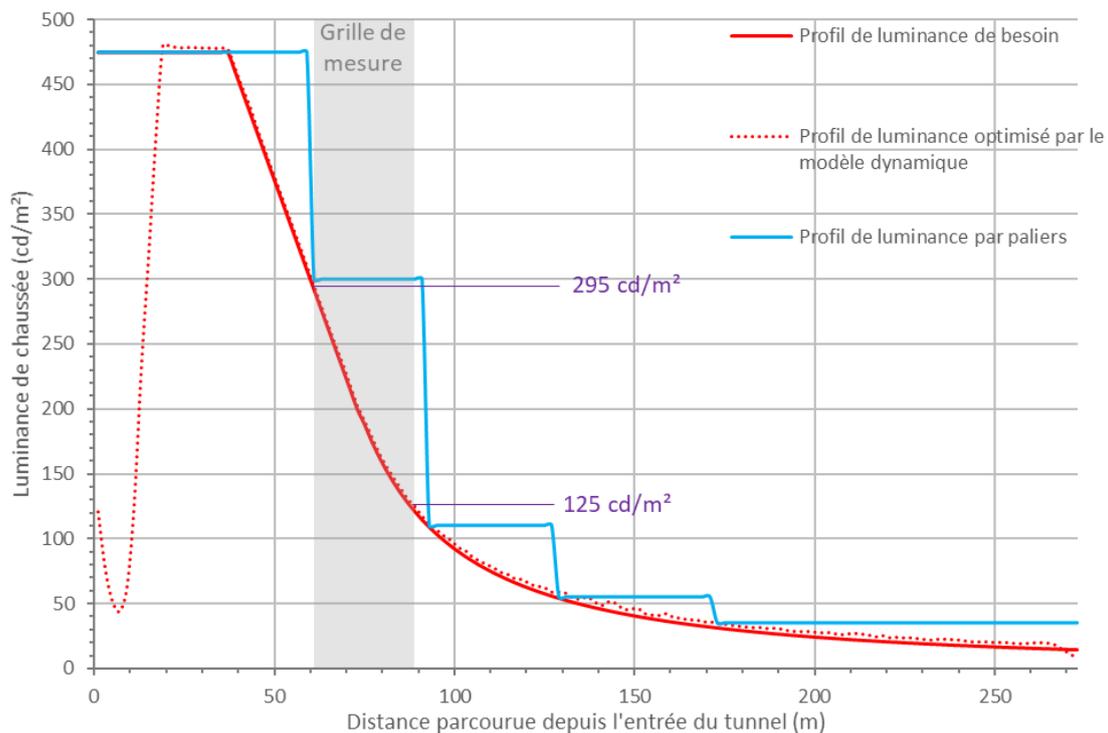


Figure 4-27 Comparaison de profil de luminance optimisé par le modèle dynamique et d'un profil par paliers. La grille d'uniformité utilisée pour le calcul des uniformités générale et longitudinale est représentée. Les nombres violets donnent la luminance théorique du premier et du dernier point de la grille.

Comme on peut le voir, la décroissance imposée en zone d'entrée va venir dégrader l'uniformité longitudinale. En effet, si on s'intéresse maintenant aux valeurs de luminance modélisées sur la chaussée pour l'installation d'éclairage, la première rangée de points de la grille d'uniformité est censée être à une luminance de chaussée de 295 cd/m², tandis que la dernière rangée est censée être à 125 cd/m². Comme l'uniformité longitudinale est le rapport de la luminance maximum sur la luminance minimum sur un axe longitudinal voir équation [4-37] (uniformité longitudinale), l'uniformité théorique ici ne pourrait pas excéder 0.42, ce qui ne respecte pas les recommandations du CETU. La mise en œuvre de courbes de décroissance réelles très proches des courbes de besoin pose donc un problème en termes de valeurs d'uniformité longitudinale et ne permet pas d'atteindre les niveaux actuellement recommandés par le dossier pilote du CETU. Ainsi, les scénarios LT et LTES donnent de meilleurs résultats en termes d'uniformité principalement parce que les besoins de luminance au niveau du début et de la fin de la grille d'uniformité sont plus proches l'un de l'autre (car les courbes de besoin sont globalement plus écrasées pour ces scénarios), l'uniformité longitudinale théorique est donc déjà plus élevée que celle des scénarios de référence et L. La solution pour améliorer la valeur d'uniformité longitudinale serait de réaliser une décroissance par paliers comme le montre le profil bleu sur le graphique ci-dessus. Cette méthode de dimensionnement était celle utilisée au début des années 2000 par le CETU, c'est-à-dire au moment où les recommandations en uniformité longitudinale ont été éditées. Cette

méthode est cependant beaucoup plus énergivore puisqu'on s'adapte très peu à la courbe de besoins réels. Ces résultats mettent en évidence le fait que l'évaluation de l'uniformité longitudinale telle qu'elle est actuellement réalisée n'est pas adaptée à l'application stricte de la courbe de besoin pour l'installation de renfort (sans palier). Il convient donc de repenser la pertinence de l'évaluation de l'uniformité longitudinale en zone de renfort, ou tout du moins d'adapter la méthode de calcul employée.

On peut également noter que l'uniformité longitudinale modélisée pour le régime nuit, c'est-à-dire avec seulement l'installation de base allumée, est également trop faible par rapport aux recommandations du CETU (0.74 au lieu de 0.8). Elle est cependant beaucoup plus proche de la valeur cible que l'uniformité longitudinale mesurée lorsque l'installation de renfort est allumée. Enfin, il convient également de tenir compte du fait que les niveaux de luminance étant modélisés, le bruit obtenu sur le rendu de simulation peut impacter ces valeurs d'uniformités si la luminance d'un pixel est anormalement faible ou élevée.

4.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, un modèle dynamique a été développé afin de reproduire les conditions d'exploitation d'un tunnel routier, tout en développant une méthode d'éclairage adaptatif visant à réduire les consommations énergétiques de ces ouvrages. La tranchée couverte d'Antony, et plus particulièrement le tube non exploité utilisé dans le cadre du projet DELTA, a été retenu pour la modélisation. Des données d'éclairage naturel ont été collectées pour l'année 2019. Elles sont issues des estimations satellitaires Helioclim 3 associées aux modèles de Pérez (Perez et al. 1990), qui permettent de définir la luminance de chacune des 145 zones de ciel, ainsi que l'éclairement lumineux horizontal au niveau du sol. Des données de trafic issues de stations de comptage exploitées par la DiRIF ont été utilisées. Des données de 2019 et 2020 ont été agrégées afin de reconstituer une année typique complète. Enfin, des données météorologiques de visibilité et d'état du sol ont été récupérées à partir de la station SYNOP du site d'Orly. Un algorithme de calcul a été développé afin d'assurer le pilotage de l'installation d'éclairage du tunnel modélisé en fonction de toutes ces données. Cet algorithme se base sur la méthode de dimensionnement L_{seq} car la méthode CETU l'aurait grandement complexifié et aurait certainement abouti à des temps de calcul très long. Le modèle dynamique a ensuite été utilisé pour évaluer 4 scénarios différents. Le premier est un scénario de référence basé sur les règles de pilotage actuellement recommandées par le CETU pour des installations LEDs, le second est un scénario parfaitement asservi aux conditions de luminosité extérieure, le troisième est un scénario asservi aux conditions de luminosité et à la vitesse du trafic, et le dernier est asservi aux conditions de luminosité, à la vitesse du trafic et à l'état du sol (chaussée sèche ou mouillée). L'évaluation de ces scénarios a montré que l'algorithme permettait bien de produire des courbes de décroissance de luminance fournies par l'installation, qui respectaient les besoins établis par la méthode de dimensionnement. Des économies d'énergie potentielles ont été mises en exergue, de l'ordre de 15% pour

l'asservissement parfait aux conditions de luminosité extérieures, de 34.5% pour l'asservissement à la vitesse, et de 24.9% pour l'asservissement aux conditions d'état du sol. L'analyse de la pénétration de la lumière naturelle a montré que l'utilisation de la règle de dimensionnement actuellement recommandée par le CETU pour la position du début de la zone de renfort mène à l'apparition d'une zone de mauvaise visibilité en entrée de tunnel. Cette règle semble donc surestimer l'impact de la lumière naturelle et pourrait être amenée à être requestionnée sur d'autres cas d'étude afin de confirmer ou d'infirmer le résultat obtenu pour l'exemple de la tranchée couverte d'Antony. Dans ce cas d'étude particulier, la zone d'accès est relativement encaissée du fait que l'on a affaire à une tranchée couverte. Il serait donc intéressant de mener ce genre d'étude pour des tunnels présentant des zones d'accès non encaissée afin de voir si les mêmes résultats sont observés ou non. L'analyse des valeurs d'uniformités générale et longitudinale pour les différents scénarios a mis en évidence le fait que le passage d'une méthode de dimensionnement en paliers de décroissance, à la création d'une courbe continue suivant le besoin, ne permettait plus d'atteindre les valeurs cibles fixées par le CETU, notamment pour les valeurs d'uniformité longitudinale. Cette constatation pousse donc à s'interroger sur la pertinence de la méthode d'évaluation de l'uniformité longitudinale pour la zone de renfort. La grille de mesure actuellement utilisée pour cette évaluation, ainsi que la méthode de calcul associée, sont adaptées pour un éclairage urbain ou routier (niveaux de luminance constants) et peuvent donc être transposées pour une section courante de tunnel. En revanche, pour la zone de renfort dans laquelle les niveaux de luminance de chaussée décroissent continuellement, la grille ou la méthode de calcul doivent être repensées pour prendre en compte cette différence essentielle entre zone de renfort et section courante. Actuellement, le calcul de l'uniformité longitudinale tel qu'il est mené ne fait pas sens en zone de renfort.

Conclusion

L'état de l'art développé dans le premier chapitre de ce manuscrit a permis de retranscrire les règles de dimensionnement de base de l'éclairage des tunnels routiers. En retraçant l'origine de ces règles, il est apparu qu'elles se basent sur des expériences relativement anciennes et qu'elles ne tiennent donc pas nécessairement compte des évolutions technologiques du matériel, ni des découvertes récentes sur le système visuel humain. Ces constatations nous ont amené à penser que les caractéristiques intrinsèques des sources LEDs ne sont pas pleinement exploitées en vue de l'optimisation de l'éclairage des tunnels routiers à l'heure actuelle. Un des points d'optimisation possible mis en avant dans ce chapitre est le spectre des sources de lumière. En effet, l'impact de la vision mésopique ainsi que celui, potentiel, des CGRips mis en avant dans ce premier chapitre laissait à penser que la perception réelle des observateurs n'était pas forcément bien représentée dans les règles de dimensionnement. Une deuxième piste d'optimisation est la possibilité de gradation du flux lumineux des sources LEDs, et donc l'adaptabilité des niveaux de luminance de chaussée délivrés par l'installation aux besoins réels.

Afin d'investiguer l'impact du spectre sur la visibilité dans un premier temps, une expérience psycho-visuelle sur une maquette de tunnel a été montée. Ainsi, des observateurs ont été sollicités pour caractériser la visibilité d'une cible en fonction de différents spectres de lumière présentés. Les résultats de l'expérience ont montré que la mélanopsine n'a pas d'impact significatif sur la visibilité en champ de vision central pour les niveaux lumineux utilisés dans l'expérience (luminance de chaussée comprise entre 0 et approximativement 20 cd/m²). Cette absence d'impact est probablement dû au fait que le seuil d'excitation des CGRips mis en évidence par Dacey (Dacey et al. 2005) a été à peine atteint sur les derniers seuils de visibilité de l'expérience. Les températures de couleur, quant à elles, ont un impact significatif sur les performances visuelles en champ de vision central pour des niveaux de luminance de chaussée inférieurs à 1 cd/m² : plus la température de couleur est basse, meilleures sont les performances visuelles des observateurs. Selon nous, ce résultat s'explique par le fait que les températures de couleur plus élevées que nous avons utilisées résultent en une exposition des cônes S bien plus importantes. L'augmentation des signaux issus des cônes S résulte en une diminution des signaux des cônes M et L, et donc de la luminance perçue par l'observateur. Dans un second temps, la comparaison des résultats obtenus avec les règles de dimensionnement actuelles a permis de mettre en évidence le fait que certains niveaux pour l'éclairage nocturne semblent trop faibles pour assurer une visibilité optimale aux conducteurs. En parallèle, certains niveaux mis en place en section courante en journée par le CEN et la CIE sont au-delà du seuil de luminance pour le plateau de visibilité trouvé durant l'expérience, ce qui laisse à penser que ces niveaux sont probablement surdimensionnés. Les résultats obtenus sont plutôt en accord avec les recommandations CETU pour l'éclairage diurne. Enfin, les économies d'énergie envisageables en utilisant des températures de couleur plus faibles pour les niveaux les plus bas mis en œuvre ont été confrontées à la baisse

d'efficacité lumineuse intrinsèque à la technologie. Les résultats obtenus montrent que les gains possibles ne suffisent pas à contrebalancer les pertes liées à cette baisse d'efficacité. Au regard de tous ces éléments, une température de couleur de 4000 K semble être idéale pour les luminaires en tunnel pour l'installation de base puisqu'ils présenteraient alors une bonne efficacité lumineuse tout en limitant les écarts chromatiques avec une route d'accès éclairée en 3000 K ou moins la nuit.

Le chapitre 2 nous a ainsi permis de caractériser l'impact du spectre des sources sur la visibilité. Cependant, de très nombreux autres paramètres associés aux caractéristiques des LEDs peuvent avoir une influence sur la visibilité, le confort, les consommations énergétiques, ... La caractérisation de ces impacts de manière expérimentale, comme nous avons pu le faire avec l'expérience psycho-visuelle, est optimale puisqu'elle se base directement sur des conditions réelles, mais elle est extrêmement chronophage et nécessite des sites d'expérimentations. Ainsi, afin de faciliter la prise en compte de ces impacts, nous avons décidé de travailler sous un environnement de simulation. L'expérience sur maquette portant sur l'éclairage de section courante, il a été décidé d'orienter cette phase de simulation plutôt sur la zone d'entrée. L'objectif final de cette étape a été de développer un modèle dynamique permettant de reconstituer un tunnel dans son intégralité, ainsi que sa zone d'accès. Le modèle permet de produire une simulation de l'éclairage pour ce tunnel sur un an, en tenant compte notamment des conditions climatiques et de trafic pour l'ouvrage considéré. Le chapitre 3 présente le calage de ce modèle numérique, qui s'est décomposé en deux étapes distinctes. Dans un premier temps, des mesures sur la maquette de tunnel utilisée pour l'expérience psycho-visuelle ont été réalisées : elles se sont concentrées sur le flux des luminaires, les propriétés de réflexion des surfaces, les luminances de chaussée et de piédroit, ainsi que sur les éclairagements de chaussée. Les propriétés de réflexion des surfaces ont fait l'objet de 3 mesures distinctes qui ont pu être exploitées séparément dans la simulation : une mesure de BRDF lambertienne, une mesure de BRDF en intensité, et une mesure de BRDF spectrale. Les différents résultats obtenus par simulation sous OCEAN (logiciel de lancer de rayons retenu pour la création du modèle dynamique) ont ainsi pu être comparés aux données mesurées. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation des mesures de BRDF spectrale en données d'entrée de la simulation donne les résultats les plus proches de la réalité. Cependant, les valeurs de luminance de chaussée ainsi obtenues sont surestimées par rapport aux données réelles, ce qui pourrait être dangereux dans le cas d'un dimensionnement de tunnel puisque les niveaux lumineux réellement mis en œuvre ne permettraient pas de couvrir le besoin. Dans un second temps, la validation du modèle a porté sur la prise en compte du climat, de l'éclairement naturel et des luminances de voile en zone d'accès. Son développement a permis de modéliser toutes les 15 minutes les variations de luminance de voile au niveau d'un site choisi (dans notre cas la tranchée couverte du Noiret). Le modèle permet ainsi de tenir compte des variations d'éclairage naturel en s'appuyant sur des luminances de ciel et des éclairagements lumineux dérivés d'estimation satellitaires, sur la géométrie du site, ainsi que sur les facteurs de réflexion des surfaces visibles par le conducteur. Tous ces éléments constituent des données d'entrée permettant de calculer la

luminance de voile au niveau du portail d'entrée du tunnel, toutes les 15 minutes (meilleure résolution temporelle atteignable pour les données d'éclairage naturel) sur n'importe quelle période de temps souhaitée. Les données ainsi obtenues par simulation ont ensuite été comparées à des valeurs de luminance de voile collectées sur le terrain. Ces comparaisons ont mis en exergue des écarts entre données simulées et données mesurées (rMBE de 44% et rRMSE de 466%) : des éléments d'explication ont donc été avancés en conclusion du chapitre 3, avec notamment l'usage d'un maillage de ciel trop grossier, l'utilisation de données de visibilité météorologique non valables pour le site, la difficulté à représenter les variations de luminance de voile les jours couverts, ou encore les différences entre hypothèses de simulation et réalité du terrain (géométrie, orientation de la scène, facteurs de réflexion des matériaux, ...). Des pistes d'amélioration ont été proposées dans un second temps pour réduire les écarts constatés (maillage de ciel plus fin pour les zones directement impactées par la course du soleil et fiabilisation autant que faire se peut des données terrain).

Une fois le calage du modèle finalisé, et les écarts qu'il présente avec la réalité caractérisés, le modèle dynamique en lui-même a pu être développé. L'objectif était de développer une méthode d'éclairage adaptatif visant à réduire les consommations énergétiques des tunnels. L'application du modèle dynamique a dû se réaliser sur un exemple de tunnel réel. Ce choix s'est porté sur le tube sud de la tranchée couverte d'Antony, utilisé dans le cadre du projet DELTA (Démonstrateur Eclairage LED du Tunnel d'Antony). Ce projet réunit de nombreux acteurs du monde des tunnels (bureaux d'étude, fabricants de luminaire, intégrateurs, ...) et vise à équiper le tube sud de la tranchée couverte d'Antony, actuellement non exploité, d'une installation d'éclairage LED expérimentale. L'objectif est de mener des expérimentations sur de nombreux aspects de l'éclairage LED en tunnel, notamment afin de déterminer si la doctrine éclairage du CETU doit être partiellement repensée pour les sources LEDs. Le choix du site pour la modélisation s'est donc fait assez naturellement, puisque les résultats obtenus pourront potentiellement être à terme confrontés à des données réelles collectées sur ce site expérimental. Ainsi, des données climatiques et de trafic ont été récupérées pour ce site sur une année complète. Un algorithme de calcul a ensuite été développé afin d'assurer le pilotage de l'installation d'éclairage en fonction de ces données. Il permet notamment de calculer la luminance de voile L_{seq} aux abords du portail d'entrée du tunnel, les consommations énergétiques de l'installation d'éclairage, ainsi que les valeurs d'uniformités de luminance sur la chaussée. Le modèle dynamique ainsi développé a été utilisé pour évaluer 4 scénarios de pilotage de l'installation d'éclairage différents : un scénario de référence se basant sur les règles de pilotage actuellement recommandées par le CETU, un scénario parfaitement asservi aux luminances de voile, un scénario asservi aux luminances de voile et aux conditions de trafic, et enfin un scénario asservi aux luminances de voile, aux conditions de trafic et à l'état de la chaussée (sèche ou mouillée). Les résultats obtenus ont montré que les profils de luminance simulés pour l'installation d'éclairage respectent bien le besoin établi par la méthode L_{seq} . De plus, des économies d'énergie potentielles ont été mises en exergue en comparant les évaluations des différents scénarios d'étude : de l'ordre de 15% pour l'asservissement parfait aux conditions de luminosité extérieure, de 34.5% pour

l'asservissement à la vitesse du trafic et de 24.9% pour l'asservissement aux conditions d'état du sol. Il est également à noter que l'analyse des résultats de simulation a permis de mettre en évidence des points de questionnement quant aux règles actuellement recommandées par les organismes. En effet, il est apparu que la distance de pénétration de la lumière naturelle à l'intérieur de l'ouvrage semble surestimée notamment dans la méthode CETU, ce qui implique l'apparition d'une zone de mauvaise visibilité trop étendue en entrée de tunnel du fait que l'éclairage naturel ne suffit pas à combler le besoin en luminance. Cette constatation a ici été faite pour un cas d'étude (tranchée couverte présentant une zone d'accès encaissée), il conviendrait d'augmenter l'échantillon de tunnels testés afin de déterminer si ce phénomène est marginal ou systématique. La règle actuellement utilisée par le CETU pour l'estimation de la pénétration de la lumière naturelle est toujours la même pour tous les tunnels. Il pourrait être intéressant de raisonner au cas par cas, puisque la pénétration de la lumière naturelle dépendra énormément de l'orientation de l'ouvrage, ainsi que de la topographie du terrain alentour. Pour ce faire, une étude de facteurs de lumière du jour pourrait être menée sur l'entrée du tunnel considéré, pour déterminer la distance à laquelle l'éclairage artificiel doit débuter (pour exemple, lorsque le facteur de lumière du jour devient inférieur à 2%).

De la même façon, le calcul des uniformités longitudinales en luminance a montré que la méthode d'évaluation actuellement utilisée n'est pas adaptée pour une décroissance continue du profil de luminance, et amène à des valeurs d'uniformités nécessairement trop faibles. Cette méthode d'évaluation doit donc être repensée si on souhaite exploiter le potentiel des LEDs en termes de gradation du flux lumineux des sources en calant le profil de décroissance de luminance réel dans le tunnel au plus près du besoin.

Les résultats obtenus tout au long de ce travail de thèse constituent une base intéressante pour le projet DELTA. Les scénarios évalués avec le modèle dynamique pourront notamment être mis en œuvre à terme directement sur site. Les résultats ainsi obtenus pourront être comparés à ceux collectés lors de la phase finale du modèle dynamique. Il serait également intéressant de modéliser les luminances de voile au niveau du site d'Antony en prenant en compte les pistes d'amélioration identifiées à la fin du chapitre 3 (avec notamment l'utilisation d'un maillage de ciel plus fin), et de les confronter à des données réelles mesurées sur site (mise en place de CAMEL sur le site expérimental). L'objectif étant de voir si ces pistes permettent de diminuer les écarts entre luminances de voile simulées et mesurées que nous avons constatés pour la tranchée couverte du Noiret. L'analyse des résultats de simulation du modèle dynamique a également permis de mettre en lumière des pistes de recherche intéressantes pour la doctrine CETU, et notamment des questionnements quant à certaines règles établies (pénétration de la lumière naturelle dans les ouvrages, évaluation de l'uniformité longitudinale en zone de renforcement, ...). La poursuite du projet DELTA va finalement permettre d'ancrer un peu plus dans le réel certaines thématiques développées dans ce travail de thèse, et de donner une perspective critique sur l'applicabilité des résultats de simulation en conditions réelles.

Bibliographie

- Adrian, W. 1976. « Method of Calculating the Required Luminances in Tunnel Entrances ». *Lighting Research & Technology* 8 (2): 103- 6. <https://doi.org/10.1177/14771535760080020401>.
- Adrian, W. 1982. « Investigations on the required luminance in tunnel entrances ». *Lighting Research & Technology* 14 (3): 151- 59. <https://doi.org/10.1177/096032718201400304>.
- Adrian, W. 1987. « Adaptation Luminance When Approaching a Tunnel in Daytime ». *Lighting Research & Technology* 19 (3): 73- 79. <https://doi.org/10.1177/096032718701900303>.
- Adrian, W. 1989. « Visibility of targets: Model for calculation ». *Lighting Research & Technology* 21 (4): 181- 88. <https://doi.org/10.1177/096032718902100404>.
- Adrian, W., et K. Eberbach. 1969. « On the Relationship between the Visual Threshold and the Size of the Surrounding Field ». *Lighting Research & Technology* 1 (4): 251- 54. <https://doi.org/10.1177/14771535690010040601>.
- Akashi, Yukio, M S Rea, et J D Bullough. 2007. « Driver Decision Making in Response to Peripheral Moving Targets under Mesopic Light Levels ». *Lighting Research & Technology* 39 (1): 53- 67. <https://doi.org/10.1177/1365782806071608>.
- Aulhorn, E. 1964. « Über die Beziehung zwischen Lichtsinn und Sehschärfe ». *Albrecht von Graefes Archiv für Ophthalmologie* 167 (1): 4- 74. <https://doi.org/10.1007/BF00684291>.
- Barrionuevo, Pablo A., Nathaniel Nicandro, J. Jason McAnany, Andrew J. Zele, Paul Gamlin, et Dingcai Cao. 2014. « Assessing Rod, Cone, and Melanopsin Contributions to Human Pupil Flicker Responses ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 55 (2): 719- 27. <https://doi.org/10.1167/iovs.13-13252>.
- Berek, M. 1943. « Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung ». *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 9: 298- 309.
- Berson, David M., Felice A. Dunn, et Motoharu Takao. 2002. « Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock ». *Science* 295 (5557): 1070- 73. <https://doi.org/10.1126/science.1067262>.
- Bieron, J., et P. Peers. 2020. « An Adaptive BRDF Fitting Metric ». *Computer Graphics Forum* 39 (4): 59- 74. <https://doi.org/10.1111/cgf.14054>.
- Bisketzis, Nikolas, Constantinos Bouroussis, et Frangiskos Topalis. 2009. « Is the fovea vision only photopic? » In . Istanbul.
- Blackwell, H. R. 1946. « Contrast Thresholds of the Human Eye ». *Journal of the Optical Society of America* 36 (11): 624- 43. <https://doi.org/10.1364/JOSA.36.000624>.

- Blackwell, H. R. 1959. « Development and Use of a Quantitative Method for Specification of Interior Illumination Levels on the Basis of Performance Data ». *Journal of the Illuminating Engineering Society* 54 (6): 317-53.
- Blackwell, H. R. 1981. « Description of a Comprehensive Family of Relative Contrast Sensitivity (RCS) Functions of Luminance to Reflect Differences in Size of Task Detail, Task Eccentricity and Observer Age ». *Journal of the Illuminating Engineering Society* 11 (1): 52-63. <https://doi.org/10.1080/00994480.1981.10747913>.
- Blackwell, O. Mortenson, et H. Richard Blackwell. 1980. « Individual Responses to Lighting Parameters for a Population of 235 Observers of Varying Ages ». *Journal of the Illuminating Engineering Society* 9 (4): 205-32. <https://doi.org/10.1080/00994480.1980.10747901>.
- Boer, J. B. de. 1961. « Le problème de l'éclairage de transition dans les entrées de tunnel ». Présenté à Congrès de l'Association Italienne de l'Eclairage, Turin.
- Boer, J. B. de, et D. A. Schreuder. 1967. « Glare as a Criterion for Quality in Street Lighting ». *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 32 (2_IEStrans): 117-35. <https://doi.org/10.1177/147715356703200205>.
- Bommel, W.J.M. Van. 2014. *Road Lighting: Fundamentals, Technology and Application*. Springer.
- Bommell, W.J.M. Van, et J. B. de Boer. 1980. « Road lighting ». Deventer.
- Bourdy, C., A. Chiron, C. Cottin, et A. Monot. 1987. « Visibility at a Tunnel Entrance: Effect of Temporal Adaptation ». *Lighting Research & Technology* 19 (2): 35-44. <https://doi.org/10.1177/096032718701900202>.
- Bozorg Chenani, Sanaz, Mikko Maksimainen, Eino Tetri, Iisakki Kosonen, et Tapio Luttinen. 2016. « The Effects of Dimmable Road Lighting: A Comparison of Measured and Perceived Visibility ». *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 43 (novembre): 141-56. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.10.012>.
- Bozorg Chenani, Sanaz, Matti T. Vaaja, Matti Kurkela, Iisakki Kosonen, et Tapio Luttinen. 2017. « Target Detection Distances under Different Road Lighting Intensities ». *European Transport Research Review* 9 (2): 17. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0234-z>.
- Brown, Timothy M., Sei-ichi Tsujimura, Annette E. Allen, Jonathan Wynne, Robert Bedford, Graham Vickery, Anthony Vugler, et Robert J. Lucas. 2012. « Melanopsin-Based Brightness Discrimination in Mice and Humans ». *Current Biology* 22 (12): 1134-41. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.04.039>.
- BSI. 2016. « British Standard 5489-2:2016 ». Afnor.

- Bullough, J.D. 2009. « Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare ». *Journal of Modern Optics* 56 (13): 1518-22. <https://doi.org/10.1080/09500340903045710>.
- Bullough, J.D., et M.S. Rea. 2000. « Simulated Driving Performance and Peripheral Detection at Mesopic and Low Photopic Light Levels ». *International Journal of Lighting Research and Technology* 32 (4): 194-98. <https://doi.org/10.1177/096032710003200403>.
- Carnì, Domenico Luca, Domenico Grimaldi, Francesco Lamonaca, Luigi Martirano, et Giuseppe Parise. 2013. « A smart control to operate the lighting system in the road tunnels ». In *2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*, 02:786-90. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2013.6663033>.
- CEN. 2006. « Eclairagisme - Eclairage des tunnels ». Afnor.
- CETU. 1985. *Guide de l'éclairage des tunnels routiers*.
- CETU. 1998. *Méthode de dimensionnement de l'éclairage d'entrée des tunnels routiers*. Bron, France: CETU.
- CETU. 2000. « Dossier pilote des tunnels - éclairage ». SPECIFIQUE J.L.P. - Lyon.
- CIE 13-3. 1995. *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*.
- CIE 19. 1972. « A Unified Framework of Methods for Evaluating Visual Performance Aspects of Lighting ».
- CIE 88. 2004. *Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses*.
- CIE 95. 1992. *Contrast and Visibility*.
- CIE 108. 1994. *Guide to recommended Practice of Daylight Measurement*.
- CIE 146/147. 2002. *CIE Collection on Glare*.
- CIE 171. 2006. *Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs*.
- CIE 191. 2010. *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*.
- CIE 204. 2013. *Methods for Re-Defining CIE D Illuminants*.
- CIE 212. 2014. *Guidance towards Best Practise in Psychophysical Procedures Used When Measuring Relative Spatial Brightness*.
- CIE 224. 2017. *Colour Fidelity Index for Accurate Scientific Use*.
- CIE S 026. 2018. « CIE System for Metrology of Optical Radiation for IpRGC-Influenced Responses to Light ». <https://doi.org/10.25039/S026.2018>.

- Cohen, Jacob. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2^e éd. New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>.
- Curcio, Christine A., Kenneth R. Sloan, Robert E. Kalina, et Anita E. Hendrickson. 1990. « Human Photoreceptor Topography ». *Journal of Comparative Neurology* 292 (4): 497-523. <https://doi.org/10.1002/cne.902920402>.
- Dacey, Dennis M., Hsi-Wen Liao, Beth B. Peterson, Farrel R. Robinson, Vivianne C. Smith, Joel Pokorny, King-Wai Yau, et Paul D. Gamlin. 2005. « Melanopsin-Expressing Ganglion Cells in Primate Retina Signal Colour and Irradiance and Project to the LGN ». *Nature* 433 (7027): 749-54. <https://doi.org/10.1038/nature03387>.
- Deville, Pascal M., Slimane Merzouk, Dorothée Cazier, et Jean C. Paul. 1994. « Spectral Data Modeling for a Lighting Application ». *Computer Graphics Forum* 13 (3): 97-106. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.1330097>.
- Djokic, L, A Cabarkapa, et A Djuretic. 2018. « Drivers' Impressions under High-Pressure Sodium and LED Street Lighting ». *Lighting Research & Technology* 50 (8): 1212-24. <https://doi.org/10.1177/1477153517727802>.
- Duboz, Jean Yves. 2019. « Physics of LEDs, Performances and Limits ». Lyon, France.
- Dubuisson, J. S. 1978. « Etude de la Visibilité - Applications aux Tunnels Routiers ». *Lux*, n° 96 (février). <https://trid.trb.org/view/1053348>.
- Dumont, Eric, Karine Joulan, et Vincent Ledoux. 2011. « Tabulation and Completion of Measured BRDF Data for Lighting Computations ». In *27th Session of the CIE*, 1155-63. SUN CITY, South Africa. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00878741>.
- Đurikovič, Roman, et Andrej Mihálik. 2014. « Modeling the BRDF from Spectral Reflectance Measurements of Metallic Surfaces ». *Applied Surface Science*, 8th Solid State Surfaces and Interfaces, 312 (septembre): 87-90. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.099>.
- Ecker, Jennifer L., Olivia N. Dumitrescu, Kwoon Y. Wong, Nazia M. Alam, Shih-Kuo Chen, Tara LeGates, Jordan M. Renna, Glen T. Prusky, David M. Berson, et Samer Hattar. 2010. « Melanopsin-Expressing Retinal Ganglion-Cell Photoreceptors: Cellular Diversity and Role in Pattern Vision ». *Neuron* 67 (1): 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.05.023>.
- Eloholma, Marjukka, et Liisa Halonen. 2005. « MOVE : Mesopic Optimisation of Visual Efficiency ». Helsinki University of Technology.
- Esquiva, Gema, Pedro Lax, Juan J. Pérez-Santonja, José M. García-Fernández, et Nicolás Cuenca. 2017. « Loss of Melanopsin-Expressing Ganglion Cell Subtypes and Dendritic Degeneration in the Aging Human Retina ». *Frontiers in Aging Neuroscience* 9. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00079>.

- Estévez, O., et H. Spekreijse. 1982. « The “silent substitution” method in visual research ». *Vision Research* 22 (6): 681-91. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(82\)90104-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90104-3).
- Fechner, Gustav. 1966. *Elements of psychophysics. Vol. I.* Elements of psychophysics. Vol. I. Holt, Rinehart and Winston: New York.
- Freiding, A., M. Eloholma, J. Ketomäki, L. Halonen, H. Walkey, T. Goodman, J. Alferdinck, G. Várady, et P. Bodrogi. 2007. « Mesopic Visual Efficiency I: Detection Threshold Measurements ». *Lighting Research & Technology* 39 (4): 319-34. <https://doi.org/10.1177/1477153507080917>.
- Fry, Glenn A. 1954. « Evaluating disabling effects of approaching automobile headlights ». *Highway Research Board bulletin* 89: 38-42.
- Funke, C. 2017. « What is the effective luminance or effective area of non-uniform LED-luminaires in discomfort glare rating with UGR? »
- Gamlin, Paul D. R., David H. McDougal, Joel Pokorny, Vivianne C. Smith, King-Wai Yau, et Dennis M. Dacey. 2007. « Human and macaque pupil responses driven by melanopsin-containing retinal ganglion cells ». *Vision Research* 47 (7): 946-54. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.12.015>.
- Górczewska, M., S. Mroczkowska, et P. Skrzypczak. 2013. « Light Color Influence on Obstacle Recognition in Road Lighting ». *Computer Applications in Electrical Engineering*, n° Vol. 11: 380--388.
- Guo, Shanshan, Hanting Gu, Lan Wu, et Shuixiu Jiang. 2011. « Energy-Saving Tunnel Illumination System Based on LED's Intelligent Control ». *Journal of Physics: Conference Series* 276 (février): 012164. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/276/1/012164>.
- Hannibal, Jens, Anders Tolstrup Christiansen, Steffen Heegaard, Jan Fahrenkrug, et Jens Folke Kiilgaard. 2017. « Melanopsin Expressing Human Retinal Ganglion Cells: Subtypes, Distribution, and Intraretinal Connectivity ». *Journal of Comparative Neurology* 525 (8): 1934-61. <https://doi.org/10.1002/cne.24181>.
- He, S. Y., L. Tähkämö, M. Maksimainen, B. Liang, G. B. Pan, et L. Halonen. 2017. « Effects of transient adaptation on drivers' visual performance in road tunnel lighting ». *Tunnelling and Underground Space Technology* 70 (novembre): 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.008>.
- He, Shiyong, Yuhao Ren, Hao Liu, Bo Liang, et Guoping Du. 2022. « A Novel Tunnel Lighting Method Aided by Highly Diffuse Reflective Materials on the Sidewall: Theory and Practice ». *Tunnelling and Underground Space Technology* 122 (avril): 104336. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104336>.

- Hirakawa, Satoshi, Yoshinori Karasawa, Tsuyoshi Funaki, et Yukinobu Yoshida. 2014. « Evaluation Index of Visibility in Tunnel Lighting ». *Journal of Light & Visual Environment* 38 (mars): 117-27. <https://doi.org/10.2150/jlve.IEIJ130000529>.
- Hood, Donald C., et Marcia A. Finkelstein. 1986. « Sensitivity to Light ». *Handbook of Perception and Human Performance (Vol. 1: Sensory Processes and Perception)* 1. https://scholarcommons.usf.edu/psy_facpub/793.
- Iacomussi, Paola, et Giuseppe Rossi. 2019. « Influence of Material Characterization in the Design of Tunnel Lighting Installations ». In *Proceedings OF the 29th Quadrennial Session of the CIE*, 546-52. Washington DC, USA: International Commission on Illumination, CIE. <https://doi.org/10.25039/x46.2019.OP74>.
- IES. 1966. *IES Lighting Handbook*. John E. Kaufman. Vol. 4.
- IES. 2019. « IES Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data and Related Information ».
- Ijspeert, J. K., P. W. T. de Waard, T. J. T. P. van den Berg, et P. T. V. M. de Jong. 1990. « The Intraocular Straylight Function in 129 Healthy Volunteers; Dependence on Angle, Age and Pigmentation ». *Vision Research* 30 (5): 699-707. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(90\)90096-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(90)90096-4).
- Iodice, Matthieu. 2020. « Méthodes de caractérisation psychophysique et physiologique de l'éblouissement d'inconfort en éclairage artificiel intérieur : étude de l'influence du contenu spectral des sources lumineuses ». These de doctorat, Lyon. <http://www.theses.fr/2020LYSET007>.
- Jonas, Jost B., Ulrike Schneider, et Gottfried O. H. Naumann. 1992. « Count and Density of Human Retinal Photoreceptors ». *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* 230 (6): 505-10. <https://doi.org/10.1007/BF00181769>.
- Kabayama, H. 1963. « Study on adaptive illumination for sudden change of brightness ». *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan* 47: 488-96. http://dx.doi.org/10.2150/jiej1917.47.10_488.
- Khan, Mainul, Sanjaya Senadheera, Douglas Gransberg, et Roman Stemprok. 1999. « Influence of Pavement Surface Characteristics on Nighttime Visibility of Objects ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1692 (janvier): 39-48. <https://doi.org/10.3141/1692-06>.
- Kimura, Masayoshi, Satoshi Hirakawa, Hirohito Uchino, Hideki Motomura, et Masafumi Jinno. 2013. « Energy Savings in Tunnel Lighting by Improving the Road Surface Luminance Uniformity—A New Approach to Tunnel Lighting— ». *Journal of Light & Visual Environment*, novembre, IEIJ120000487. <https://doi.org/10.2150/jlve.IEIJ120000487>.

- Knoblauch, Kenneth, et Laurence T. Maloney. 2012. *Modeling Psychophysical Data in R*. Springer Science & Business Media.
- Koschmieder, H. 1924. « Theorie der horizontalen sichtweite ». *Beitrage zur Physik der freien Atmosphere*, 33-53.
- Kraats, Jan van de, et Dirk van Norren. 2007. « Optical Density of the Aging Human Ocular Media in the Visible and the UV ». *JOSA A* 24 (7): 1842-57. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.24.001842>.
- Lewis, Alan L. 1999. « Visual Performance as a Function of Spectral Power Distribution of Light Sources at Luminances Used for General Outdoor Lighting ». *Journal of the Illuminating Engineering Society* 28 (1): 37-42. <https://doi.org/10.1080/00994480.1999.10748250>.
- Lin, Yandan, Wencheng Chen, Dahua Chen, et Hong Shao. 2004. « The effect of spectrum on visual field in road lighting ». *Building and Environment* 39 (4): 433-39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.10.004>.
- Liu, Yingying, Li Peng, Liyong Lin, Zhonglin Chen, Ji Weng, et Qingwen Zhang. 2021. « The Impact of LED Spectrum and Correlated Color Temperature on Driving Safety in Long Tunnel Lighting ». *Tunnelling and Underground Space Technology* 112 (juin): 103867. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103867>.
- Lucas, Robert J., Annette E. Allen, Nina Milosavljevic, Riccardo Storchi, et Tom Woelders. 2020. « Can We See with Melanopsin? ». *Annual Review of Vision Science* 6 (1): 453-68. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-030320-041239>.
- Mäder, F., et O. Fuchs. 1966. « Beitrag zur Frage de Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln Bull ». *SEV (Switzerland)* 57: 359-66.
- Mardaljevic, John. 1999. « Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients ».
- Mazzocco, Julie. 2017. « Métabolisme des plasmalogènes dans les cellules gliales rétiniennes : interactions cellule-cellule au cours du développement vasculaire rétinien normal ou pathologique ». Phdthesis, Université Bourgogne Franche-Comté. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02084862>.
- McCamy, C. S. 1992. « Correlated Color Temperature as an Explicit Function of Chromaticity Coordinates ». *Color Research & Application* 17 (2): 142-44. <https://doi.org/10.1002/col.5080170211>.
- McDougal, David H., et Paul D. Gamlin. 2010. « The influence of intrinsically-photosensitive retinal ganglion cells on the spectral sensitivity and response dynamics of the human pupillary light reflex ». *Vision Research* 50 (1): 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.10.012>.

- Ménard, J., et J. Cariou. 1994. « Road Lighting: Assessment of an Installation Based on the Contrast of a Standard Target ». *International Journal of Lighting Research and Technology* 26 (1): 19-22. <https://doi.org/10.1177/096032719402600104>.
- Middleton, W. E. K. 1957. « Vision through the Atmosphere ». In *Geophysik II / Geophysics II*, édité par Julius Bartels, 254-87. Handbuch Der Physik / Encyclopedia of Physics. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45881-1_3.
- Misener, James A. 1998. « Investigation of an Optical Method to Determine the Presence of Ice on Road Surfaces », 21.
- Morgan Pattison, Paul, Monica Hansen, et Jeffrey Y. Tsao. 2018. « LED Lighting Efficacy: Status and Directions ». *Comptes Rendus Physique, LEDs: The new revolution in lighting / Les LED : la nouvelle révolution de l'éclairage*, 19 (3): 134-45. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>.
- Mourant, Ronald R., et Thomas H. Rockwell. 1970. « Mapping Eye-Movement Patterns to the Visual Scene in Driving: An Exploratory Study », *Human Factors* 12 (1): 81-87. <https://doi.org/10.1177/001872087001200112>.
- Mure, Ludovic S. 2021. « Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells of the Human Retina ». *Frontiers in Neurology* 12. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.636330>.
- Musa, Mohamed Salah, Perumal Nallagownden, Kevin William Chiu, et Muhammad Bilal Sarwar. 2015. « Design and development of intelligent adaptive tunnel lighting system ». In *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 289-92. <https://doi.org/10.1109/CENCON.2015.7409556>.
- Narisada, K., et K. Yoseoikawa. 1974. « Tunnel entrance lighting—effect of fixation point and other factors on the determination of requirements ». *Lighting Research & Technology* 6 (1): 9-18. <https://doi.org/10.1177/096032717400600102>.
- Ngan, A., F. Durand, et W. Matusik. 2005. « Experimental Analysis of BRDF Models ». *Rendering Techniques*, n° 16.
- Padmos, P. 1984. « Glare and Tunnel Entrance Lighting : Effects of Straylight from Eye, Atmosphere and Windscreen ». *CIE Journal*, 1984.
- Padmos, P., et Jwam Alferdinck. 1983. « Straylight from Atmosphere and Windscreen, related to the Surround Luminance of Tunnel ». *Publication of: Bureau Central de la CIE*, n° 0. <https://trid.trb.org/view/204955>.
- Peeling, James, Matthew Wayman, Isabela Mocanu, Philippe Nitsche, John Rands, et John Potter. 2016. « Energy Efficient Tunnel Solutions ». *Transportation Research Procedia, Transport Research Arena TRA2016*, 14 (janvier): 1472-81. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.221>.

- Perez, Richard, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky, et Ronald Stewart. 1990. « Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance ». *Solar Energy* 44 (5): 271-89. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H).
- Pierson, Clotilde, Mariëlle Aarts, et Marilynne Andersen, éd. 2021. « Validation of Spectral Simulation Tools for the Prediction of Indoor Daylight Exposure ». *17th International IBPSA Building Simulation Conference Book of Abstracts*.
- Pierson, Clotilde, Mariëlle P. J. Aarts, et Marilynne Andersen. 2022. « Validation of spectral simulation tools in the context of ipRGC-influenced light responses of building occupants ». *Journal of Building Performance Simulation* 0 (0): 1-19. <https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2125582>.
- Qin, Li, Antonio Peña-García, Arturo S. Leon, et Jian-Cheng Yu. 2021. « Comparative Study of Energy Savings for Various Control Strategies in the Tunnel Lighting System ». *Applied Sciences* 11 (14): 6372. <https://doi.org/10.3390/app11146372>.
- Rea, MS, JD Bullough, JP Freyssinier-Nova, et A Bierman. 2004. « A Proposed Unified System of Photometry ». *Lighting Research & Technology* 36 (2): 85-109. <https://doi.org/10.1191/1365782804li1140a>.
- Ricco, A. 1877. « Relzione fra il minimo angolo visuale e l'intensità luminosa ».
- Ripamonti, Caterina, Wen Ling Woo, Elizabeth Crowther, et Andrew Stockman. 2009. « The S-cone contribution to luminance depends on the M- and L-cone adaptation levels: Silent surrounds? » *Journal of Vision* 9 (3): 10. <https://doi.org/10.1167/9.3.10>.
- Salata, Ferdinando, Iacopo Golasi, Alessandro Poliziani, Antonio Futia, Emanuele De Lieto Vollaro, Massimo Coppi, et Andrea De Lieto Vollaro. 2016. « Management Optimization of the Luminous Flux Regulation of a Lighting System in Road Tunnels. A First Approach to the Exertion of Predictive Control Systems ». *Sustainability* 8 (11): 1092. <https://doi.org/10.3390/su8111092>.
- Schmidt-Clausen, H. J., I. Ziegler, et H. Ziegler. 1969. « Die lichtinduzierte Aktivitätssteigerung der NADP + -abhängigen Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase: XI. Die Kinetik der reversiblen Reaktion bei Lemna gibba ». *Planta* 86 (3): 272-85.
- Schreuder, D. A. 1964. « The lighting of vehicular traffic tunnels ». URN:NBN:NL:UI:25-88368, Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven. <http://repository.tue.nl/88368>.
- Schreuder, D A. 1966. « Physiological Aspects of the Lighting of Tunnel Entrances ». *Philips Technical Review* 27 (3): 11.
- Shuguang, Li. 2015. « An optimal model for tunnel lighting control systems ». *Tunnelling and Underground Space Technology* 49 (juin). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.05.001>.

- Silion, Stefan, et Cristian Fosalau. 2014a. « Wet road surfaces detection by measuring the infrared reflected radiation ». In *2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 738-43. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2014.6970007>.
- Silion, Stefan, et Cristian Fosalau. 2014b. « Wet road surfaces detection by measuring the air humidity in two points ». *EPE 2014 - Proceedings of the 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, décembre, 744-47. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2014.6970008>.
- Sivak, Michael, Brandon Schoettle, Takako Minoda, et Michael J. Flannagan. 2005. « Short-Wavelength Content of LED Headlamps and Discomfort Glare ». *LEUKOS* 2 (2): 145-54. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2005.02.02.006>.
- Spitschan, Manuel, Sandeep Jain, David H. Brainard, et Geoffrey K. Aguirre. 2014. « Opponent melanopsin and S-cone signals in the human pupillary light response ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (43): 15568-72. <https://doi.org/10.1073/pnas.1400942111>.
- Thomas, Claire, Etienne Wey, Philippe Blanc, Lucien Wald, et Mireille Lefèvre. 2015. « Validation of HelioClim-3 Version 4, HelioClim-3 Version 5 and MACC-RAD Using 14 BSRN Stations ». In , 91:1059. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.275>.
- Várady, G., A. Freiding, M. Eloholma, L. Halonen, H. Walkey, T. Goodman, et J. Alferdinck. 2007. « Mesopic Visual Efficiency III: Discrimination Threshold Measurements ». *Lighting Research & Technology* 39 (4): 355-64. <https://doi.org/10.1177/1477153507080922>.
- Verdon, Wayne, et Anthony J. Adams. 1987. « Short-Wavelength-Sensitive Cones Do Not Contribute to Mesopic Luminosity ». *JOSA A* 4 (1): 91-95. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.4.000091>.
- Viikari, Meri, Aleksanteri Ekrias, Marjukka Eloholma, et Liisa Halonen. 2008. « Modeling spectral sensitivity at low light levels based on mesopic visual performance ». *Clinical ophthalmology (Auckland, N.Z.)* 2 (1): 173-85. <https://doi.org/10.2147/opth.s2414>.
- Waldram, J. M. 1934. « Road Surface Reflection Characteristics and Their Influence on Street Lighting Practice ». *Illuminating Engineering*, n° 27: 305-13.
- Weale, R. A. 1961. « Retinal Illumination and Age ». *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 26 (2_IESTrans): 95-100. <https://doi.org/10.1177/147715356102600204>.
- Weston, H. C. 1945. « The Relation between Illumination and Visual Efficiency : The Effect of Brightness Contrast ». Industrial Health Research Board Report 87.

- Wooten, B. R., et G. A. Geri. 1987. « Psychophysical Determination of Intraocular Light Scatter as a Function of Wavelength ». *Vision Research* 27 (8): 1291-98. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(87\)90206-9](https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90206-9).
- Xu, Ronghui. 2003. « Measuring Explained Variation in Linear Mixed Effects Models ». *Statistics in Medicine* 22 (22): 3527-41. <https://doi.org/10.1002/sim.1572>.
- Zaidi, Farhan H., Joseph T. Hull, Stuart N. Peirson, Katharina Wulff, Daniel Aeschbach, Joshua J. Gooley, George C. Brainard, et al. 2007. « Short-Wavelength Light Sensitivity of Circadian, Pupillary, and Visual Awareness in Humans Lacking an Outer Retina ». *Current Biology* 17 (24): 2122-28. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.034>.
- Zele, Andrew J., Prakash Adhikari, Beatrix Feigl, et Dingcai Cao. 2018. « Cone and Melanopsin Contributions to Human Brightness Estimation ». *Journal of the Optical Society of America A* 35 (4): B19-25. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.35.000B19>.
- Zele, Andrew J., Ashim Dey, Prakash Adhikari, et Beatrix Feigl. 2020. « Rhodopsin and Melanopsin Contributions to Human Brightness Estimation ». *JOSA A* 37 (4): A145-53. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.379182>.
- Zele, Andrew J., Beatrix Feigl, Prakash Adhikari, Michelle L. Maynard, et Dingcai Cao. 2018. « Melanopsin photoreception contributes to human visual detection, temporal and colour processing ». *Scientific Reports* 8 (1): 3842. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22197-w>.
- Zeng, Hong, Jian Qiu, Xingfa Shen, Guojun Dai, Peng Liu, et Shuping Le. 2011. « Fuzzy Control of LED Tunnel Lighting and Energy Conservation ». *Tsinghua Science & Technology* 16 (6): 576-82. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(11\)70077-3](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(11)70077-3).
- Zhang, Xiaoqin, Jiangbi Hu, Ronghua Wang, Xiaojuan Gao, et Lucheng He. 2017. « The Comprehensive Efficiency Analysis of Tunnel Lighting Based on Visual Performance ». *Advances in Mechanical Engineering* 9 (4): 168781401769644. <https://doi.org/10.1177/1687814017696449>.
- Zhao, Jiandong, Yingzi Feng, et Cai Yang. 2021. « Intelligent Control and Energy Saving Evaluation of Highway Tunnel Lighting: Based on Three-Dimensional Simulation and Long Short-Term Memory Optimization Algorithm ». *Tunnelling and Underground Space Technology* 109 (mars): 103768. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103768>.
- Zhao, Liang, Shaocheng Qu, Weigang Zhang, et Zhili Xiong. 2019. « An Energy-Saving Fuzzy Control System for Highway Tunnel Lighting ». *Optik* 180 (février): 419-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.11.123>.

Annexes

Annexe A : Arbres de décision pour l'éclairage des tunnels (CETU 2000)

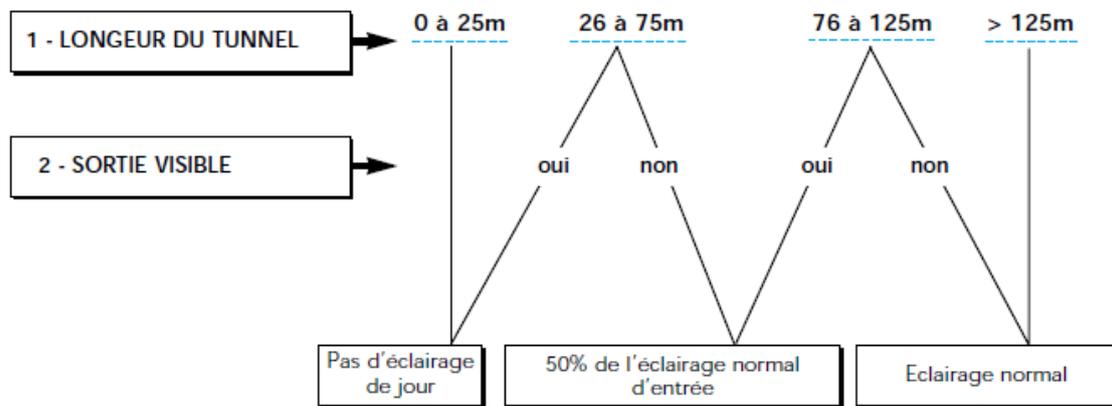


Figure 1 Tunnels urbains

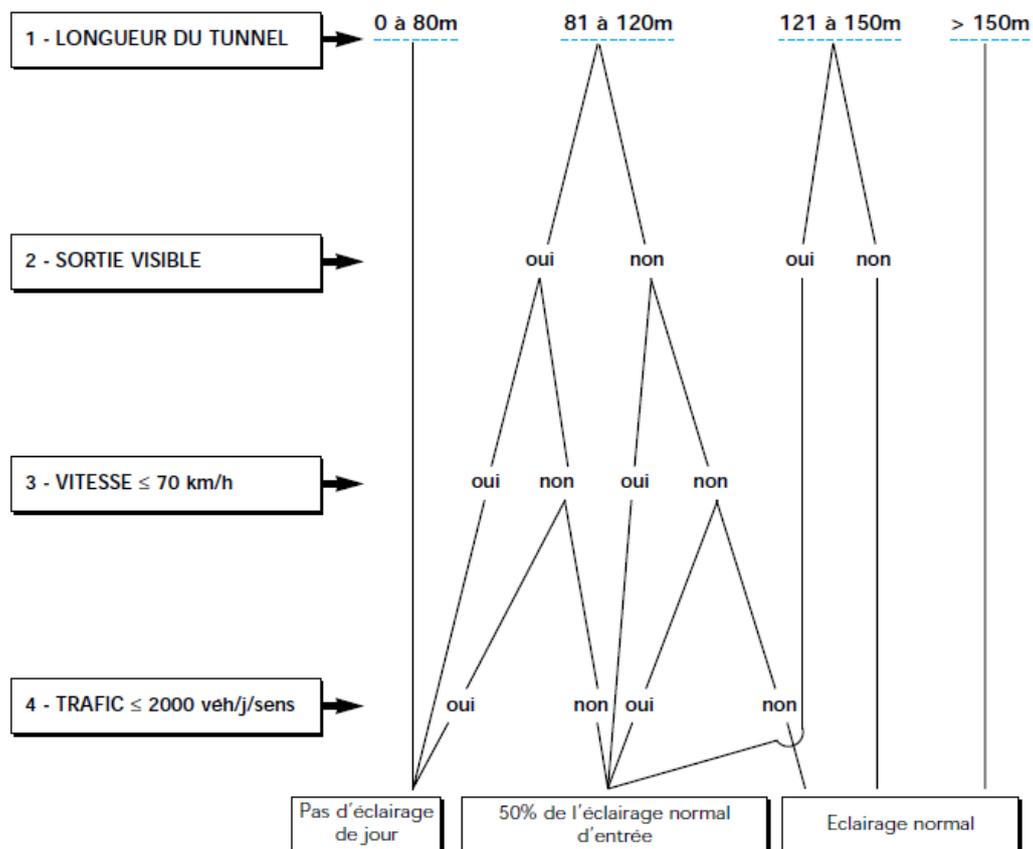


Figure 2 Tunnels interurbains bidirectionnels à fort trafic ou à vitesse importante

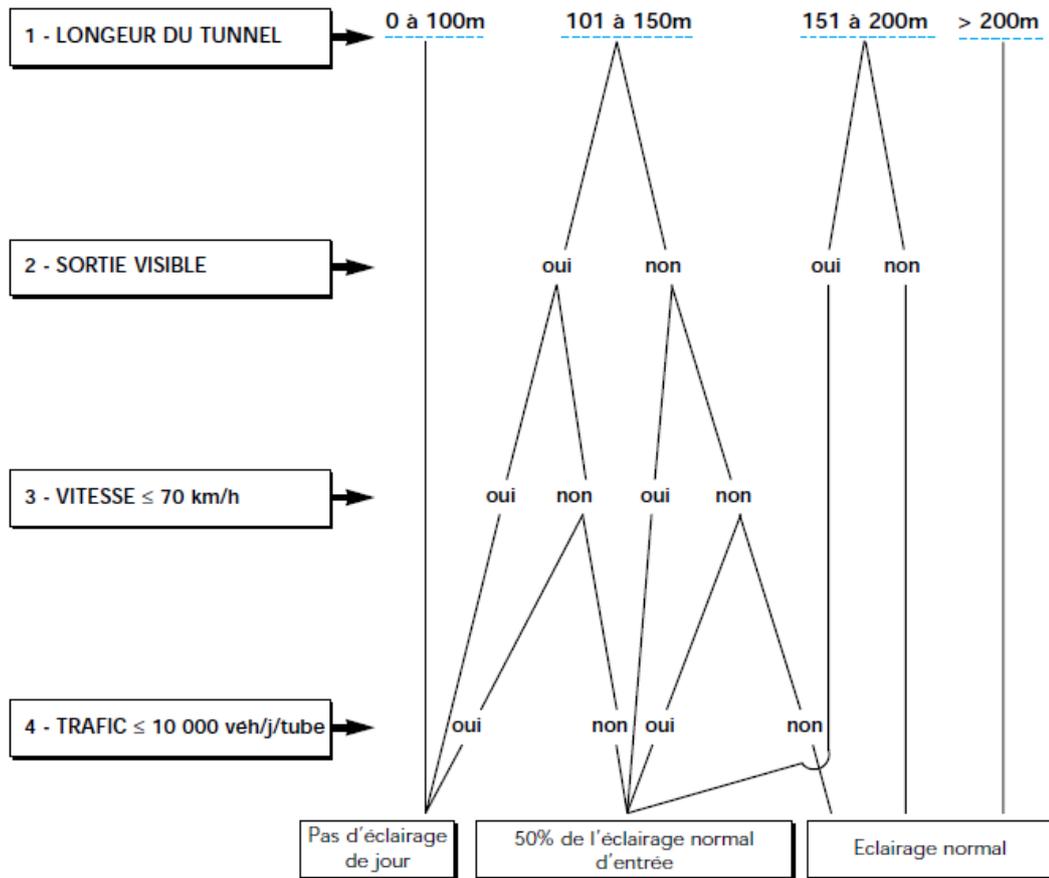


Figure 3 Tunnels interurbains unidirectionnels à fort trafic ou à vitesse importante

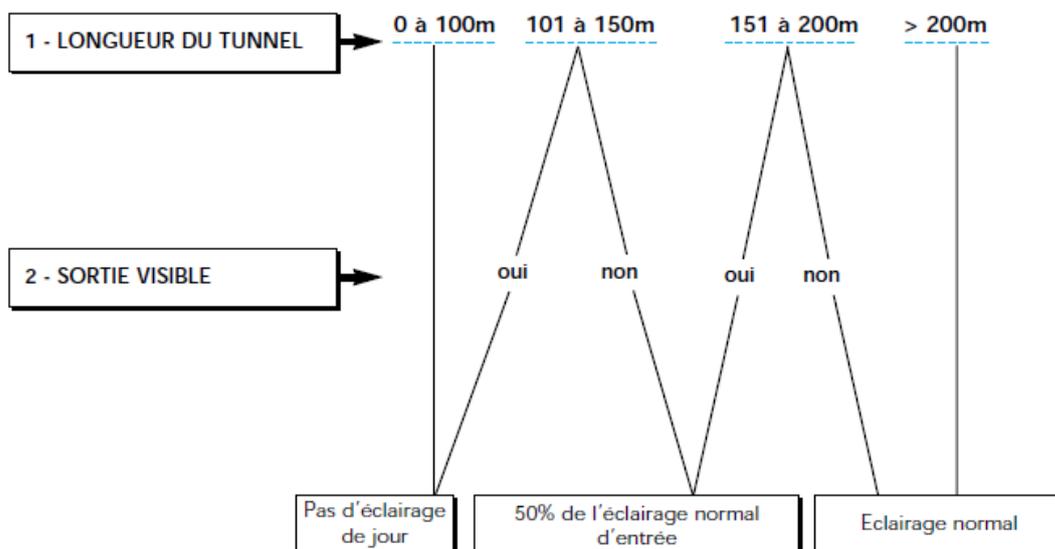


Figure 4 Tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse faible

Annexe B : Niveaux de luminance en section courante recommandés par la CIE, le CEN et le CETU

B.1 Recommandations CIE

Tableau 1 Recommandations CIE pour l'éclairage de section courante (CIE 88 2004)

Distance d'arrêt (m)	Tunnels longs		Tunnels très longs	
	Trafic Léger	Trafic Lourd	Trafic Léger	Trafic Lourd
160m	6 cd/m ²	10 cd/m ²	2.5 cd/m ²	4.5 cd/m ²
60m	3 cd/m ²	6 cd/m ²	1 cd/m ²	2 cd/m ²

Tableau 2 Définitions trafic léger et trafic lourd, les données sont prises pour le trafic aux heures de pointe (CIE 88 2004)

Trafic	Trafic unidirectionnel	Trafic bidirectionnel
Léger	<500 véhicules/heure/ligne	<100 véhicule/heure/ligne
Lourd	>1500 véhicules/heure/ligne	>400 véhicules/heure/ligne

Définition tunnels très longs : La section courante des tunnels très longs est séparée en 2 parties : La première partie correspond à la distance couverte en 30 secondes par les conducteurs roulant à la vitesse limite autorisée, et doit être éclairée avec les niveaux présentés dans la catégorie « tunnels longs ». La deuxième partie correspond à la longueur restante et doit être éclairée avec les niveaux présentés dans la catégorie « tunnels très longs ».

B.2 Recommandations CEN

Tableau 3 Recommandations CEN pour l'éclairage de section courante (CEN 2006)

Distance d'arrêt (m)	Luminance de chaussée en section courante		
	Densité de trafic Faible	Densité de trafic Moyenne	Densité de trafic Forte
160m	5 cd/m ²	10 cd/m ²	15 cd/m ²
100m	2 cd/m ²	4 cd/m ²	6 cd/m ²
60m	1 cd/m ²	2 cd/m ²	3 cd/m ²

Tableau 4 Définitions des catégories de trafic, les données sont prises pour le trafic aux heures de pointe (CEN 2006)

Densité de trafic	Trafic unidirectionnel	Trafic bidirectionnel
Faible	<500 véhicules/heure/ligne	<100 véhicules/heure/ligne
Moyenne	500-1500 véhicules/heure/ligne	100-400 véhicules/heure/ligne
Forte	>1500 véhicules/heure/ligne	>400 véhicules/heure/ligne

B.3 Recommandations CETU

Tableau 5 Recommandations CETU pour l'éclairage de section courante (CETU 2000)

Type de tunnel	Autoroute	Autres types de route
Tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse inférieure à 70 km/h	2 cd/m ²	2 cd/m ²
Tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse supérieure à 70 km/h	4-5 cd/m ²	3-4 cd/m ²
Tunnels urbains	4-6 cd/m ²	4-6 cd/m ²

La définition donnée au « faible trafic » est la suivante : « moins de 2000 véhicules par jour en moyenne annuelle et moins de 400 véhicules à l'heure de pointe, 30^{ème} heure la plus chargée de l'année. Les poids lourds comptent pour 5 véhicules » (CETU 2000), le « fort trafic » correspondant donc à toutes les autres situations.

Annexe C : Critères complémentaires pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage

D'autres critères, valables à la fois de jour et de nuit, permettent d'évaluer de manière plus exhaustive la qualité de l'éclairage mis en place. Ces critères se retrouvent dans les 3 guides étudiés dans ce chapitre. Il s'agit :

- Des uniformités générale et longitudinale ;
- De la luminance de piédroit ;
- Du paramètre de qualité de contraste ;
- De la quantification de l'effet Flicker ;
- Du TI.

C.1 CIE

C.1.1 Uniformités

L'uniformité globale est le rapport entre la valeur de luminance minimale relevée sur la zone de mesure et la moyenne des mesures effectuées sur cette même zone. Elle est mesurée et calculée sur la chaussée. L'uniformité longitudinale correspond au rapport entre la luminance la plus faible et la luminance la plus forte mesurées sur un axe longitudinal.

Pour la CIE, la zone considérée pour le calcul de l'uniformité générale inclut la chaussée, mais également les piédroits jusqu'à 2 mètres de hauteur (CIE 189 2010). La justification donnée est que la partie basse des piédroits constitue l'environnement de fond perçu par l'automobiliste au même titre que la chaussée, les deux éléments doivent donc être considérés de la même façon.

Les valeurs d'uniformités générales et longitudinale fixée par la CIE sont les suivantes :

Uniformité générale	≥ 0.4
Uniformité longitudinale	≥ 0.6

C.1.2 Luminance de piédroit

Comme mentionné précédemment, les piédroits constituent l'environnement de fond sur lequel les conducteurs vont détecter les obstacles, au même titre que la chaussée. La CIE impose donc que la luminance moyenne des piédroits, jusqu'à une hauteur de 2 m, soit au moins égale à 60% de la luminance moyenne de la chaussée sur la section transversale correspondante.

C.1.3 Paramètre de qualité de contraste

Le paramètre de qualité de contraste q_c permet de caractériser la capacité d'une installation d'éclairage à rendre visible un obstacle sur la chaussée. Il est défini comme le rapport de la luminance de chaussée au pied de l'objet cible sur l'éclairement vertical mesuré à la surface de l'objet.

$$q_c = \frac{L_{ch_{int}}}{E_v}$$

La CIE ne fait aucune recommandation particulière sur le paramètre de qualité de contraste q_c , seules des valeurs de référence sont données pour les systèmes symétriques et à contre-flux (respectivement 0.2 et 0.6).

C.1.4 Effet Flicker

L'effet Flicker caractérise la sensation ressentie par un automobiliste conduisant dans un environnement présentant des changements de luminance périodiques. Cet effet peut provoquer un certain inconfort chez le conducteur, les facteurs suivants vont déterminer le degré d'inconfort provoqué :

- Le nombre de changements de luminance par seconde (fréquence de Flicker), qui est obtenu simplement en divisant la vitesse du véhicule (en m/s) par l'inter-distance entre deux luminaires (de centre à centre, en m). Ainsi une vitesse limite de 70 km/h (19,4 m/s) associée à un espacement de luminaires de 4 m donnera une fréquence de Flicker de 4,85 Hz ;
- La durée totale de traversée de la zone de luminance changeante ;
- Le ratio de changement de luminance entre une zone claire et une zone plus sombre.

Plus ces facteurs seront élevés et plus la sensation de gêne sera importante.

La CIE conseille de maintenir des valeurs de fréquence de Flicker inférieures à 4 Hz et supérieures à 11 Hz si l'effet doit durer plus de 20 secondes. Aucune recommandation particulière n'est faite pour le ratio de changement de luminance, mais celui-ci est de toute façon limité par les impératifs en termes d'uniformités de luminance.

C.1.5 Eblouissement d'incapacité

L'éblouissement d'incapacité correspond à une réduction des performances visuelles et de la visibilité causée par l'action de lumières parasites qui pénètrent l'œil de l'utilisateur et se dispersent à l'intérieur de celui-ci. Il résulte de cette dispersion l'apparition d'une « luminance de voile » sur la rétine de l'utilisateur, qui réduit le contraste perçu des objets observés. Ce phénomène d'éblouissement d'incapacité est résumé en Figure 1. Cet élément va donc avoir tendance à dégrader la capacité des usagers à détecter d'éventuels obstacles sur la chaussée,

puisque le contraste de ces objets avec leur environnement de fond est diminué, et à détériorer les conditions de sécurité dans le tunnel. Cet éblouissement est pris en compte grâce à l'indice TI (« *Threshold Increment* »), dont le calcul est présenté en équation 1.

$$\text{Si } L_{ch_{int}} \leq 5 \text{ cd/m}^2 \text{ alors } TI = 65(L_v/L_{ch_{int}})^{0.8} \quad [1]$$

$$\text{Sinon } TI = 95(L_v/L_{ch_{int}})^{1.05}$$

Avec $L_{ch_{int}}$ la luminance de chaussée moyenne (cd/m^2) ;

L_v la luminance de voile créée par les luminaires dans le champ de vision de l'utilisateur jusqu'à 20° au-dessus de l'horizontale (le toit de la voiture vient couper le champ de vision) (cd/m^2).

Les valeurs de TI doivent être inférieures à 15% pour toutes les zones d'éclairage diurnes, exceptée la zone de sortie pour laquelle aucune restriction n'est imposée.

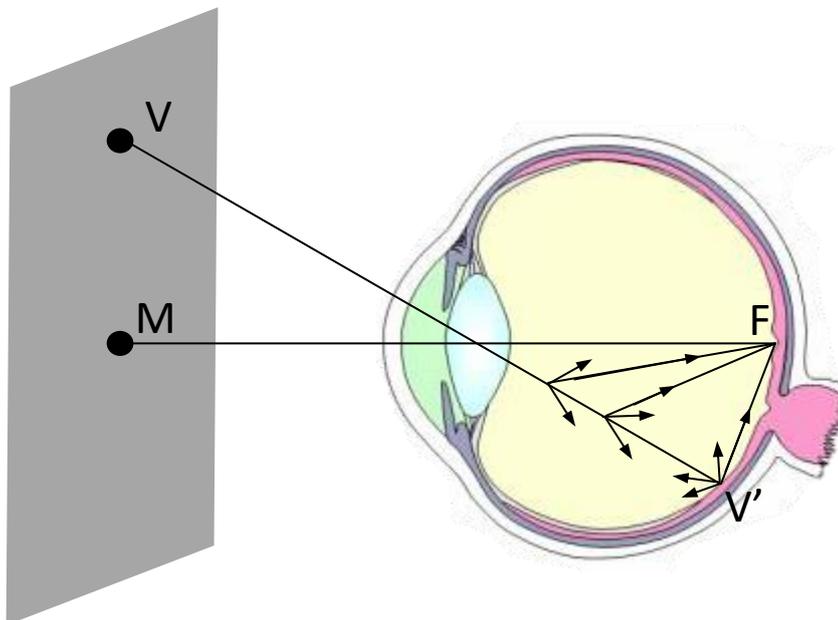


Figure 1 Représentation schématique du principe d'éblouissement d'incapacité

C.2 CEN

C.2.1 Uniformités

La mesure des luminances moyennes prend en compte la chaussée et les piédroits jusqu'à une hauteur de 2 m. Les valeurs d'uniformités requises sont les suivantes :

Uniformité générale	≥ 0.4
Uniformité longitudinale	≥ 0.6

C.2.2 Luminance de piédroit

Tout comme pour la méthode CIE, les piédroits sont considérés comme une partie de l'environnement de fond sur lequel les conducteurs vont détecter les obstacles éventuels. La qualité d'éclairage attendue est cependant plus stricte que celle recommandée par la CIE dans son document de 2004, puisque la luminance moyenne des piédroits jusqu'à une hauteur de 2 m doit être au moins égale à celle de la chaussée sur la section transversale correspondante.

C.2.3 Paramètre de qualité de contraste

Aucune recommandation particulière n'est faite pour le paramètre de qualité de contraste, seules des valeurs typiques attendues pour les différentes installations existantes sont présentées (0.15 pour les installations symétriques et 0.6 pour les installations contre-flux).

C.2.4 Effet Flicker

Le CEN fait état de la problématique pouvant survenir pour une fréquence de Flicker comprise entre 4 et 11 Hz, mais il s'agit uniquement d'une mise en garde et aucune recommandation ne porte sur cette plage spécifique de fréquence. En revanche, des indications spécifiques sont données pour les « sources lumineuses compactes présentant des forts gradients de répartition de l'intensité lumineuse » (Les sources SHP équipés de systèmes optiques sont donnés en exemple dans le document, les sources LEDs n'étaient pas réellement présentes sur le marché au moment de la sortie de la norme européenne pour être mentionnées mais elles rentrent également dans cette catégorie) (CEN 2006). Pour ce type de sources, il est donc nécessaire de faire en sorte que les installations ne génèrent pas une fréquence de Flicker comprise entre 2.5 et 15 Hz pendant plus de 20 secondes.

C.2.5 Eblouissement d'incapacité

La formule du TI proposée par le CEN est exactement la même que celle mentionnée précédemment dans la partie CIE. Les valeurs à respecter en fonction des zones d'éclairage considérées sont exactement les mêmes que celles stipulées par la CIE.

C.3 CETU

C.3.1 Uniformités

Les uniformités sont évaluées seulement sur la chaussée pour le CETU, les valeurs recommandées sont les suivantes :

	Plein régime	Régime minimal
Uniformité générale	≥ 0.5	≥ 0.4
Uniformité longitudinale	≥ 0.8	≥ 0.65

C.3.2 Luminance de piédroit

La luminance des piédroits n'est pas prise en compte par le document du CETU (CETU 2000). Seules les valeurs d'éclairement à 1 m au-dessus de la chaussée sont mesurées, elles ne doivent pas être inférieures à 0.4 fois la valeur moyenne d'éclairement mesurée sur la section transversale de chaussée correspondante.

C.3.3 Paramètre de qualité de contraste

Les recommandations du CETU concernant ce paramètre portent uniquement sur les installations à contre-flux : ces-dernières doivent présenter un paramètre de qualité de contraste au moins égal à 1 lorsque la mesure est réalisée à puissance maximale de l'installation d'éclairage, et au moins égal à 0.6 lorsque la puissance de l'installation est à son minimum (hors éclairage de sécurité).

C.3.4 Effet Flicker

Les problèmes liés à l'effet Flicker ne sont pas abordés dans le document du CETU.

C.3.5 Eblouissement d'incapacité

Le CETU est plus restrictif que les autres organismes en ce qui concerne la limitation de l'éblouissement d'incapacité. Il recommande de conserver une valeur de TI inférieure à 10% pour toutes les zones d'éclairage du tunnel exceptée la zone de sortie pour laquelle aucune recommandation particulière n'est faite. Cette valeur de 10% était initialement valable pour toutes les technologies sur le marché mais l'arrivée de la LED, jugée très fréquemment plus éblouissante que les sources traditionnelles, a amené l'organisme à imposer une valeur limite plus faible pour cette technologie (8%). Cette valeur a été choisie empiriquement à la suite de l'arrivée de la solution LED sur le marché.

Annexe D : Caractérisation des propriétés de réflexion du revêtement de chaussée en éclairage routier

Le passage des niveaux de luminance sur la chaussée aux niveaux d'éclairement, ou inversement, ne peut se faire qu'en connaissant les propriétés photométriques de l'enrobé présent dans le tunnel. Dans l'idéal, il s'agirait donc de réaliser un carottage sur site afin d'analyser l'échantillon en laboratoire et de déterminer sa BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) complète afin de connaître très précisément ses propriétés de réflexion exactes. En pratique, le prélèvement d'échantillons sur site n'est pas aisé et est parfois même impossible : il convient alors de se raccrocher à des échantillons de référence. Ceux utilisés par la plupart des acteurs du milieu des tunnels, voire plus généralement du domaine routier, sont les échantillons présentés dans les tables R de la CIE. Cette classification d'échantillons s'appuie sur un coefficient de luminance moyenne (Q_0) et sur un coefficient de spécularité (S_1). Le premier coefficient rend compte de la clarté de la surface (augmente avec la réflexion diffuse) tandis que le second caractérise l'aptitude du revêtement à réfléchir la lumière dans une direction donnée (augmente avec la réflexion spéculaire). Ces propriétés de réflexion différentes sont détaillées en Figure 1. La définition de Q_0 et S_1 repose sur deux notions de « coefficient de luminance » (noté q) et de « coefficient réduit de luminance » (noté r). Ces deux coefficients prennent tout un ensemble de valeur pour une position donnée de l'observateur, ils sont définis comme suit :

$$q(\gamma, \beta) = \frac{L_{ch_{int}}(\gamma, \beta)}{E(\gamma, \beta)} \quad [1]$$

$$r(\gamma, \beta) = q(\gamma, \beta) \cos^3 \gamma \quad [2]$$

Avec $q(\gamma, \beta)$ le coefficient de luminance ($\text{cd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$) ;

$L_{ch_{int}}(\gamma, \beta)$ la luminance mesurée sur la chaussée au point de mesure défini par les angles γ et β (cd.m^{-2}) ;

$E(\gamma, \beta)$ l'éclairement mesuré sur la chaussée au point de mesure défini par les angles γ et β (lx) ;

$r(\gamma, \beta)$ le coefficient réduit de luminance ($\text{cd.m}^{-2}.\text{lux}^{-1}$) ;

γ et β les angles tels que définis en Figure 2.

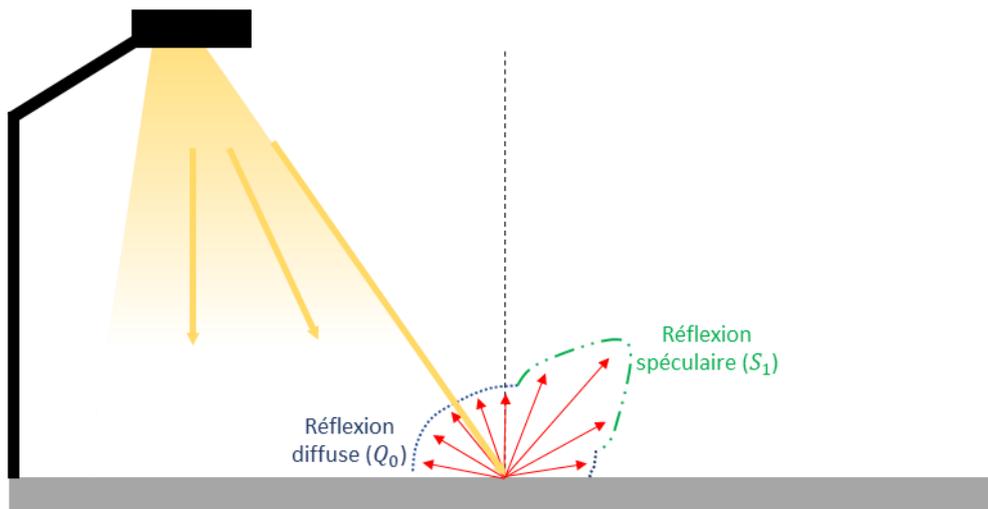


Figure 1 Exemple de réflexion de la lumière sur une chaussée, représentation de l'influence de Q_0 et S_1

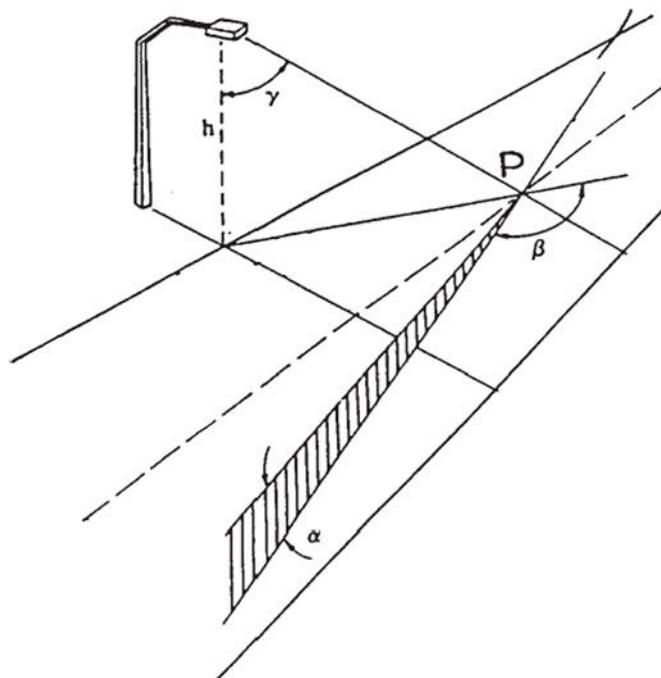


Figure 2 Schéma des angles de mesure utilisés pour la création des tables R de la CIE (Khan et al. 1999)

Il est à noter que l'angle d'observation α pris en compte pour l'évaluation de la luminance (servant notamment au calcul du coefficient de luminance), pour les différentes valeurs de γ et β , est toujours pris égal à 1° par convention.

Les coefficients Q_0 et S_1 sont ensuite définis par :

$$Q_0 = \frac{\iint a(\gamma, \beta) d\gamma d\beta}{\iint d\gamma d\beta} \quad [3]$$

$$S_1 = \frac{r(\beta=0, \tan \gamma=2)}{r(\beta=0, \tan \gamma=0)} \quad [4]$$

Le coefficient Q_0 consiste donc à réaliser une moyenne des valeurs prises par $q(\gamma, \beta)$, qui est homogène à un coefficient de réflexion diffus, pour tous les angles γ et β possibles.

Le coefficient S_1 revient à tester le rapport $\frac{L}{E}$ (multiplié par un cosinus) en deux positions extrêmes ($\gamma = 0^\circ$ et $\gamma = 63^\circ$) pour un observateur regardant en direction du luminaire. On analyse donc ce rapport juste en dessous de la source de lumière, puis pour un angle d'ouverture relativement élevé : une grande différence entre les deux rapports $\frac{L}{E}$ ainsi calculés mettra en exergue une forte spécularité de la chaussée.

Au final, 4 types de revêtements définis par les tables R sont principalement utilisés par les concepteurs, leurs caractéristiques sont présentées en Tablea. Il est à noter que les tables R sont en cours de révision par plusieurs groupes de travail afin de redéfinir les revêtements typiques pouvant être rencontrés en éclairage routier. Plusieurs études ont en effet montré que ceux actuellement présentés dans les tables R étaient loin d'être exhaustifs et représentatifs de la réalité du terrain (notamment projet EMPIR Surface).

Tableau 1 Types de revêtements CIE principalement utilisés par le CETU pour le dimensionnement de l'éclairage des tunnels (CETU 2000)

Revêtement standard de chaque classe CIE	Q_0	S_1
R_1	0.1	0.25
R_2	0.07	0.58
R_3	0.07	1.11
R_4	0.08	1.55

Pour visualiser la nature de ces différents revêtements, R_1 fera généralement référence à un béton de ciment, R_2 à un béton bitumineux, R_3 à un béton de ciment sombre, R_4 à un enrobé drainant sombre et spéculaire.

Ainsi, dans la plupart des études de dimensionnement, la chaussée est assimilée à un revêtement de référence dont les propriétés de réflexion ne reflètent pas nécessairement celles du matériau réel.

Il est à noter que les règles de dimensionnement de l'éclairage présentées tout au long de cette section, au moins pour une partie d'entre-elles, ont été établies en se basant sur des résultats expérimentaux obtenus par la communauté scientifique. Ces règles sont donc

partiellement dépendantes des conditions d'expérimentation de l'époque : il convient de s'y intéresser afin de vérifier que les avancées technologiques récentes et les éventuels changements de pratique n'invalident pas le fondement même de ces règles.

Annexe E : Fonctions colorimétriques de l'observateur CIE 1931 de référence

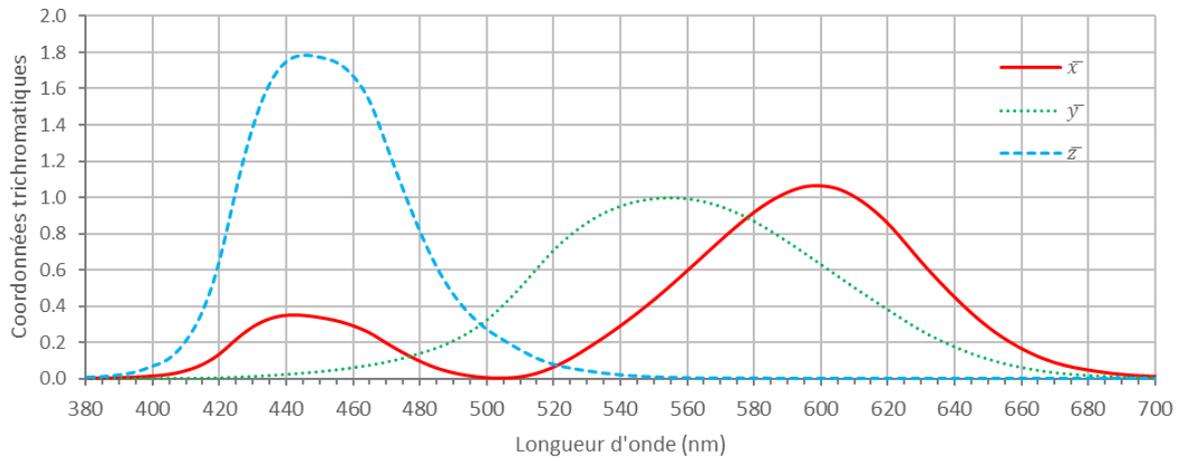


Figure 1 Fonctions colorimétriques de l'observateur CIE 1931 de référence

Annexe F : Dispositifs de mesure

Cette annexe présente les dispositifs de mesure utilisés pour le travail de thèse. Les étapes de calibration des différents appareils et dispositifs sont notamment présentés ci-après.

F.1 Mesure de BRDF spectrale avec le Banc REFLET

La méthode de correction spectrale consistait à utiliser le facteur de réflexion spectral du matériau considéré (mesuré à l'aide du spectroradiomètre JETI 1211 UV en lumière naturelle, selon la méthode présentée en section **2.2.2.1 Maquette** et de remplacer chacune des distributions spectrales du Banc REFLET obtenues pour les différentes valeurs d'angles d'incidence de source et d'observation par la distribution typique de ce facteur de réflexion, ajustée de la manière présentée ci-après.

La première étape a été de transformer les valeurs spectrales obtenues avec le Banc REFLET en valeurs de BRDF spectrale. Pour rappel, les valeurs sorties par le dispositif étaient de la forme $\frac{S_{m_{\theta_{in},\theta_{out},\varphi_{out},\lambda}}}{S_{ref_{\theta_{in},\theta_{out},\varphi_{out},\lambda}}}$ avec $S_{m_{\theta_{in},\theta_{out},\varphi_{out},\lambda}}$ le signal mesuré pour le matériau et $S_{ref_{\theta_{in},\theta_{out},\varphi_{out},\lambda}}$ le signal de référence obtenu lors de la mesure du spectralon (matériau diffusant de référence). Ces deux signaux correspondent à la mesure d'une intensité lumineuse. Pour simplifier, on notera S_m et S_{ref} dans la suite afin de ne pas surcharger les équations. On avait alors :

$$S_m = L_m(\theta_{out}, \varphi_{out}) A_{mesure} \cos \theta_{out} \quad [1]$$

$$S_{ref} = L_{ref} A_{mesure} \quad [2]$$

Avec $L_m(\theta_{out}, \varphi_{out})$ la luminance mesurée sur le matériau dans la direction définie par les angles θ_{out} et φ_{out} (cd.m^{-2}) ;

A_{mesure} la surface de mesure du détecteur du Banc REFLET (m^2) ;

L_{ref} la luminance mesurée sur le spectralon (indépendant de la direction d'observation du fait des caractéristiques diffusantes du matériau, cd.m^{-2}).

On n'a pas de terme en $\cos \theta_{out}$ dans l'équation 2, car l'angle de mesure est proche de 0° .

En appliquant la loi de Lambert pour le spectralon, on obtient :

$$L_{ref} = \frac{\rho_{ref} E_{ref}}{\pi} \quad [3]$$

Avec ρ_{ref} le facteur de réflexion moyen du spectralon (égal à 0.98) ;

E_{ref} l'éclairement sur le spectralon pour les conditions de référence (source au zénith) (lx).

En appliquant ensuite la loi de Bouguer, on peut exprimer E_{ref} en fonction de $E_m(\theta_{in}, \varphi_{in})$, l'éclairement sur le matériau mesuré.

$$E_{ref} = \frac{I_{source}}{R^2} \quad [4]$$

$$E_m = \frac{I_{source} \cos \theta_{in}}{R^2} \quad [5]$$

Soit :

$$E_{ref} = \frac{E_m}{\cos \theta_{in}} \quad [6]$$

Avec I_{source} l'intensité lumineuse de la source (cd) ;

R la distance entre la source et la surface de mesure (spectralon ou matériau à caractériser, en m).

Puis en réinjectant ces éléments dans notre équation initiale $\frac{S_m}{S_{ref}}$, on obtient :

$$\frac{S_m}{S_{ref}} = \frac{L_m(\theta_{out}, \varphi_{out})}{E_m(\theta_{in}, \varphi_{in})} \frac{\cos \theta_{out} \pi \cos \theta_{in}}{\rho_{ref}} \quad [7]$$

Et finalement :

$$BRDF_{\lambda}(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out}) = \frac{S_m}{S_{ref}} \frac{\rho_{ref}}{\cos \theta_{out} \pi \cos \theta_{in}} \quad [8]$$

Cette expression pose néanmoins un problème pour les angles rasants (θ_{in} ou $\theta_{out} = 90^\circ$ [180]) puisqu'on réalise dans ce cas une division par 0. Afin d'éviter cette situation, deux méthodes palliatives sont appliquées (comme pour la correction des BRDF en intensité, voir section **3.3.1.2 Propriétés de réflexion spectrales et directionnelles des matériaux** :

- θ_{in} est fixé à 89° et non 90° dans le calcul de la BRDF pour la dernière position de la source.
- Une décroissance linéaire des valeurs de BRDF spectrale est forcée pour les angles θ_{out} rasants. En pratique, la distribution spectrale obtenue pour $\theta_{out} = -84^\circ$ est prise en référence pour chaque φ_{out} pris en compte dans les mesures et une décroissance linéaire est appliquée sur chacune des valeurs spectrales jusqu'à ce qu'elles atteignent toutes 0 pour $\theta_{out} = -90^\circ$ (la décroissance est faite pour chaque valeur de φ_{out} : on a une décroissance pour $\varphi_{out} = 30^\circ$, une autre pour $\varphi_{out} = 40^\circ$, etc.). On réalise le même procédé entre $\theta_{out} = 84^\circ$ et $\theta_{out} = 90^\circ$.

Une fois les valeurs de sortie du Banc REFLET converties en valeurs de BRDF spectrale, la deuxième étape a été de déterminer la méthode de correction à appliquer pour ajuster la distribution spectrale typique du facteur de réflexion du matériau en amplitude. Comme mentionné précédemment, la plage spectrale 530 nm – 720 nm offrait des valeurs $\frac{S_m}{S_{ref}}$ exploitables (S_m et S_{ref} étaient suffisamment éloignés du bruit produit par le système de mesure). De plus, le rapport de ces deux valeurs était quasiment constant sur toute la plage de longueur d'onde 530 nm – 720nm, pour toutes les directions d'incidence de la source et pour toutes les directions de mesure. Notre méthode a donc consisté à calculer la moyenne

des valeurs de BRDF spectrale sur cette plage de longueurs d'onde (calculées selon la méthode présentée ci-dessus) pour chacune des directions d'incidence de source et chacune des directions de mesure, ainsi que la moyenne des valeurs de facteurs de réflexion spectraux (mesure au spectroradiomètre en lumière naturelle) du matériau sur cette même plage de longueurs d'onde. Les équations 9 et 10 donnent les formules utilisées.

$$M_{BRDF_{530-720}} = \frac{\sum_{\lambda=530}^{720} BRDF_{\lambda}(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out})}{191} \quad [9]$$

Avec $M_{BRDF_{530-720}}$ la moyenne des valeurs de BRDF pour la direction d'incidence de source et la direction de mesure étudiée, sur la plage de longueurs d'onde 530 – 720 nm (sr^{-1}).

$$M_{\rho_{530-720}} = \frac{\sum_{\lambda=530}^{720} \rho_m(\lambda)}{191} \quad [10]$$

Avec $M_{\rho_{530-720}}$ la moyenne des valeurs de facteurs de réflexion spectraux sur la plage de longueurs d'onde 530- 720 nm ;

$\rho_m(\lambda)$ le facteur de réflexion spectral du matériau obtenu pour la longueur d'onde λ .

Ensuite, l'équation 11 permet de recréer une distribution spectrale complète pour la BRDF du matériau, pour les directions d'incidence de source et de mesure étudiées.

$$BRDF_{r_{\lambda}}(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out}) = \rho_m(\lambda) \frac{M_{BRDF_{530-720}}}{M_{\rho_{530-720}}} \quad [11]$$

Avec $BRDF_{r_{\lambda}}$ la BRDF recréée à partir de la distribution spectrale du facteur de réflexion du matériau considéré (sr^{-1}).

$BRDF_{r_{\lambda}}$ est calculée pour toutes les valeurs de θ_{in} , φ_{in} , θ_{out} et φ_{out} prises en compte. La forme de la distribution spectrale reste donc la même pour toutes ces conditions et seule son amplitude change, comme le montre la Figure 1. Cette tendance avait été observée sur les données spectrales initiales du Banc REFLET pour la plage de longueur d'onde 530 nm – 720 nm et a donc justifié l'utilisation de cette méthode de correction. La méthode de correction des données spectrales est résumée graphiquement en Figure 2.

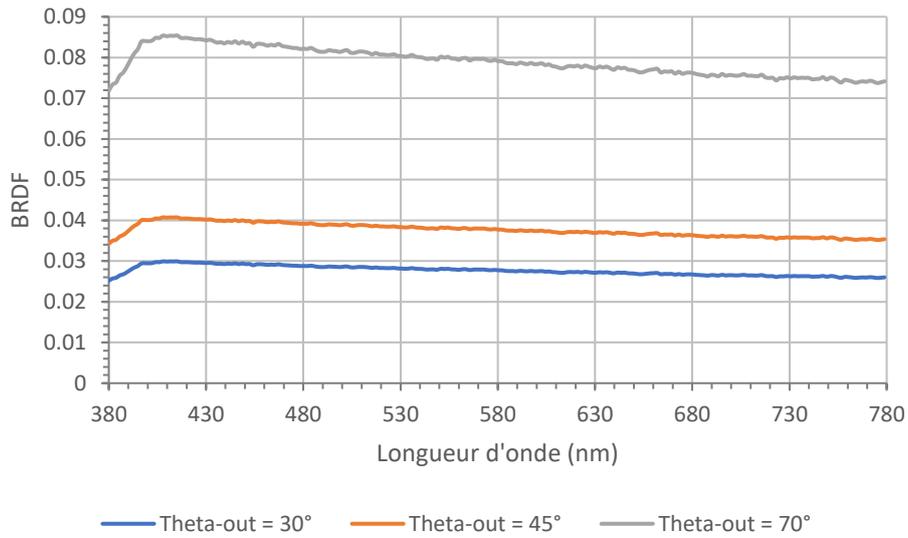


Figure 1 Exemples de BRDF issues des mesures spectrales du Banc REFLET, après correction de la distribution spectrale ($\theta_{in} = -30^\circ$, $\varphi_{in} = 0^\circ$, $\varphi_{out} = 0^\circ$)

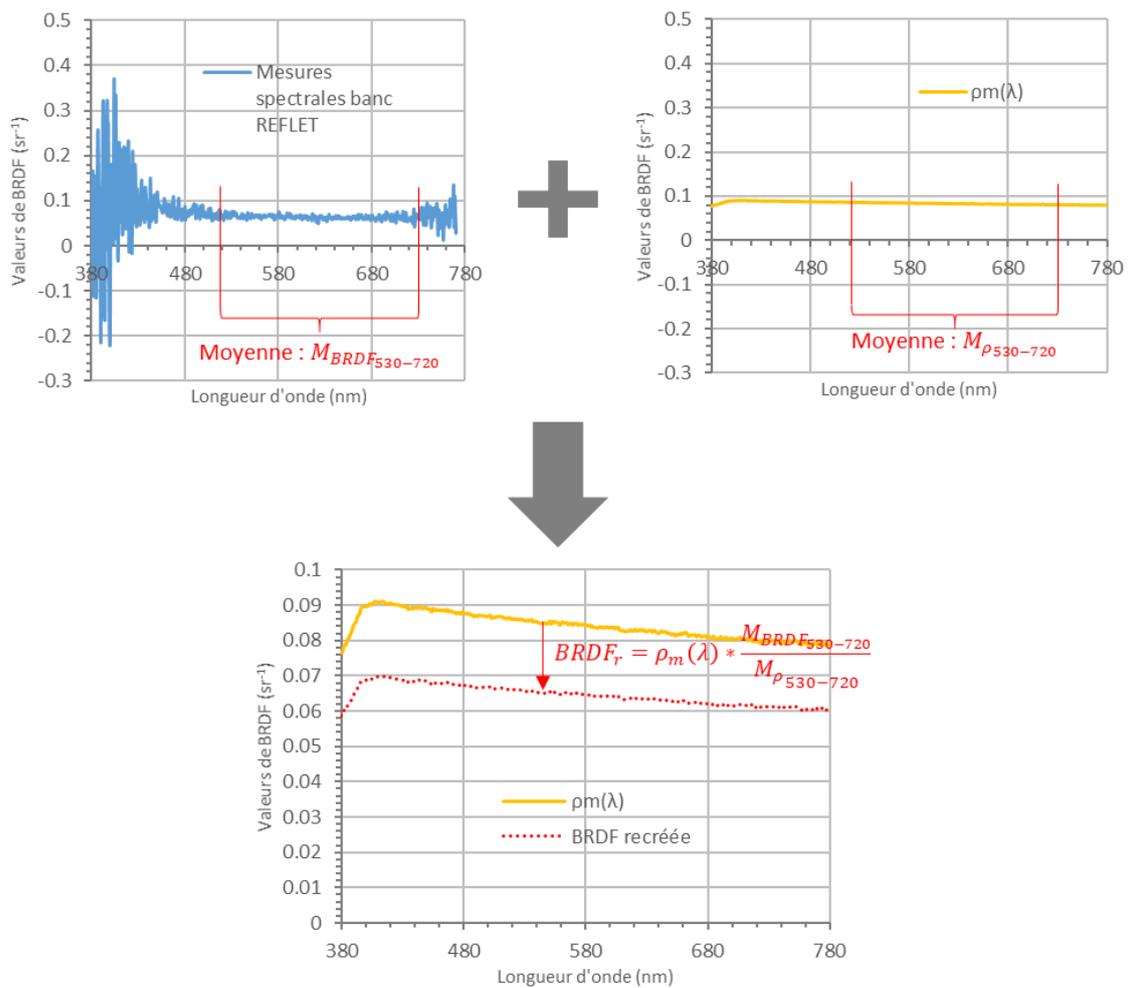


Figure 2 Résumé de la méthode de correction des données spectrales issues des mesures du Banc REFLET

F.2 Puce AMS AS7261 équipée d'un diffuseur

Les mesures d'éclairement dans la maquette se sont faites à l'aide d'une puce AS7261 de la marque AMS. Cette puce était équipée d'un diffuseur afin de s'assurer que les mesures prenaient bien en compte la lumière provenant de tout l'hémisphère centré sur la puce. En effet, le montage initial de la puce ne permettait de collecter la lumière que dans un cône de 41° (voir figure 3).

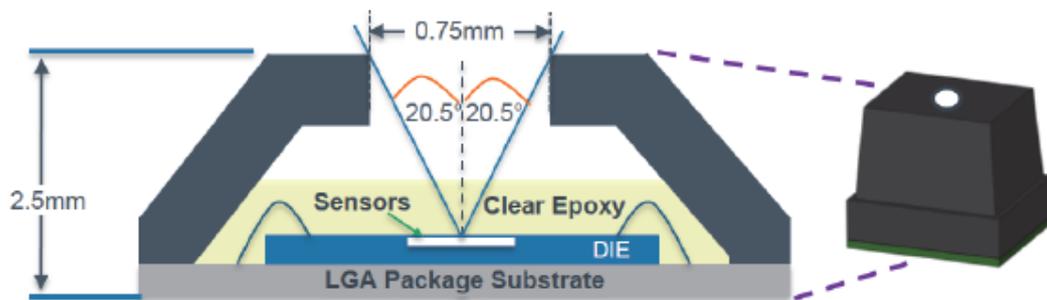


Figure 3 Champ de vision de la puce AS7261

L'ajout de ce diffuseur a imposé un nouvel étalonnage du dispositif. Pour ce faire, la puce équipée de son diffuseur a été placée sur la chaussée de la maquette au niveau du trou utilisé pour passer la tête du spectroradiomètre JETI 1211 UV (Point P, voir Figure 2-5). Une mesure a été réalisée pour les paliers d'éclairement 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 25, 30, 33, 36, 39, 42 et 45 des spectres 2000K LM, 3000K LM et 5000K LM. Cette mesure a permis de collecter 3 valeurs intitulées « X_Basic », « Y_Basic » et « Z_Basic » dans le fichier issu des mesures de la puce. Ces valeurs sont des valeurs brutes issues de la puce de mesure, un étalonnage a été nécessaire pour les convertir en véritables coordonnées trichromatiques. Ainsi, des mesures au spectroradiomètre JETI 1211 UV ont à nouveau été réalisées sur la maquette. La tête du spectroradiomètre équipée d'un diffuseur a été placée dans l'orifice prévu à cet effet, mais elle a été rehaussée par rapport aux mesures effectuées dans le cadre de l'expérience psychovisuelle afin que sa position soit sensiblement identique à celle de la puce AS7261 qui était posée sur la chaussée.

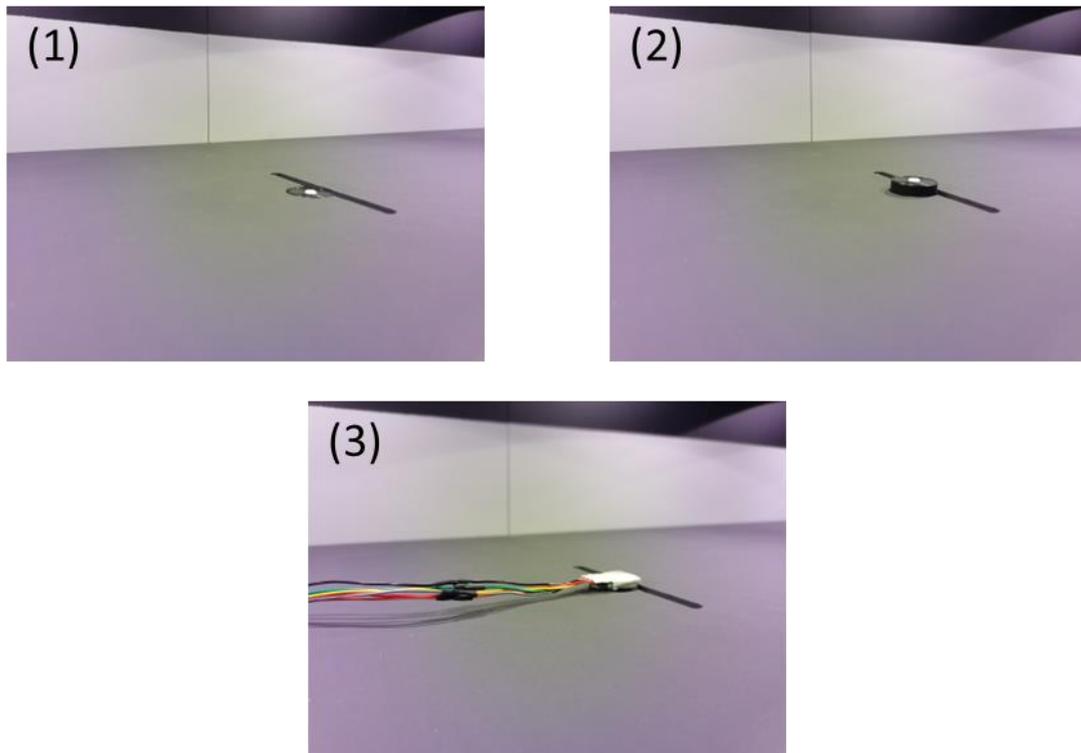


Figure 4 (1) Position du spectroradiomètre lorsque la tête diffusante est placée au niveau de la chaussée ; (2) Position de la tête diffusante du spectroradiomètre pour pouvoir comparer les mesures avec celles de la puce AMS ; (3) Position de la puce AMS pour pouvoir comparer les mesures avec celles du spectroradiomètre.

Les mêmes paliers d'éclairage des mêmes spectres que ceux présentés ci-dessus ont fait l'objet d'une mesure au spectroradiomètre. L'appareil a permis de collecter les coordonnées trichromatiques associées à chacun des stimulus lumineux mesuré. Ces valeurs ont ensuite été confrontées à celles obtenues pour les variables « X_Basic », « Y_Basic » et « Z_Basic » afin de pouvoir tracer un modèle de fonction linéaire permettant de déterminer les coordonnées trichromatiques d'un stimulus à partir des données mesurées par la puce équipée de son diffuseur. Les résultats obtenus sont présentés en Figures 4, 5 et 6.

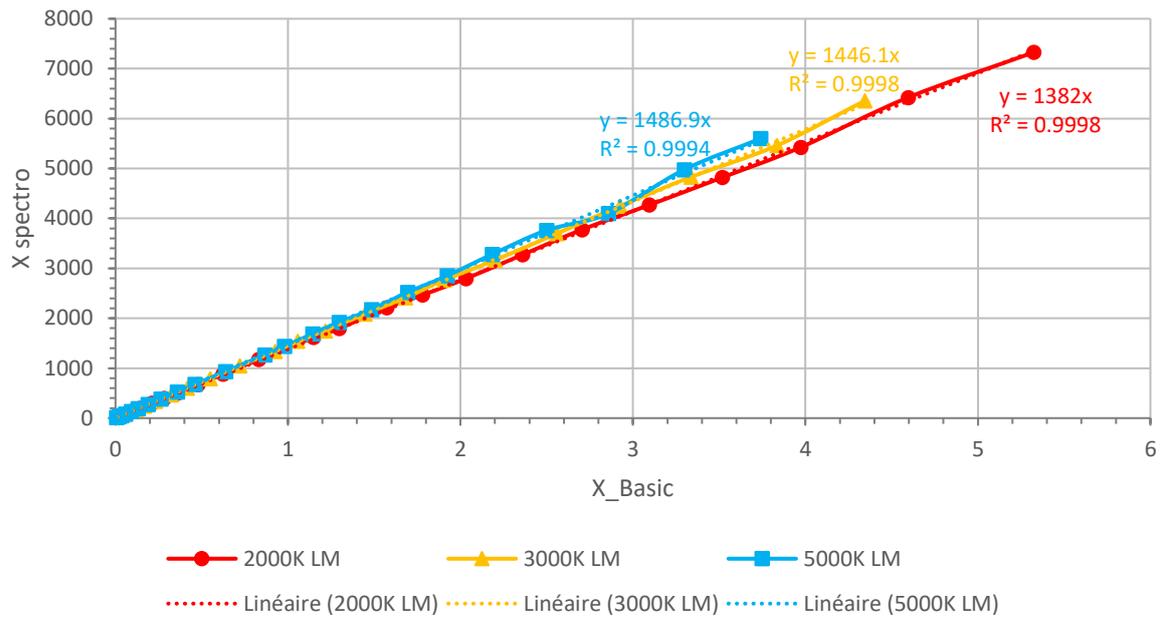


Figure 5 Modèles de transformation des valeurs « X_Basic » en coordonnées X pour les spectres 2000K LM, 3000K LM et 5000K LM

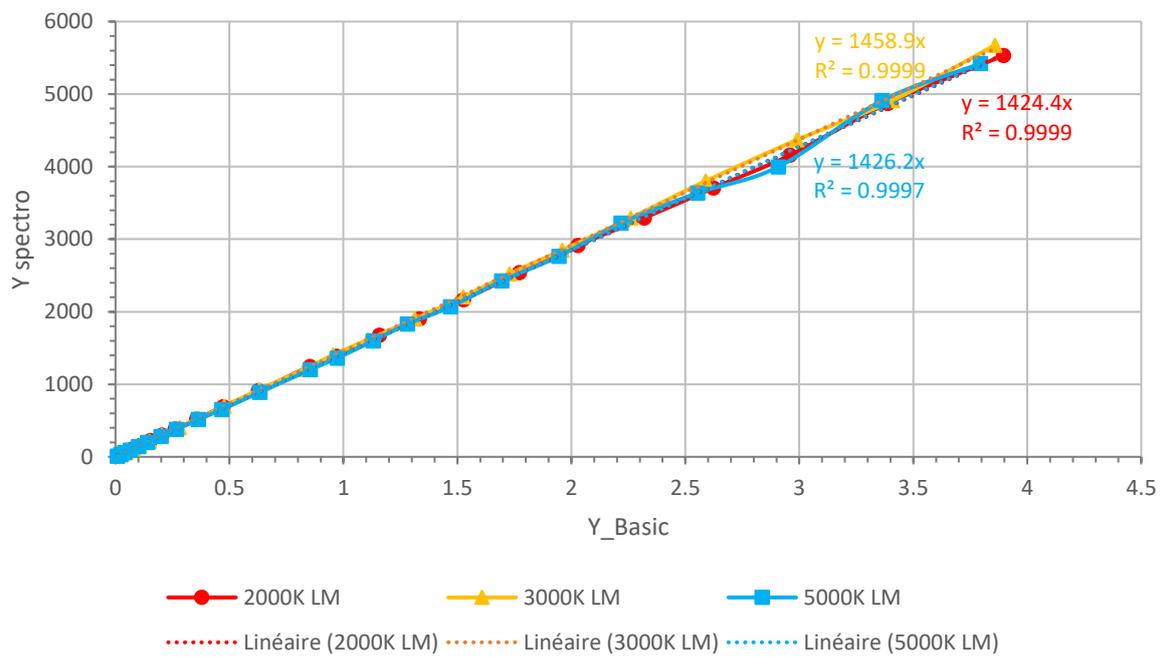


Figure 6 Modèles de transformation des valeurs « Y_Basic » en coordonnées Y pour les spectres 2000K LM, 3000K LM et 5000K LM

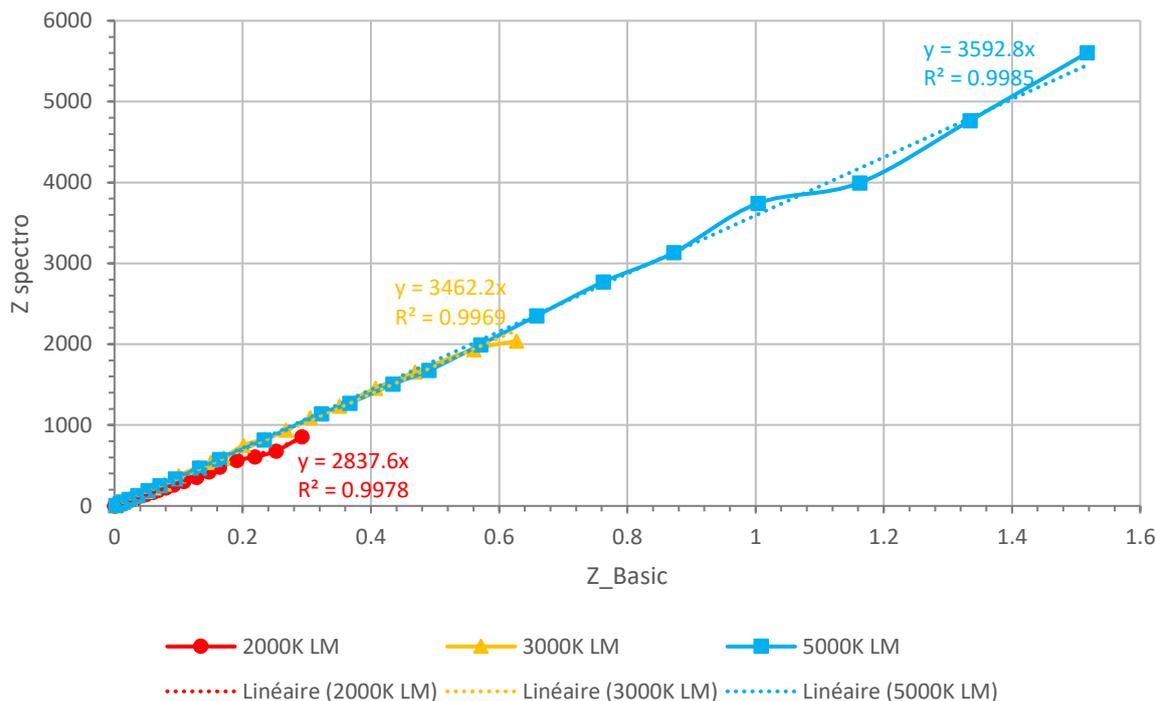


Figure 7 Modèles de transformation des valeurs « Z_Basic » en coordonnées Z pour les spectres 2000K LM, 3000K LM et 5000K LM

Une fois ces équations linéaires établies, les valeurs « X_Basic », « Y_Basic » et « Z_Basic » obtenues lors des mesures avec la puce équipée de son diffuseur pouvaient être converties en coordonnées trichromatiques pour les trois spectres 2000K LM, 3000K LM et 5000K LM. Ce sont ces valeurs converties qui sont présentées dans la section **3.3.2.3 Résultats en éclairage**.

F.3 Sphère d'Ulbricht

La sphère d'Ulbricht créée pour mesurer le flux lumineux des sources de la maquette utilise la puce AS7261 équipée de son diffuseur comme capteur d'éclairage. Un cache est mis en place afin d'éviter toute incidence directe des rayons issus de la source sur le capteur. Dans un premier temps, l'intérieur de la sphère a été peint à l'aide d'une peinture blanche mate. Des mesures de facteurs de réflexion ont ensuite été réalisées en lumière naturelle à l'aide du spectroradiomètre JETI 1211 UV (voir section **2.2.2.1 Maquette**). 3 mesures différentes ont été réalisées pour 3 directions de mesure (20° par rapport au zénith, 40° par rapport au zénith et 60° par rapport au zénith). Les valeurs de facteurs de réflexion spectraux obtenues ont été moyennées, les résultats obtenus sont présentés en figure 7.

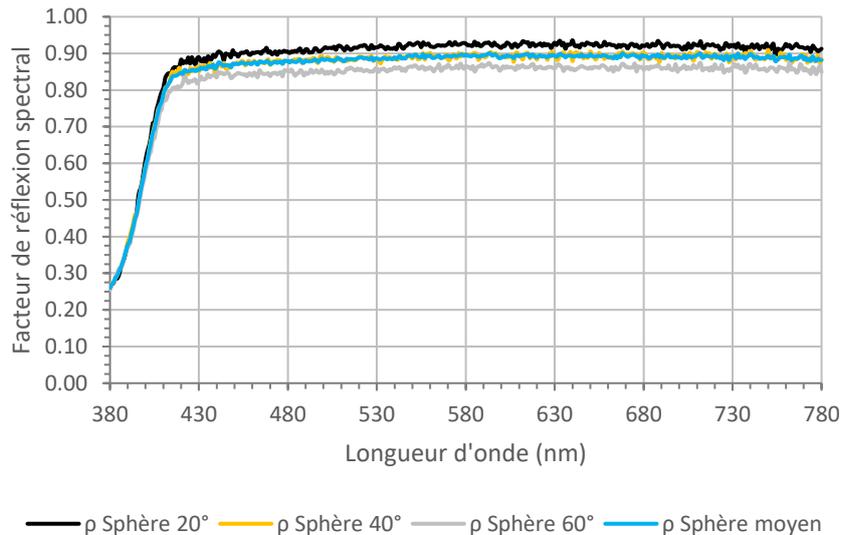


Figure 8 Facteurs de réflexion spectraux issus des mesures en lumière naturelle au spectroradiomètre

Enfin, un facteur de réflexion moyen global a pu être calculé grâce à l'équation 12, pour un spectre de source de lumière défini.

$$\rho_{moy} = \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda) f(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) f(\lambda) d\lambda} \quad [12]$$

Avec ρ_{moy} le facteur de réflexion moyen calculé ;

$V(\lambda)$ la fonction d'efficacité lumineuse photopique ;

$f(\lambda)$ la fonction de distribution spectrale de la source de lumière prise en référence ;

$\rho(\lambda)$ les facteurs de réflexion spectraux mesurés en lumière naturelle (dans le calcul final, c'est la moyenne des valeurs collectées sur les mesures à 20°, 40° et 60° qui est utilisée).

Le facteur de réflexion moyen de la sphère a ainsi été déterminé pour 7 sources de lumière de référence (Illuminant D65 de la CIE, spectre de la source 2000K LM au palier d'éclairement maximum, idem pour la source 2000K HM, 3000K LM, 3000K HM, 5000K LM et 5000K HM). La moyenne des résultats obtenus est de 0.89 et l'écart-type est de 0.0011. L'équation 13 permet ensuite d'exprimer l'éclairement mesuré par le capteur à l'intérieur de la sphère en fonction du facteur de réflexion moyen de la sphère et du flux émis par la source de lumière testée.

$$E_{TOT} = \frac{\phi}{4 \pi R^2} \sum_{k=0}^{\infty} \rho_{moy}^k = \frac{\phi}{4 \pi R^2} \frac{\rho_{moy}}{1 - \rho_{moy}} \quad [13]$$

Avec E_{TOT} l'éclairement mesuré par le capteur à l'intérieur de la sphère (lx) ;

ϕ le flux émis par la source de lumière testée (lm) ;

R le rayon de la sphère d'Ulbricht utilisée (0.099 m).

Le flux émis peut donc être calculé en isolant ϕ dans cette équation, comme indiqué dans la formule ci-dessous.

$$\phi = E_{TOT} 4 \pi R^2 \frac{1-\rho_{moy}}{\rho_{moy}} \quad [14]$$

Les paliers d'éclairage 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33, 37, 41 et 45 ont été mesurés pour les 6 spectres utilisés dans l'expérience psycho-visuelle. Les résultats sont présentés en figure 8.

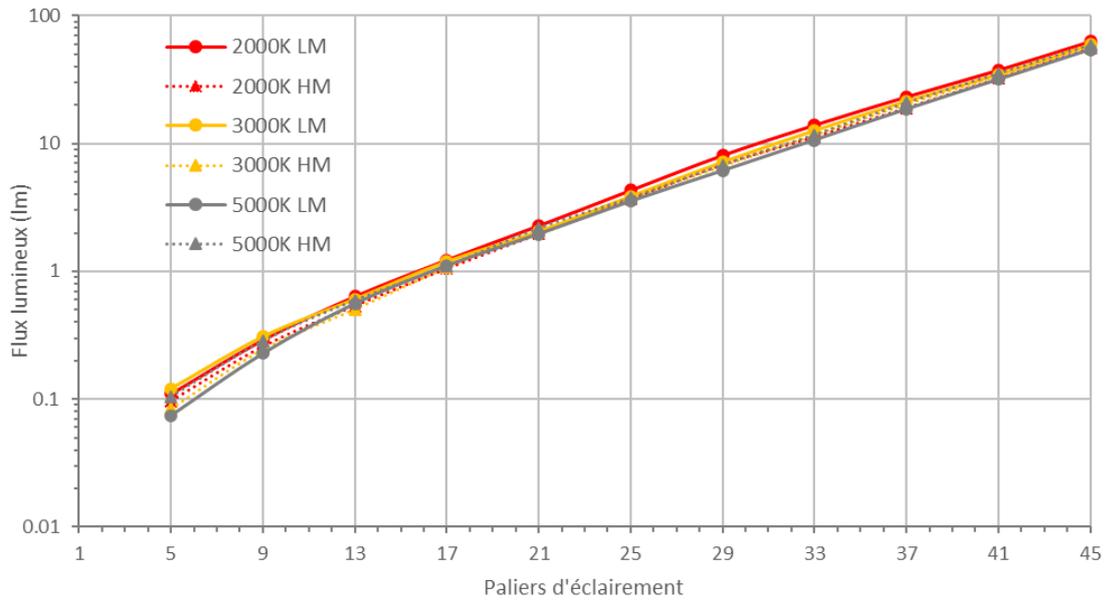


Figure 9 Flux lumineux mesuré pour une seule LED pour les différents spectres utilisés dans l'expérience en fonction du palier d'éclairage choisi

Annexe G : Calculs statistiques

Cette annexe regroupe les indicateurs statistiques utilisés tout au long du document pour quantifier les écarts obtenus entre mesures réelles et données issues de simulation.

Les indicateurs utilisés sont : l'erreur de biais moyen (Mean Bias Error = MBE) et l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error = RMSE), ainsi que leur formule relative. Le coefficient R2 de Pearson est également calculé. Toutes les formules sont indiquées ci-après.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - s_i)}{N} \quad [1]$$

Avec MBE l'erreur de biais moyen ;

m_i les données attendues ;

s_i les données mesurées ou simulées que l'on cherche à comparer avec les données attendues ;

N le nombre de données.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2}{N}} \quad [2]$$

Avec $RMSE$ l'erreur quadratique moyenne.

$$rMBE = \frac{MBE \times N}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad [3]$$

Avec $rMBE$ l'erreur de biais moyen relative.

$$rRMSE = \frac{RMSE \times N}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad [4]$$

Avec $rRMSE$ l'erreur quadratique moyenne relative.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2}} \quad [5]$$

Avec r le coefficient de corrélation de Pearson ;

\bar{m} la moyenne des valeurs m_i ;

\bar{s} la moyenne des valeurs s_i .

Annexe H : Exemple de fichier IES

IESNA:LM-63-2002

[TEST] HPS_LM

[TESTLAB]

[MANUFAC] LED ENGIN

[LUMCAT]

[LUMINAIRE] HPS-LM

[LAMP] LZ7-04M100

[BALLAST] -

[ISSUEDATE] 2021-08-27

[OTHER] B-Angle = 0.00 B-Tilt = 0.00 2021-08-27

TILT=NONE

1 1512.0 1 10 10 1 2 0.162 1.170 0.000

1.0 1.0 42.50

0.00 10.00 20.00 30.00 40.00 50.00 60.00 70.00 80.00 90.00

0.00 10.00 20.00 30.00 40.00 50.00 60.00 70.00 80.00 90.00

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

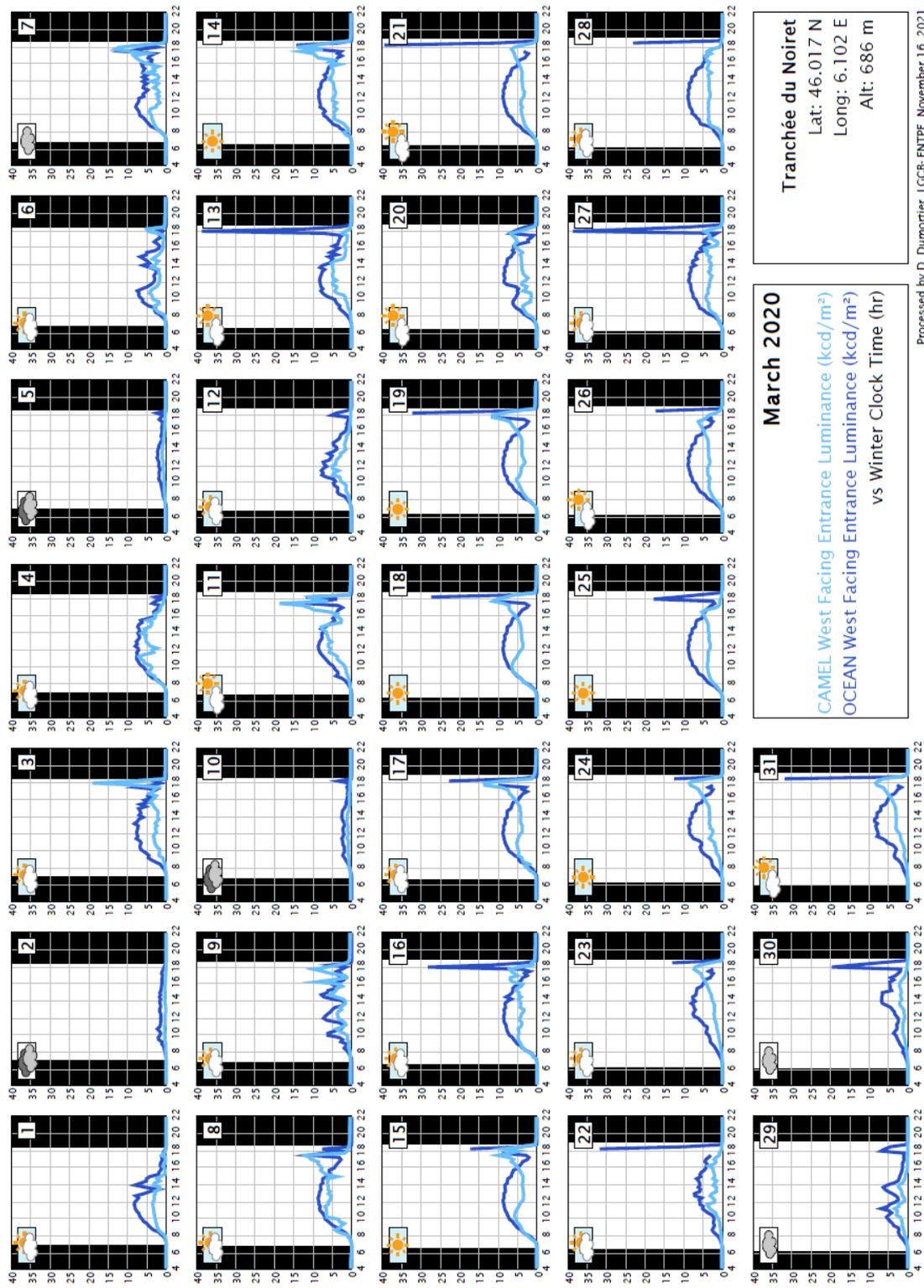
480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

480.8 473.6 461.0 434.9 392.0 329.6 246.6 149.1 53.4 0.0

Annexe I : Comparaison mensuelle des données L_{20} mesurées par CAMEL et simulées sous OCEAN pour la tranchée couverte du Noiret (mois de mars 2020)



Annexe J : Note sur la création et la validation des fichiers d'éclairage naturel (données satellitaires)

J.1 Fichier contenant les estimations satellitaires Helioclim 3 (fichier .hc3)

L'utilitaire utilisé pour effectuer la requête est `wget.exe` (informations et téléchargement sur <http://www.gnu.org/software/wget/>). La commande qui permet d'obtenir les données météo provenant de `soda-is.com` (http://www.soda-is.com/pub/hc3v4_request.php) contient les éléments suivants :

- A. Geopoint (latitude, longitude) - from -66,-66 to 66,66.
- B. Elevation - Elevation of the site in m, or -999 to determine automatically.
- C. Start date - From 2004-02-01 to today (yyyy-mm-dd)
- D. End date - From start date to today (yyyy-mm-dd).
- E. Duration - m, w, d, h or mn (mn peut être égal à 1, 5, 10, 15...).
- F. Time - UTC* (Universal Time) or TST (True Solar Time)
- G. Slope - Tilt of the plane from 0° (horizontal) to 90°, -999 for normal plane.
- H. Azimuth - Azimuth of the plane in degrees from 0 (North), 90 (East), 180 (South) to 270 (West) (-999)
- I. Albedo - From 0.0 to 1.0

Il nous faut récupérer des données Helioclim-3 pour le site de la station IDMP de l'ENTPE à Vaulx-en-Verin (Lat: 45.78 N, Long: 4.92 E, 170 m), pour le site de la tranchée du Noiret à Cruseilles (Lat. : 46.016 Long : 6.106 E, 699 m) et pour le site du tunnel d'Antony (Lat. : 48.763 Long : 2.311 E, 52 m).

A titre d'exemple, la commande utilisée pour récupérer les données pour le site de la tranchée du Noiret est la suivante :

```
wget.exe -O 46.016N_6.106E_2021_2021.hc3 --proxy=on http://www.soda-is.com/pub/hc3v4\_request.php?geopoint=46.016,6.106&elevation=-999&horizon=1&firstday=2021-01-01&lastday=2021-12-31&duration=15&time=TU&slope=-999&azimuth=-999&albedo=0
```

Comme on peut le voir ci-dessous, le fichier .hc3 envoyé par la requête contient les valeurs sur le plan incliné demandé mais aussi les valeurs sur un plan horizontal. Ce sont les valeurs horizontales qui nous intéressent avant tout.

- A. year
- B. number of the month in the year
- C. number of the day in the month
- D. decimal hour in the day (from 0.25 to 24.00)
- E. direct inclined irradiation averaged over period in Wh/m² (-999 no data)
- F. diffuse inclined irradiation averaged over period in Wh/m² (-999 no data)
- G. reflected inclined irradiation averaged over period in Wh/m² (-999 no data)
- H. global inclined irradiation averaged over period in Wh/m² (-999 no data) => sum of the three previous data (direct + diffuse + reflected = global)
- I. direct horizontal irradiation averaged over period in Wh/m² (-999 no data)
- J. diffuse horizontal irradiation averaged over period in Wh/m² (-999 no data)
- K. global horizontal irradiation averaged over period in Wh/m² (-999 no data) => sum of the two previous data (direct + diffuse = global)
- L. downwards irradiance averaged over period at the top of the atmosphere (extraterrestrial) in Wh/m²

Le paramètre « duration » permet de choisir l'intervalle de temps entre les données. Est-ce qu'il y a un intérêt à utiliser 1 mn (mesures de la station IDMP de l'ENTPE) plutôt que 15 mn

(fréquence des images METEOSAT) ? Le test a été effectué sur les données HC3 pour les coordonnées de la station IDMP (45.78N, 4.92E). Nous avons choisi deux jours de juin 2019 : le 13 juin (ciel bleu) et le 15 juin (ciel partiellement couvert). **L'heure utilisée pour les données HC3 a été modifiée pour représenter non pas l'heure de fin de la période, mais l'heure du milieu de période.** Nous avons également utilisé les mesures de la station IDMP de Vaulx-en-Velin pour comparaison. La résolution des mesures IDMP est d'1 mn par défaut, mais nous avons aussi ajouté les moyennes sur 15 mn.

Les résultats sont présentés pour les deux jours dans les figures 1 et 2 respectivement. Chaque figure contient 3 graphes qui représentent chacun l'éclairement énergétique global, diffus et direct horizontal. **Les deux figures montrent que dès lors que l'heure à laquelle les données HC3 est bien recentrée sur la période, il y a une bonne correspondance entre les valeurs à 1mn, 5mn, 10mn ou 15 mn.** Il est donc préférable d'effectuer ce changement lors du premier traitement des données HC3.

Compte tenu du fait que les images satellites sont obtenues toutes les 15 minutes, nous choisissons cet intervalle de temps pour la résolution des fichiers HC3. Il faut se rappeler bien sûr que le pixel de l'image de METEOSAT qui couvre le site de latitude et de longitude donné n'est pas vu exactement à l'instant correspondant au centre de la période de 15 mn, la donnée est ajustée.

Cette première comparaison entre les mesures de la station IDMP et les données Helioclim sur deux journées met déjà en évidence les différences observables entre les estimations par satellite et les mesures au sol. Sous les conditions ensoleillées du 13 juin, 2019, l'éclairement énergétique global de HC3 est bien au niveau des mesures IDMP. Par contre, la répartition entre diffus et direct est bien différente. Le diffus de HC3 est quasiment 3 fois plus élevé que celui de l'IDMP, ce qui signifie qu'HC3 pour modéliser le diffus considère une atmosphère plus troublée ce jour-là que ce qui a été observé. Pour les mêmes raisons, le direct modélisé par HC3 est plus faible que celui mesuré. **Sous les conditions intermédiaires du 15 juin 2019 : ciel bleu avec des masses nuageuses,** HC3 reproduit le profil général de variation des éclaircissements globaux et diffus, sans toutefois pouvoir reproduire les pics observés localement et liés aux réflexions du soleil sur les masses nuageuses. C'est là la limite des estimations satellitaires. De ce fait, HC3 ne peut pas reproduire correctement les variations instantanées de l'éclairement direct.

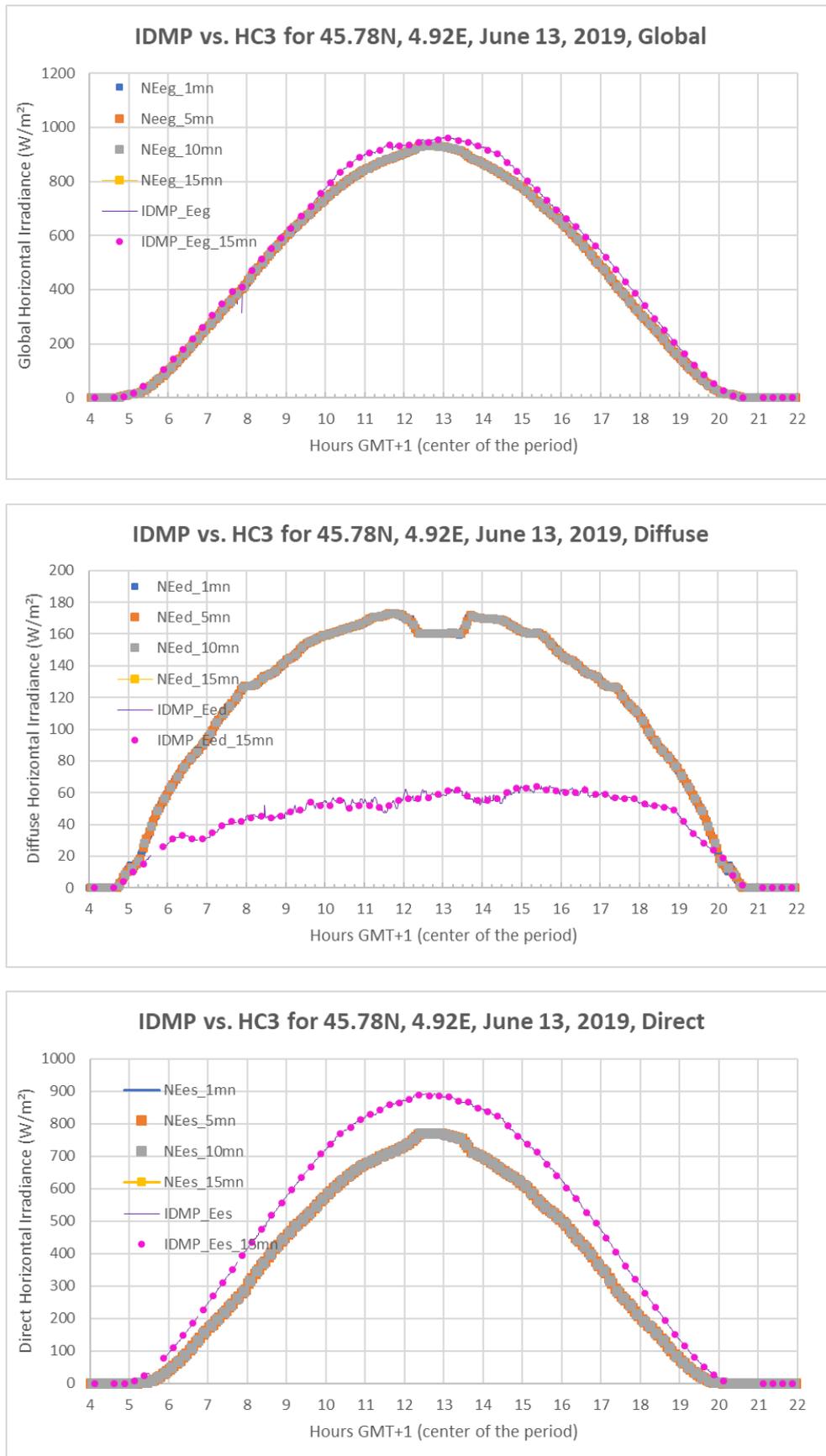


Figure 1 Comparaison entre les mesures IDMP des éclaircements horizontaux global, diffus, direct et leurs estimations HC3 à différentes résolutions (1mn à 15 mn), le 13 juin 2019.

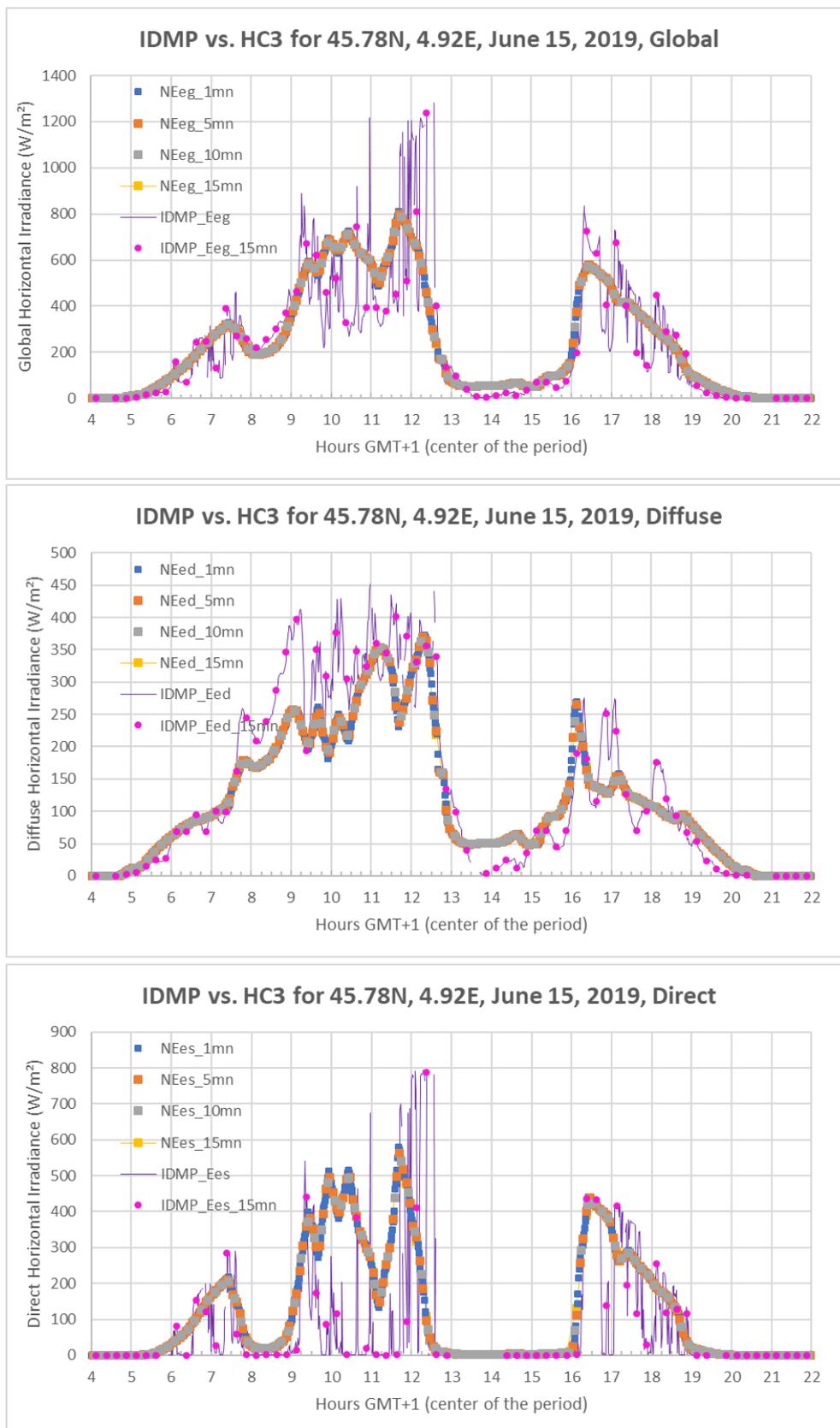


Figure 2 Comparaison entre les mesures IDMP des éclairagements horizontaux global, diffus, direct et leurs estimations HC3 à différentes résolutions (1mn à 15 mn), le 15 juin 2019.

Sur les deux années 2019 et 2020, nous avons utilisé une représentation en calendriers mensuels pour comparer visuellement les éclairagements énergétiques produits par HC3 toutes les 15 mn aux mesures IDMP moyennées sur la même période de 15 mn.

Il en ressort que HC3 reproduit la dynamique de variation du rayonnement solaire plutôt bien. Par contre, il a tendance à considérer **un trouble atmosphérique trop élevé pour le site de Vaulx-en-Velin**, la conséquence est que pour les ciels ensoleillés, si le global est plutôt bien, la répartition diffus/direct l'est moins : le diffus est surestimé alors que le direct est sous-estimé. La base de données HC3 ne permet pas de récupérer la valeur du trouble utilisé à une certaine période de l'année. **Pour les conditions de ciel avec quelques masses nuageuses, HC3 sous-estime le rayonnement global, diffus et direct** car il n'a pas les moyens de prédire l'augmentation du rayonnement solaire lié aux réflexions multiples entre les faces des nuages. **Enfin pour les conditions de ciel couvert, HC3 a tendance à surestimer la présence d'éclairement direct** ce qui contribue à surestimer le global (le diffus est plutôt juste).

J.2 Fichier contenant les coefficients du modèle de luminance de Perez (.asrc)

Le programme `readHC3FileWriteASRCFile` écrit en java produit ce fichier (extension `.asrc`) à partir du fichier de données Helioclim 3 (extension `.hc3`). Ce fichier est un fichier intermédiaire, il contient toutes les 15 mn, les éclairagements lumineux calculés à partir des éclairagements énergétiques en utilisant les modèles d'efficacité lumineuse diffuse et directe de Perez ainsi que les coefficients nécessaires pour calculer les luminances du ciel à partir du modèle de luminance de ciel ASRC de Perez : ce modèle calcule les luminances du ciel par interpolation des luminances de 4 modèles de ciel : CIE ciel couvert, Nakamura ciel intermédiaire, CIE ciel bleu trouble (dit de Gusev) et CIE ciel bleu pur (dit de Kittler).

Le fichier `.asrc` contient les informations suivantes :

- A.** Sun altitude.
- B.** Sun azimuth (North:0, East:90, South: 180, West: 270).
- C.** Global horizontal illuminance, sum of the diffuse and the direct horizontal illuminances.
- D.** Diffuse horizontal illuminance computed from Perez Luminous Efficacy models.
- E.** Direct horizontal illuminance computed from Perez Luminous Efficacy models.
- F.** Global horizontal irradiance from Helioclim 3.
- G.** Diffuse horizontal irradiance from Helioclim 3.
- H.** Direct horizontal irradiance from Helioclim 3.
- I.** Perez sky clearness (epsilon) computed from Helioclim 3 defining sky index.
- J.** Perez sky brightness (delta) computed from Helioclim 3 used with epsilon to define the coefficients of interpolation between sky models.
- K.** ASRC_Sky_Index, integer from 1 to 3 used by the ASRC Perez sky luminance model: 1 (epsilon <= 1.4, interpolation between an overcast and an intermediate), 2 (1.4 < epsilon <= 3.0, interpolation between an intermediate and a turbid blue), 3 (epsilon > 3.0, interpolation between a turbid blue and a clear blue).
- L.** ASRC_Sky_Coeff, coefficient used to interpolate luminances between the two skies defined by the index, the coefficient is applied to the luminances of the upper sky defined by the index, 1-coeff is applied to the ones of the lower sky defined by the index.

Dans ce fichier, l'éclairement lumineux diffus horizontal est le produit de l'efficacité lumineuse diffuse du modèle de Perez et de l'éclairement énergétique diffus horizontal HC3. L'éclairement lumineux direct horizontal est le produit de l'efficacité lumineuse directe du modèle de Perez et de l'éclairement énergétique direct horizontal HC3. L'éclairement lumineux global est la somme des éclairement diffus et directs.

Les éclairements lumineux diffus et global calculés toutes les 15 minutes ont été comparés aux valeurs moyennes sur 15 mn des mesures de la station IDMP sur les deux années 2019 et 2020. L'éclairement lumineux direct n'est pas mesuré sur la station IDMP. La comparaison s'est d'abord faite visuellement sur les représentations graphiques en calendriers mensuels montrant les variations au jour le jour. **Elle montre qu'il n'y a pas de dégradation des résultats liés à l'utilisation des modèles d'efficacité lumineuse de Perez, il y a plutôt une amélioration sur le global pour des conditions ensoleillées. Ceci valide l'utilisation des modèles d'efficacité lumineuse diffuse et directe de Perez.**

Pour compléter les observations visuelles au jour le jour, nous avons calculé l'erreur entre les estimations et les mesures (estimations moins mesures). Le tableau 1 donne l'erreur moyenne (MBE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ainsi que leurs valeurs relatives (rMBE et rRMSE) calculées par rapport à la valeur moyenne des mesures. Le coefficient de corrélation de Pearson (R2) a aussi été calculé.

Tableau 1 Statistiques de comparaison entre les estimations et les mesures, 2019-2020, Vaulx-en-Velin

	COUNTS	MEAN	MBE	RMSE	RMBE	RRMSE	R2
Eeg	34114	325 W/m ²	2 W/m ²	74 W/m ²	0 %	23 %	0.96
Eed	34112	105 W/m ²	16 W/m ²	49 W/m ²	16 %	47 %	0.83
Ees	33955	206 W/m ²	0 W/m ²	87 W/m ²	0 %	42 %	0.94
Evg	34097	34292 lux	1320 lux	7694 lux	4 %	22 %	0.97
Evd	30363	14504 lux	938 lux	5423 lux	6 %	37 %	0.87

Le tableau 1 confirme ce qui avait été observé par les comparaisons au jour le jour, l'éclairement énergétique global est plutôt bien restitué par les estimations satellites l'erreur moyenne est de 0% et l'erreur quadratique moyenne de 23%, ce qui est représentatif des comparaisons qui ont pu être faites sur d'autres sites en Europe (Final report of the Heliosat-3 EU Project NNE5-2000-00413, J. Betcke et al., January 2006). La corrélation est bonne avec un R2 de 0.96. Comme souligné précédemment, l'estimation de l'éclairement énergétique diffus est moins bonne : elle surestime l'éclairement (MBE de +16%), le coefficient de corrélation n'est qu'à 0.83. Dans la base de données Helioclim 3, le direct est calculé par différence entre les estimations du global et du diffus. Les observations au jour le jour ont montré que par ciel couvert, le direct était surestimé, mais que par ciel bleu il était sous-estimé : au final, pour le climat de Vaulx-en-Velin, les écarts positifs et négatifs s'équilibrent

pour conduire à une erreur moyenne relative de 0%, mais avec une erreur quadratique moyenne relative élevée de 42%.

L'utilisation des modèles d'efficacité lumineuse conduit à une surestimation de l'éclairement lumineux global de 4% tout en préservant l'erreur quadratique moyenne relative observée sur l'éclairement énergétique global (22% proche de 23%). L'estimation de l'éclairement lumineux diffus est meilleure que celle de l'éclairement énergétique diffus : l'erreur moyenne relative est de 6% au lieu de 16%, l'erreur quadratique moyenne est de 37% au lieu de 47%, le coefficient de Pearson est amélioré : 0.87 au lieu de 0.83.

La figure 3 présente les nuages de points obtenus en représentant les couples d'éclairements estimés et mesurés. Pour rappel, il s'agit dans les 2 cas de valeurs moyennes sur 15 mn. La figure montre que les éclairements énergétiques provenant des estimations satellites Helioclim 3 semblent plafonnés : 930 W/m² pour le global, 370 W/m² pour le diffus et 770 W/m² pour le direct.

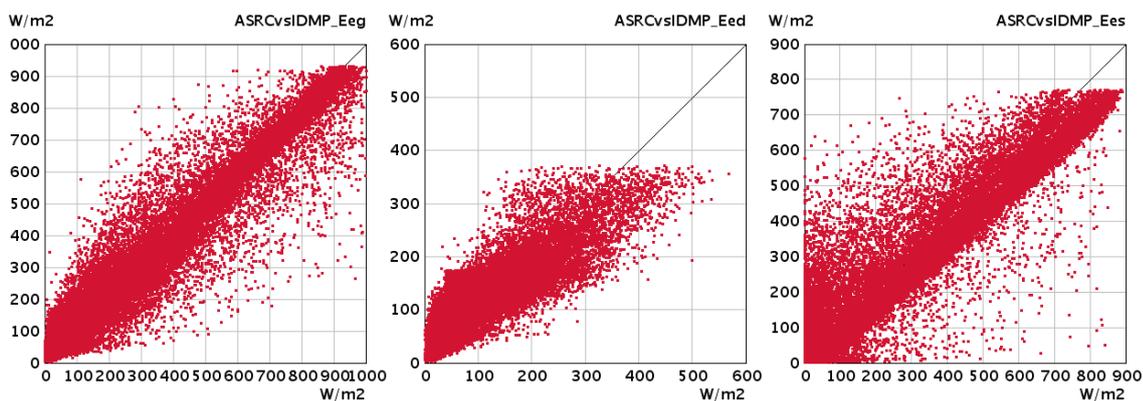


Figure 3 Comparaison entre les estimations satellites (axe y) et les mesures de la station IDMP (axe x). Moyenne des éclairements énergétiques sur 15 mn (global, diffus, direct). Vaulx-en-Velin, 2019-2020.

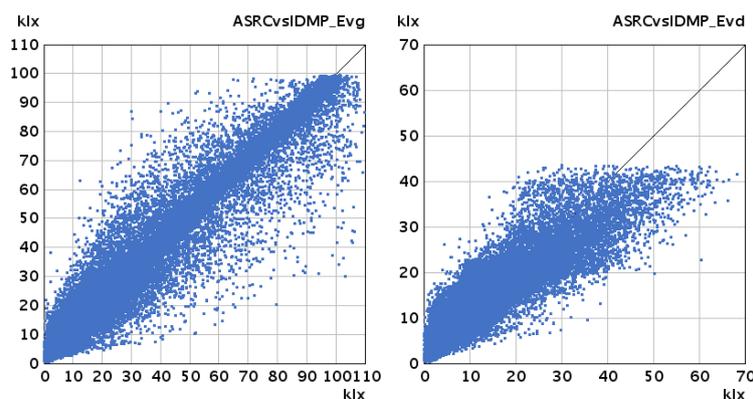


Figure 4 Comparaison entre les éclairements lumineux calculés à partir des estimations satellites (axe y) et les mesures de la station IDMP (axe x). Vaulx-en-Velin, 2019-2020.

J.3 Fichier contenant les luminances du ciel (.lum)

Le modèle de luminances de ciel ASRC-Perez (Perez, 1990) repose sur une interpolation entre 4 modèles (1-couvert, 2-intermédiaire, 3-bleu turbide et 4-bleu pur), nous comparons au jour le jour les coefficients d'interpolation attribués à chacun des ciels sur la base des estimations satellites (fichier .asrc) ou des mesures IDMP. Compte tenu de la surestimation du diffus et de la sous-estimation du direct par temps ensoleillé, il faut s'attendre à ce que les ciels bleus purs (type 4) soient moins bien représentés par les estimations ASRC que par les mesures IDMP. D'autre part, compte tenu de la fréquence des estimations ASRC à produire un éclaircissement direct (certes faible mais présent) pour les conditions de ciel couvert, il faut s'attendre à ce que les ciels couverts (1) soient moins présents que dans les mesures. C'est bien ce que nous observons dans la Figure 5.

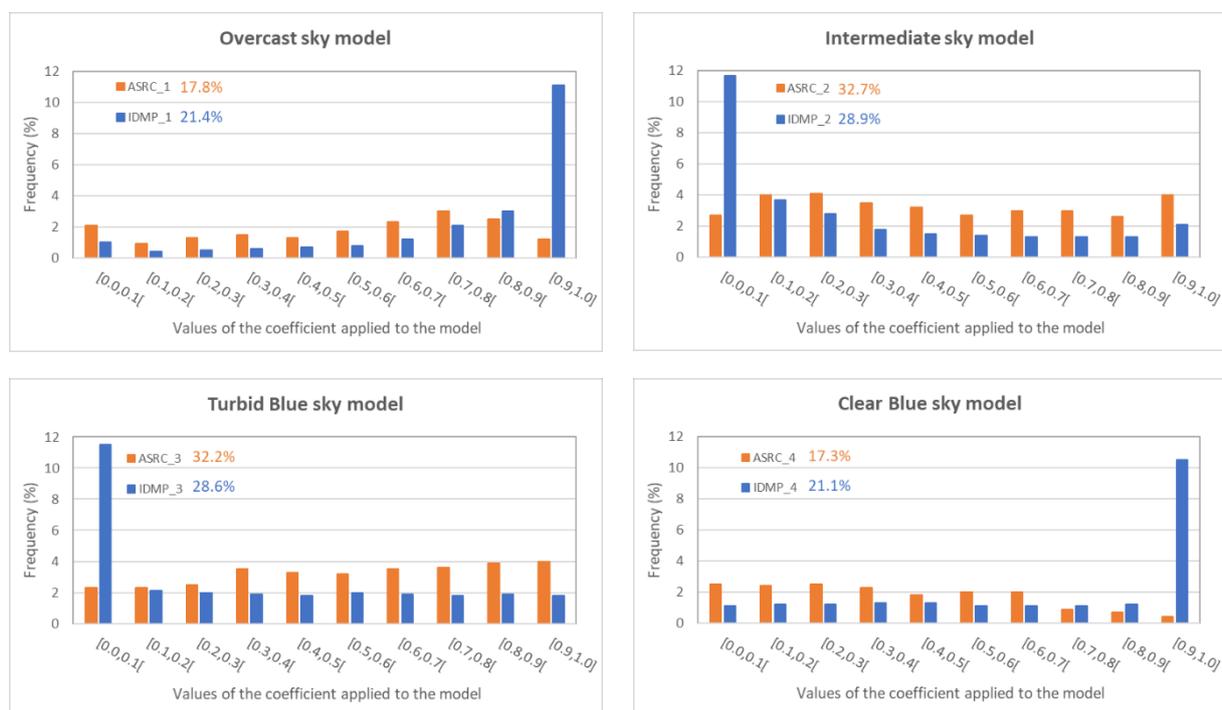


Figure 5 Comparaison entre les estimations satellites et les mesures au sol, Vaulx-en-Velin, 2019 et 2020.
Fréquences des valeurs des coefficients appliquées à chacun des 4 ciels du modèle de Perez.

Le modèle de luminances de ciel ASRC-Perez produit toutes les 15 mn, les luminances des 145 zones du ciel définies par la CIE (Figure 6, (CIE-108, 1994)). La luminance de chaque zone est en fait la moyenne des luminances de zones plus petites définies avec un pas de 5° en azimut et en zénith.

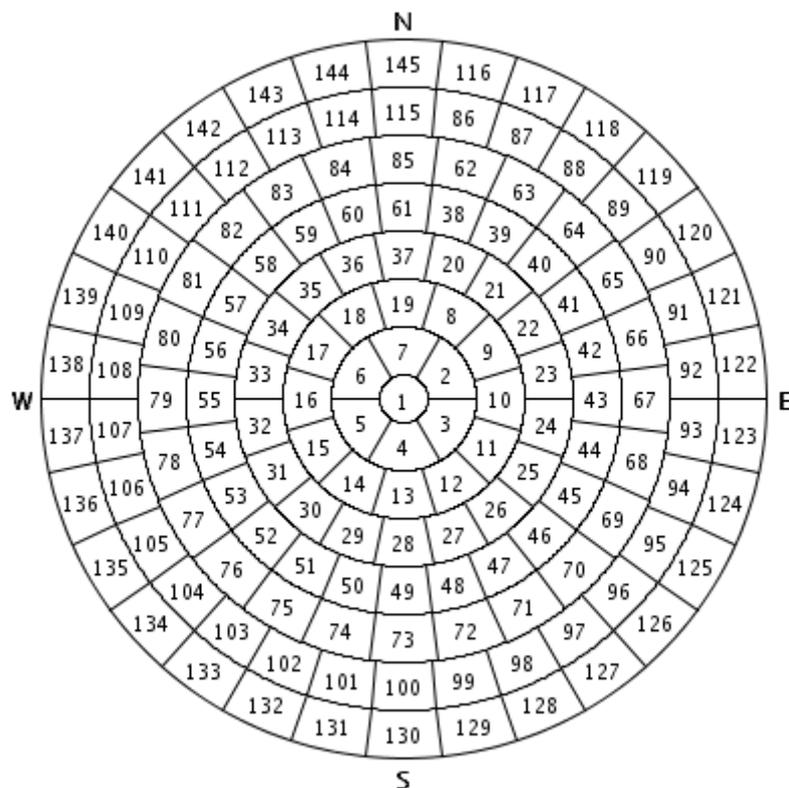


Figure 6 Division du ciel par la CIE en 145 zones.

A chaque instant, les 145 zones doivent fournir sur un plan horizontal l'équivalent de l'éclairement lumineux diffus horizontal. Nous avons donc calculé toutes les 15 minutes l'éclairement lumineux horizontal résultant des 145 valeurs de luminances obtenues et nous l'avons comparé à l'éclairement lumineux diffus horizontal (37263 couples de points). Le calcul de l'éclairement horizontal diffus à partir des luminances a été fait selon l'équation suivante :

$$Evd = \sum_{i=1}^{145} L_i \Omega_i \cos(\theta_i) \quad [1]$$

Avec Ω_i l'angle solide de la zone i (sr) ;

θ_i l'angle au zénith moyen de la zone i .

Le tableau ci-dessous résume les statistiques de comparaison entre les éclairagements dérivés des 145 luminances et les éclairagements initiaux. Elles sont très bonnes.

Tableau 2 Statistiques de comparaison entre les éclairagements dérivés des luminances et les éclairagements initiaux

	COUNTS	MEAN	MBE	RMSE	RMBE	RRMSE	R2
EVD(lum)	37263	14496 lux	104 lux	174 lux	0.72 %	1.20 %	1.0

Les modèles d'efficacité lumineuse de Perez ne peuvent pas être utilisés pour des altitudes de soleil en dessous de 2°. Le fichier « .asrc » contient donc des valeurs égales à 0 dès que l'altitude du soleil est en dessous de 2°. Dans la réalité, l'obscurité n'est vraiment atteinte qu'à des altitudes de soleil négatives. **Pour disposer de valeurs d'éclairements en dessous de 2°, nous avons travaillé sur un modèle crépusculaire.**

L'objectif de ce modèle est de calculer les éclairements en dessous de 2° à partir des éclairements disponibles aux hauteurs de soleil supérieures, nous avons choisi comme base une hauteur de soleil de 5°. Nous avons ainsi cherché à décrire les variations pour des hauteurs de soleil comprises entre -5° et 5°, du rapport entre l'éclairement à une hauteur de soleil donné et l'éclairement à la hauteur de soleil de 5°. Pour cela, nous avons utilisé les mesures à la minute (variation de 0.1 à 0.2° de hauteur du soleil) de la station IDMP de l'ENTPE couvrant en 2019 et 2020, chaque jour, matin et soir, le domaine [-5°, 5°]. Comme ces variations peuvent dépendre des conditions nuageuses, chaque période a été caractérisée par un type de ciel reposant sur la valeur moyenne du coefficient epsilon du modèle de Perez calculée pour les hauteurs de soleil comprises entre 2° et 5°. Il y a 8 types de ciel de 1 pour le ciel couvert de nuages à 8 pour le ciel bleu sans nuages.

Les figures 7 et 8 présentent pour chaque type de ciel, les variations moyennes des rapports d'éclairement horizontal global et horizontal diffus en fonction de la hauteur du soleil.

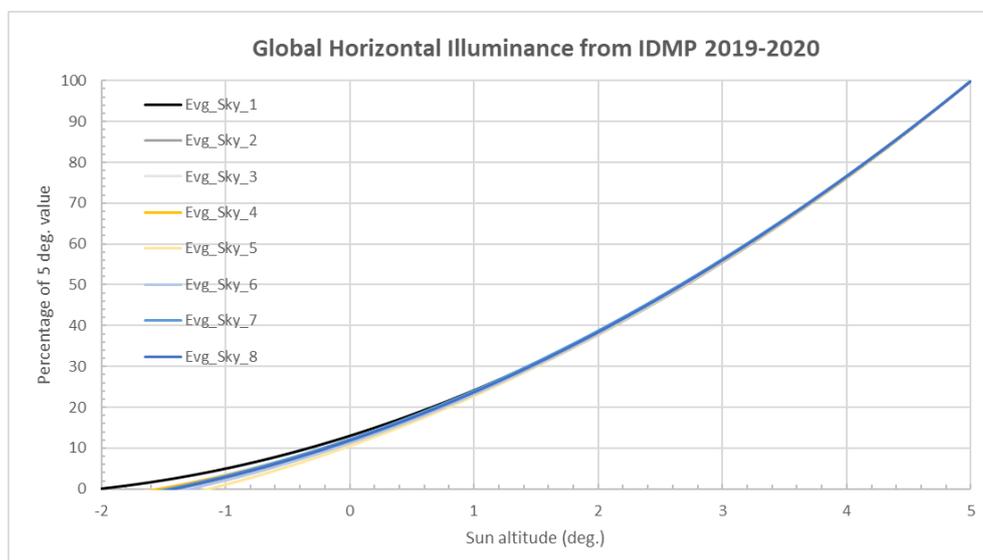


Figure 7 Variations avec la hauteur du soleil du pourcentage de l'éclairement horizontal global à une hauteur de soleil de 5° pour 8 types de ciel (1 : couvert, 8 sans nuages).

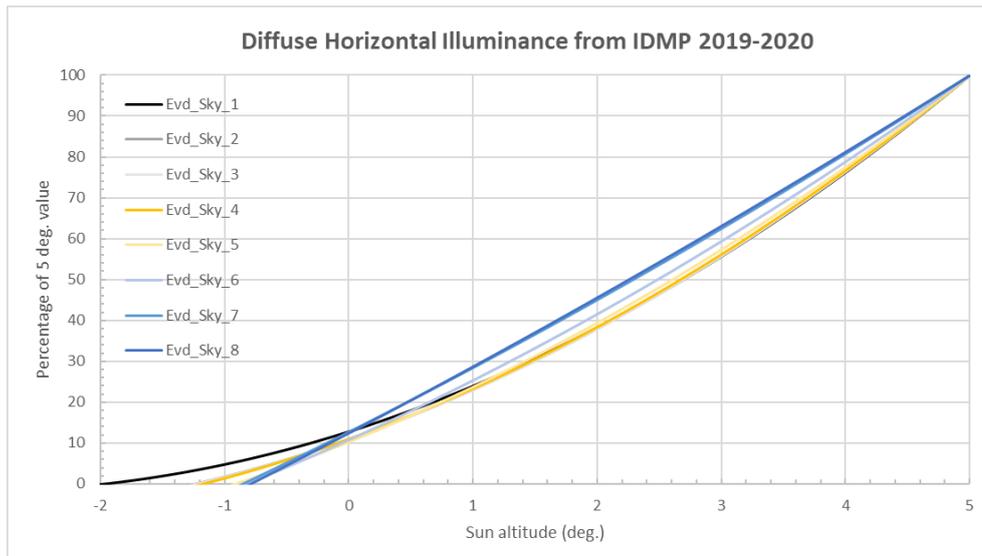


Figure 8 Variations avec la hauteur du soleil du pourcentage de l'éclairement horizontal diffus à une hauteur de soleil de 5° pour 8 types de ciel (1 : couvert, 8 sans nuages).

La figure 7 montre que l'influence du type de ciel sur les variations du rapport à 5° de l'éclairement horizontal global ne se fait vraiment sentir qu'en dessous d'une hauteur de soleil de 1°. La décroissance est moins rapide sous des conditions nuageuses (types 1 à 3) que sous des conditions de ciel bleu avec et sans nuages (types 4 à 8).

La figure 8 montre que l'influence du type de ciel sur le rapport du diffus est plus importante avec des variations quasi linéaires sous des conditions de ciel quasi sans nuages (types 6 à 8) évoluant progressivement vers les variations observées sur le global pour les conditions de ciel totalement nuageuses (types 1 à 3). Pour le diffus, les différences observées entre types de ciel se manifestent à toutes les hauteurs de soleil.

Compte tenu des résultats obtenus sur le diffus, nous avons décidé de modéliser la décroissance des éclairagements avec la hauteur du soleil pour deux familles de ciel : les ciels couverts et quasi-couverts (types 1 à 5) et les ciels quasi sans nuages ou sans nuages (types 6 à 8).

Les ciels couverts et quasi-couverts (types 1 à 5) n'ont pas de soleil direct, par conséquent l'éclairement diffus est égal à l'éclairement global. L'éclairement horizontal global est dérivé des variations des mesures de la station IDMP pour les ciels couverts de type 1 :

$$Evg_{ciel<6}(\gamma_s^\circ) = Evg(5^\circ) \frac{(13.080+9.579\gamma_s+1.561\gamma_s^2)}{100} = Evd_{ciel<6}(\gamma_s^\circ) \quad [2]$$

Les ciels sans nuages et quasi sans nuages (types 6 à 8) ont quant à eux du soleil direct, les éclairagements horizontaux global et diffus ainsi que direct normal sont liés par la relation suivante :

$$Evg = Evd + Evsn \sin(\gamma_s) \quad [3]$$

Compte tenu du fait que nous travaillons sur des hauteurs de soleil proches de 0° et négatives, nous avons préféré modéliser l'éclairement horizontal global et l'éclairement direct normal pour en déduire ensuite l'éclairement horizontal diffus. L'éclairement horizontal global est dérivé des variations des mesures de la station IDMP pour les ciels sans nuages de type 8 :

$$Evg_{ciel \geq 6}(\gamma_s^\circ) = Evg(5^\circ) \frac{(11.800 + 10.420\gamma_s + 1.444\gamma_s^2)}{100} \quad [4]$$

L'éclairement direct normal est calculé en appliquant la loi d'atténuation de Beer-Lambert, prenant en compte la masse d'air optique (m), le coefficient d'atténuation du rayonnement solaire par une atmosphère propre et sèche dite de Rayleigh (a_{vR}) et le facteur de trouble lumineux (T_{vL}) :

$$Evsn_{ciel \geq 6}(\gamma_s^\circ) = 133800 \exp(-m a_{vR} T_{vL}) \quad [5]$$

$$m = \frac{1}{\sin(\gamma_s) + 0.50572(\gamma_s + 6.07995)^{-1.6364}} \quad [6]$$

$$a_{vR} = \frac{0.1}{1 + 0.0045m} \quad [7]$$

$$T_{vL} = 3.0 \quad [8]$$

Compte tenu de l'absence de données de trouble atmosphérique pour les sites d'Antony et du Noiret, nous avons choisi d'utiliser un trouble lumineux de 3.0 qui correspond à des conditions de ciel bleu pur.

L'éclairement horizontal diffus est ensuite calculé à partir des deux autres éclaircements :

$$Evd_{ciel \geq 6}(\gamma_s^\circ) = Evg_{ciel \geq 6}(\gamma_s^\circ) - Evsn_{ciel \geq 6}(\gamma_s^\circ) \sin(\gamma_s^\circ) \quad [9]$$

Les figures 9 et 10 illustrent les modèles utilisés pour l'éclairement global et l'éclairement direct.

Au final, l'utilisation du modèle crépusculaire se fait de la manière suivante. Chaque jour, matin et soir, on détecte l'instant où la hauteur du soleil est juste en dessous de 5°. La valeur du epsilon de Perez à cet instant est utilisée pour déterminer le type de ciel. La valeur de l'éclairement horizontal global à cet instant est exploitée dans le modèle crépusculaire pour déterminer la valeur de référence à la hauteur de soleil exacte de 5°. Le modèle crépusculaire est ensuite utilisé pour déterminer les éclaircements à tous les instants pour lesquels les hauteurs de soleils sont comprises entre 2° et -2°. Pour l'éclairement global, le modèle crépusculaire donne le pourcentage de l'éclairement à 5° pour la hauteur de soleil. S'il s'agit d'un ciel sans nuages, l'éclairement direct est calculé puis utilisé avec le global pour

déterminer l'éclairement diffus. L'éclairement diffus est ensuite utilisé pour calculer les luminances des 145 zones du ciel à cet instant.

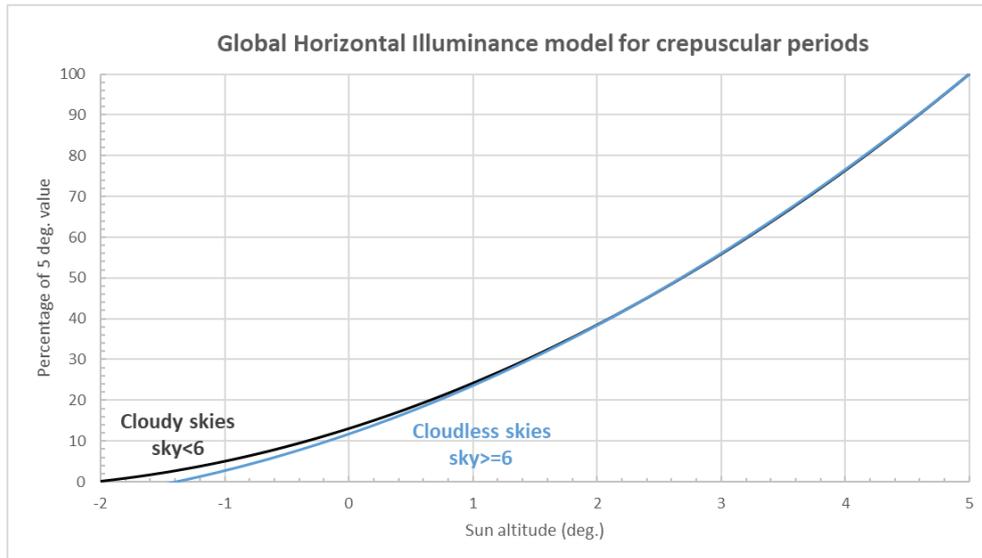


Figure 9 Modèles de variations avec la hauteur du soleil du pourcentage de l'éclairement horizontal global à une hauteur de soleil de 5° pour les ciels couverts et les ciels sans nuages.

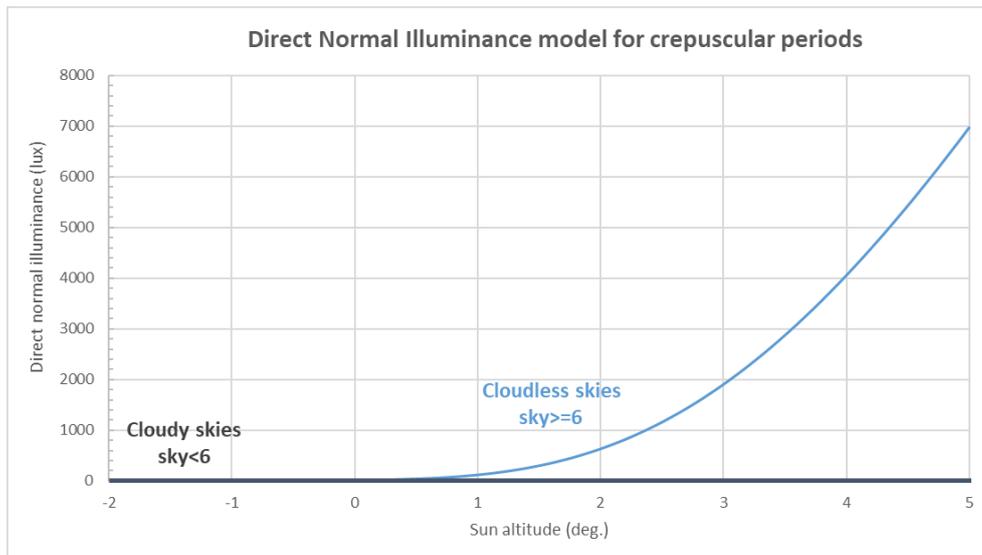


Figure 10 Modèle de variations avec la hauteur du soleil de l'éclairement direct normal diffus à une hauteur de soleil de 5° pour les ciels couverts et les ciels sans nuages.

Annexe K : Note sur les fichiers de données Météo-France SYNOP

K.1 Fichiers contenant les données brutes trihoraires SYNOP

Les mesures au sol des stations de Météo-France sont disponibles gratuitement via l'adresse <https://donneespubliques.meteofrance.fr>. 62 stations sont disponibles pour toute la France. La station SYNOP la plus proche d'Antony est la station d'Orly (#7149, 48.716833N, 2.384333E, 89m).

Les mesures des stations SYNOP sont nombreuses (voir tableau ci-dessous). La visibilité horizontale est disponible dans les fichiers (paramètre vv), mais il y a aussi des informations sur l'état du sol (état_sol), la température (t), l'humidité (u).

Tableau 1 Descriptif de la nature des données indiquées dans les fichiers SYNOP

Descriptif	Mnémonique	Type *	Unité
indicatif OMM station	numer_sta	car	
date (UTC)	date	car	AAAAMDDHMISS
pression au niveau mer	pmer	int	Pa
variation de pression en 3 heures	tend	int	Pa
type de tendance barométrique	cod_tend	int	code (0200)
direction du vent moyen 10mn	dd	int	degré
vitesse du vent moyen 10mn	ff	réel	m/s
température	t	réel	K
point de rosée	td	réel	K
humidité	u	int	%
visibilité horizontale	vv	réel	mètre
temps présent	ww	int	code (4677)
temps passé 1	w1	int	code (4561)
temps passé 2	w2	int	code (4561)
nébulosité totale	n	réel	%
nébulosité des nuages de l'étage inférieur	nbas	int	octa
hauteur de la base des nuages de l'étage inférieur	hbas	int	mètre
type des nuages de l'étage inférieur	cl	int	code (0513)
type des nuages de l'étage moyen	cm	int	code (0515)
type des nuages de l'étage supérieur	ch	int	code (0509)
pression station	pres	int	Pa
niveau barométrique	niv_bar	int	Pa
géopotential	geop	int	m ² /s ²
variation de pression en 24 heures	tend24	int	Pa
température minimale sur N heures	tnN	réel	K
température maximale sur N heures	txN	réel	K
température minimale du sol sur 12 heures	tminsol	réel	K
méthode mesure tw	sw	int	code (3855)
température du thermomètre mouillé	tw	réel	K
rafales sur les 10 dernières minutes	raf10	réel	m/s
rafales sur une période	rafper	réel	m/s
période de mesure de la rafale	per	réel	minute
état du sol	etat_sol	int	code (0901)
hauteur totale de la couche de neige, glace, autre, au sol	ht_neige	réel	mètre
hauteur de la neige fraîche	ssfrai	réel	mètre
Période de mesure de la neige fraîche	perssfrai	réel	1/10 heure
Précipitations dans les N dernières heures	rrN	réel	mm
Phénomène spécial	phenspeN	réel	code (3778)
Nébulosité couche nuageuse N	nnuageN	int	octa
Type de nuage N	ctypeN	int	code (0500)
Hauteur de base de nuage N	hnuageN	int	mètre

Les fichiers SYNOP sont disponibles mois par mois pour une année. **Les valeurs sont données toutes les 3 heures en temps UTC : il y a donc 8 enregistrements par jour. Un fichier mensuel contient l'intégralité des stations. Les données de 2019 ont été téléchargées et nous avons**

sélectionné dans ces données, celles de la station #7149 (Orly) (fichier : 07149_visibility_raw.txt). Au total en 2019, il y a 2916 enregistrements pour 2920 possibles (365*8). Il manque donc 4 enregistrements pour que le fichier soit complet, nous les avons donc détectés et ajoutés à partir d'enregistrements du jour d'avant ou du jour même à d'autres horaires : il s'agit de 2 enregistrements le 2 juillet 2019 et de 2 enregistrements le 28 septembre 2019.

Pour un enregistrement, il se peut que certaines mesures soient manquantes, elles sont indiquées par le texte « mq ». La visibilité, la température ou l'humidité sont complètes. **Par contre, il y a 69 valeurs manquantes pour l'état du sol.** Le fichier final pour les simulations devra être complet. Dans un premier temps, nous avons remplacé le texte « mq » par une valeur numérique « -99 » plus facile à manier par le code informatique.

K.2 Analyse des mesures trihoraires 2019 de la station SYNOP-ORLY

Paramètre : Visibilité horizontale

Nous nous sommes d'abord concentrés sur l'analyse des valeurs de visibilité (fichier : 07149_visibility.xlsx). La valeur min est 30 m, la valeur médiane est 23030 m, la valeur max est 60000 m. La figure 1 montre la répartition des valeurs. On peut constater qu'il y a 3 gammes de visibilité dont la fréquence est nettement plus élevée : [18000, 20000] (13.3%),]24000, 26000] (13.4%) et]28000, 30000] (15.2%).

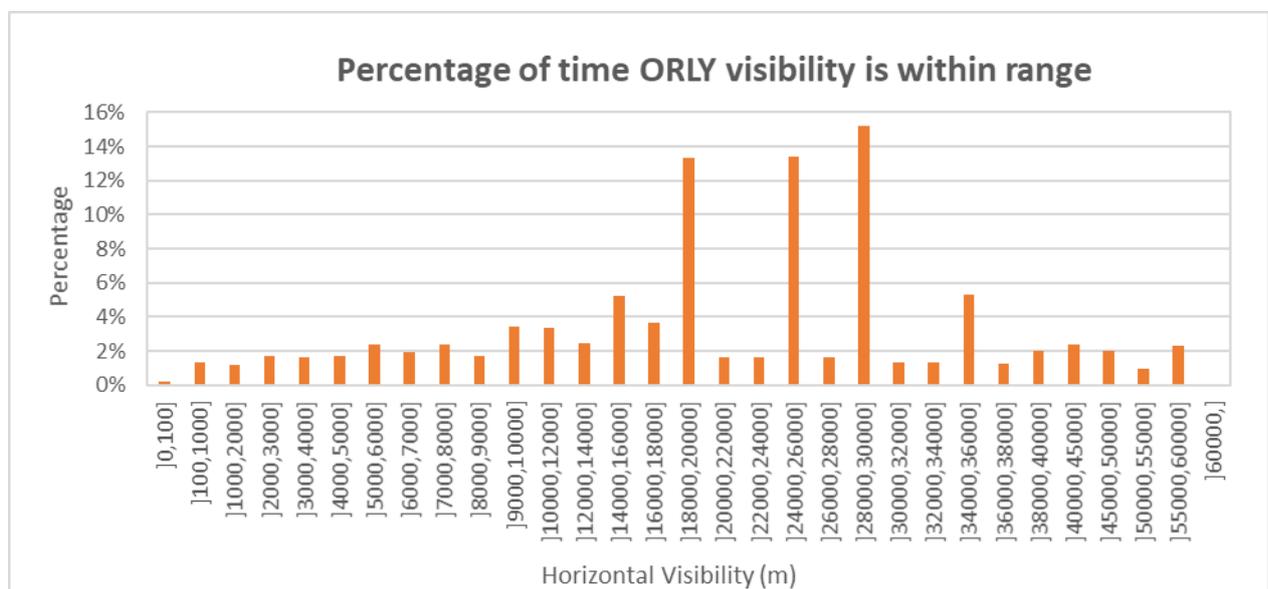


Figure 1 Fréquence des données de visibilité météorologique pour le site d'Orly

La courbe de fréquence cumulée (ci-dessous) montre que la valeur dépassée 85% du temps à Orly est 8500 m. Padmos pour les sites hollandais indiquaient que la valeur dépassée 85% du temps était 2500 m pendant la journée. A Orly, une visibilité de 2500 m est dépassée plus

de 95% du temps sur 24 h. Il y a donc une différence de visibilité entre les différents sites, celui d'Orly serait moins troublé que les sites hollandais. Cela dit, comme il s'agit d'effectuer un contrôle de l'éclairage du tunnel d'Antony en continu, nous pouvons nous baser sur les relevés trihoraires présents dans les données SYNOP sans sélectionner une valeur statistique particulière.

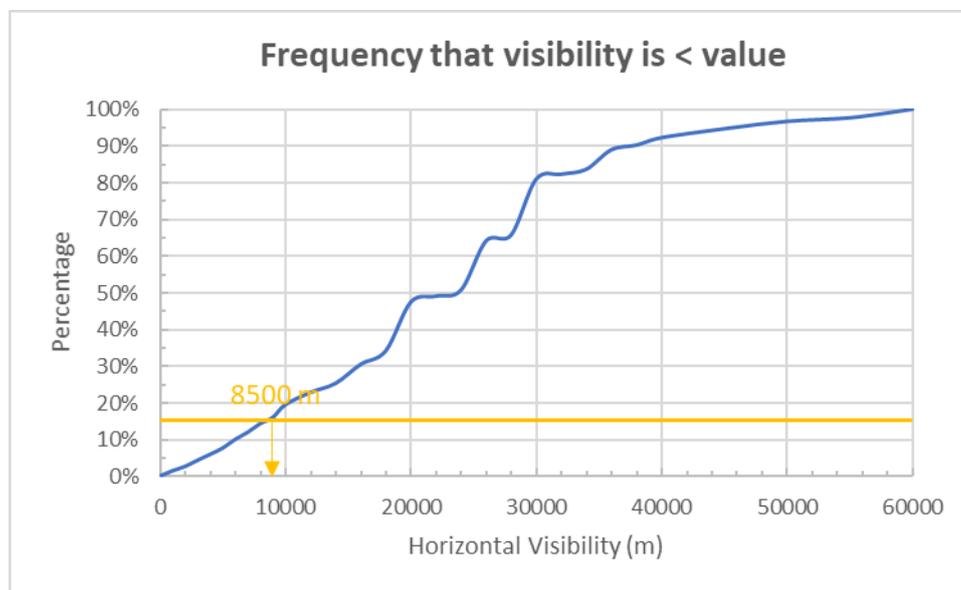


Figure 2 Courbe de fréquence cumulée des valeurs de visibilité météorologique du site d'Orly

Pour aller plus loin dans la compréhension des données, nous les avons représentées au format calendrier avec une représentation de leurs variations journalières mois par mois. L'idée est de les observer et d'en effectuer visuellement un contrôle de qualité. Il ressort de cette analyse que la visibilité horizontale peut connaître des variations importantes dans une journée. Il faut dire qu'il s'agit d'une observation humaine liée à des choix de repères visibles depuis le site à des distances variables. Il serait sans doute plus précis d'utiliser des mesures physiques du trouble atmosphérique locale, mais elles n'existent pas dans les mesures SYNOP.

Paramètre : Etat du sol

Les codes d'état du sol sont décrits dans le tableau 2. La figure 3 présente le nombre de valeurs de chaque code présentes dans le fichier SYNOP d'Orly. Le code -99 correspond aux valeurs manquantes. 4 grandes catégories illustrent les tendances générales : Dry (0), Wet (1, 2 et 3), Frost (4), Snow (10 à 19). On peut noter qu'aucune valeur n'a été rapportée entre 5 et 10.

Tableau 2 Codes pour l'état du sol tels que présentés dans les fichiers SYNOP

0	Surface du sol sèche
1	Surface du sol humide
2	Surface du sol mouillée (eau stagnante en mares, petites ou grandes à la surface)
3	Inondé
4	Surface du sol gelée
5	Verglas au sol
6	Poussière ou sable meuble sec ne couvrant pas complètement le sol
7	Couche fine de poussière ou de sable meuble couvrant complètement le sol
8	Couche épaisse ou d'épaisseur moyenne de poussière ou de sable meuble couvrant complètement le sol
9	Très sec avec fissure
10	Sol en grande partie couvert de glace
11	Neige compacte ou mouillée (avec ou sans glace) couvrant moins de la moitié du sol
12	Neige compacte ou mouillée (avec ou sans glace) couvrant au moins la moitié du sol mais ne le couvrant pas complètement
13	Couche uniforme de neige compacte ou mouillée couvrant complètement le sol
14	Couche non uniforme de neige compacte ou mouillée couvrant complètement le sol
15	Neige sèche poudreuse couvrant moins de la moitié du sol
16	Neige sèche poudreuse couvrant au moins la moitié du sol (mais ne le couvrant pas complètement)
17	Couche uniforme de neige sèche poudreuse couvrant complètement le sol
18	Couche non uniforme de neige sèche poudreuse couvrant complètement le sol
19	Neige couvrant complètement le sol – congères élevées

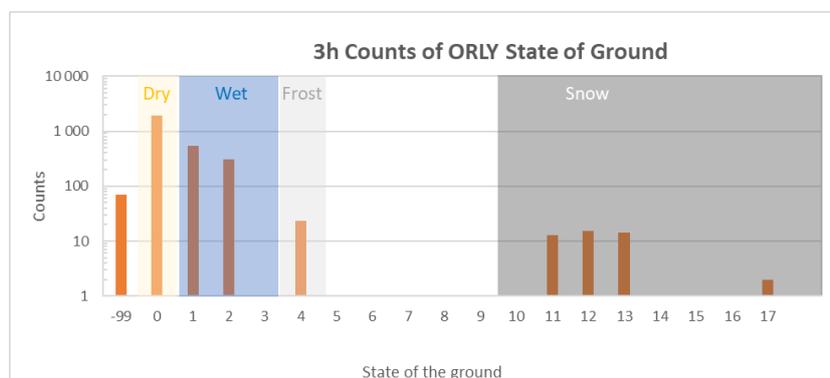


Figure 3 Nombre de valeurs de chaque code pour le site d'Orly

La figure 4 montre les pourcentages associés à chaque code.

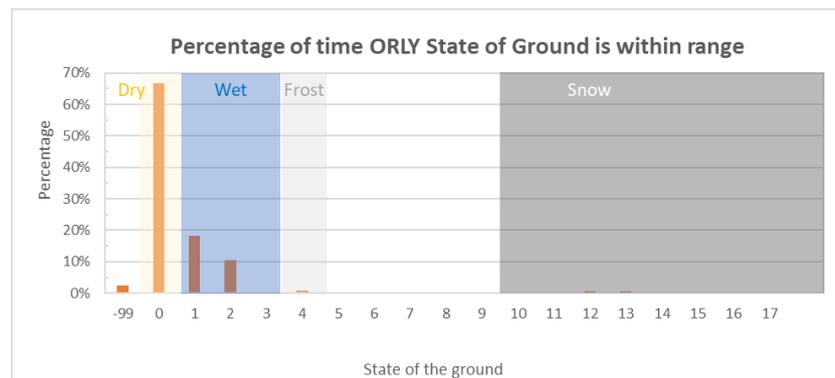


Figure 4 Pourcentage des valeurs de chaque code pour le site d'Orly par rapport au nombre de données total

On constate que l'on pourrait donc utiliser State of Ground pour décider de l'état de la route dans la détermination de la distance de sécurité : 0 (pour Dry) et 1+ (pour Wet).

Nous avons observé les variations journalières de l'état du sol et vérifié la cohérence de ce paramètre avec la température ou l'humidité relative. Nous avons ainsi observé la correspondance entre les valeurs de « gel » (code = 4 ou 5) ou de « neige » (code ≥ 10) et les températures mesurées. Le gel (code 4, code 5 est absent) est obtenu pour des températures extérieures comprises entre -3.7°C et 0.3°C avec une valeur médiane à -1.5°C , ce qui est tout à fait correct. La neige (code ≥ 10) est obtenue pour des températures extérieures comprises entre -1.4°C et 6.9°C (1^{er} février à 15h) avec une valeur médiane à 1.1°C . En ce qui concerne l'état du sol humide (code = 1 ou 2), il est obtenu pour des humidités relatives comprises entre 40% et 99%, avec une médiane à 88%. L'état du sol sec (code = 0) est obtenu pour des humidités relatives comprises entre 15% et 99%, avec une médiane à 67%. L'humidité relative n'est pas un marqueur fort d'un temps pluvieux mais les résultats apportés par la médiane sont cohérents.

En ce qui concerne les variations journalières de l'état du sol, on notera des épisodes neigeux (code ≥ 10) : du 22 janvier 12h à 25 janvier 12h, du 29 janvier 22h au 2 février 1h, le 15 novembre à 16h. **Il y a aussi une bonne correspondance entre l'état du sol sec et les conditions de ciel ensoleillées (données issues des images satellitaires) ou entre l'état de sol humide et du ciel couvert.** Bien sûr, il peut y avoir des exceptions : giboulées de mars (soleil+pluie) et tous les ciels couverts ne sont pas pluvieux. Le mois de juillet a très peu de situations de sol humide : essentiellement le 27 juillet, les données satellitaires de rayonnement montrent bien qu'il s'agissait d'une situation de ciel couvert.

Ces observations vont permettre de consolider les données d'état du sol manquantes (69 périodes de 3h). Pour cela, nous utiliserons les conditions de ciel des données satellitaires, les températures et les humidités relatives. Sauf autre cas flagrant (gel ou neige pour les périodes neigeuses mentionnées ci-dessus, la donnée de substitution sera un 0 (sec) ou un 1 (humide).

La substitution est faite dans le fichier « 07149_visibility_miss.txt » qui devient « 07149_visibility.txt ». Une valeur manquante unique peut généralement être à la même valeur que la précédente ou la suivante. Finalement le remplacement des valeurs manquantes est plutôt simple sur cette base.

Sans valeurs manquantes, la répartition des codes de l'état du sol est la suivante :

State of Ground	Dry	Wet	Frost	Snow	Total
Counts of 3h	1966	882	25	47	2920
% of total	67.3%	30.2%	0.9%	1.6%	100.0%

Il y donc dans l'année sur la région d'Antony : 67% de conditions de route sèche et 33% de conditions de route « humide ». Les informations sur l'état du sol pourront être utilisés pour la modélisation du système de contrôle de l'éclairage du tunnel d'Antony.

Paramètre : Température

Le profil journalier des températures de chaque jour a été comparé aux éclairagements énergétiques dérivés des images satellites : par ciel ensoleillé, la température minimale au lever du jour augmente lors de la journée pour atteindre un maximum vers 16h. La correspondance est généralement bonne, par exemple les 1 et 6 avril (entre autres jours ensoleillés) alors que les 10, 16 avril 2019 (jours couverts) ont un profil de température plat. Pour les différents mois, le profil de variation des températures dans la journée est bien en ligne avec les conditions nuageuses. La température minimale est de -4°C le 21 janvier 2019 à 6h du matin. La température maximale est de 42°C le 25 juillet à 16h.

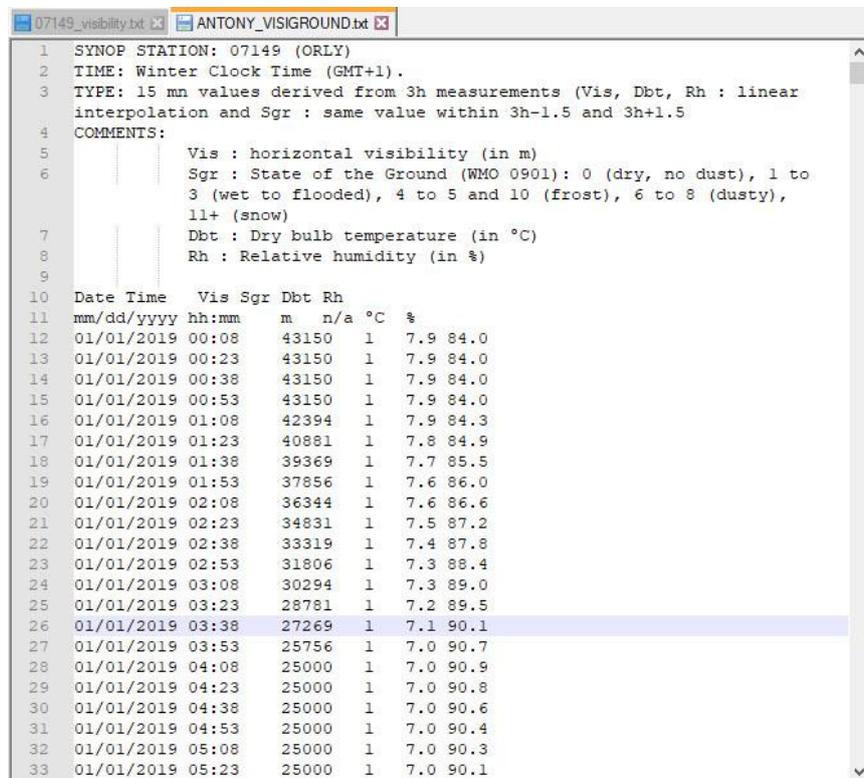
Paramètre : Humidité relative

Nous avons observé les variations de l'humidité relative au jour le jour pour chacun des mois. Il n'y a rien de spécial à signaler, les mesures semblent tout à fait cohérentes.

K.3 Création du fichier 15 minutes à partir des valeurs trihoraires SYNOP

A partir des données trihoraires complétées pour éviter toute donnée manquante (fichier « 07149_visibility.txt »), nous avons créé un fichier contenant les données toutes les 15 minutes en heure d'hiver GMT+1 (comme les fichiers de trafic et de luminances du ciel). Une interpolation linéaire a été utilisée pour créer toutes les 15 mn les valeurs de la visibilité horizontale, de la température et de l'humidité. Pour l'état du sol, pas d'interpolation, nous avons considéré que l'état du sol trihoraire donné à l'heure h couvrait les 3 heures

commençant à h-1.5 et finissant à h+1.5. Le code développé en java (méthode `create15mnStationData()` de la classe `SYNOFFiles.java`) a été utilisé pour produire le fichier « ANTONY_VISIGROUND.txt » qui contient les données toutes les 15 minutes. La figure 5 montre un extrait du contenu du fichier. Les données ont été représentées graphiquement pour vérifier leur intégrité.



```

1  SYNOP STATION: 07149 (ORLY)
2  TIME: Winter Clock Time (GMT+1).
3  TYPE: 15 mn values derived from 3h measurements (Vis, Dbt, Rh : linear
4  interpolation and Sgr : same value within 3h-1.5 and 3h+1.5
5  COMMENTS:
6  Vis : horizontal visibility (in m)
7  Sgr : State of the Ground (WMO 0901): 0 (dry, no dust), 1 to
8  3 (wet to flooded), 4 to 5 and 10 (frost), 6 to 8 (dusty),
9  11+ (snow)
10 Dbt : Dry bulb temperature (in °C)
11 Rh : Relative humidity (in %)
12
13 Date Time  Vis Sgr Dbt Rh
14 mm/dd/yyyy hh:mm  m  n/a °C  %
15 01/01/2019 00:08  43150 1  7.9 84.0
16 01/01/2019 00:23  43150 1  7.9 84.0
17 01/01/2019 00:38  43150 1  7.9 84.0
18 01/01/2019 00:53  43150 1  7.9 84.0
19 01/01/2019 01:08  42394 1  7.9 84.3
20 01/01/2019 01:23  40881 1  7.8 84.9
21 01/01/2019 01:38  39369 1  7.7 85.5
22 01/01/2019 01:53  37856 1  7.6 86.0
23 01/01/2019 02:08  36344 1  7.6 86.6
24 01/01/2019 02:23  34831 1  7.5 87.2
25 01/01/2019 02:38  33319 1  7.4 87.8
26 01/01/2019 02:53  31806 1  7.3 88.4
27 01/01/2019 03:08  30294 1  7.3 89.0
28 01/01/2019 03:23  28781 1  7.2 89.5
29 01/01/2019 03:38  27269 1  7.1 90.1
30 01/01/2019 03:53  25756 1  7.0 90.7
31 01/01/2019 04:08  25000 1  7.0 90.9
32 01/01/2019 04:23  25000 1  7.0 90.8
33 01/01/2019 04:38  25000 1  7.0 90.6
34 01/01/2019 04:53  25000 1  7.0 90.4
35 01/01/2019 05:08  25000 1  7.0 90.3
36 01/01/2019 05:23  25000 1  7.0 90.1

```

Figure 5 Organisation du fichier final

La colonne Vis contient les données de visibilité qui peuvent être utilisées dans la formule de Padmos pour calculer la luminance de l'atmosphère. La colonne Sgr (State of the Ground) est utilisée pour déterminer si la route est sèche (valeur 0) ou si la route est humide, gelée ou enneigée (valeurs 1 et plus).

Annexe L : Note sur les fichiers de données de trafic de la DiRIF

L.1 Fichier des données brutes de trafic 2019&2020 (A86_2sens.txt)

Les mesures de trafic sont disponibles auprès de la DIRIF (Direction des Routes d'Île-de-France). L'email de contact est : uoit.dirif@developpement-durable.gouv.fr. Le fichier de mesures qui nous a été envoyé (A86_2sens.txt) a une taille importante : 124 Mo. Il contient des données pour 18 stations de mesure du trafic pour les deux années 2019 et 2020, une station après l'autre.

La ligne d'entête du fichier indique le nom des données disponibles séparées par un « ; » :

Station;NbVoies;Date;TJ;Pér 6mn;Débits;TO;Vitesses;PL;

Les données sont les suivantes :

Station : le code de la station de mesure du trafic dans le format SIRIUS (Système d'Information pour un Réseau Intelligible aux Usagers, <http://www.dir.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/sirius-a119.html>) selon le code suivant, A86-E/51+0340/P - boucle de comptage localisée sur l'autoroute A86, sens Extérieur, donc ici de l'Ouest vers l'Est, sur la longueur 340 du segment 51 (un segment peut avoir une longueur supérieure à 1000 m). **Du fait de l'évolution de la politique de maintenance des équipements de comptage de la DiRIF, certains points de mesure sont définis comme Prioritaires en termes de maintenance (nom de la station se terminant par /P)**. A partir de 2019, ce sont ces points dont les mesures sont données dans les fichiers par défaut alors que les données des autres stations sont données seulement sur demande. Il semble donc qu'il faille privilégier les stations correctement maintenues (donc en /P).

NbVoies : le nombre de voies de la route mesurée, il est le même pour une station donnée.

Date : la date du jour selon le format dd/mm/yyyy

TJ : le jour de la semaine 1 pour lundi, 2 pour mardi, 7 pour dimanche et les jours fériés.

Pér 6mn : l'heure dans la journée tous les dixièmes d'heure (toutes les 6 mn) et exprimée en dixième d'heure (101 pour 10.1 ou 10h06). Il s'agit de la fin de la période.

Débits : le nombre de véhicules qui a circulé dans les 6 mn précédant l'heure indiquée.

TO : le taux d'occupation de la circulation exprimé en % dans les 6 mn précédant l'heure indiquée.

Vitesses : la vitesse moyenne des véhicules en km/h dans les 6 mn précédant l'heure indiquée.

PL : le nombre de Poids Lourds si la station est capable de les distinguer.

Lorsqu'on roule d'Est en Ouest, le sens que nous simulons, l'entrée du tunnel d'Antony se trouve sur le segment 52, un peu avant la longueur 300 (vérifiée sur Google map en street view grâce au panneau se trouvant sur le piédroit), puis la sortie se trouve sur le segment 52 à la longueur 1100 (vérifiée sur Google map en street view).

A partir du fichier « A86_2sens.txt » des fichiers individuels par station ont été créés et les données disponibles pour chaque station ont été analysées. Tous les fichiers couvrent la

période 1^{er} janvier 2019 au 31 décembre 2020. Les fichiers ont été vérifiés selon le protocole suivant :

1. Un fichier complet contient 175440 lignes ($365 \times 24 \times 10 + 366 \times 24 \times 10$), puisque 2020 est bissextile et que les données sont disponibles tous les dixièmes d'heure (6 minutes).
2. Le fichier d'une station a toujours le même nombre de voies.
3. Une nouvelle valeur de trafic journalier commence à hr=0.1 (début de la journée).

La Figure 1 indique la position des stations en place sur la portion couverte par le tunnel d'Antony (PR 52) en janvier 2022.

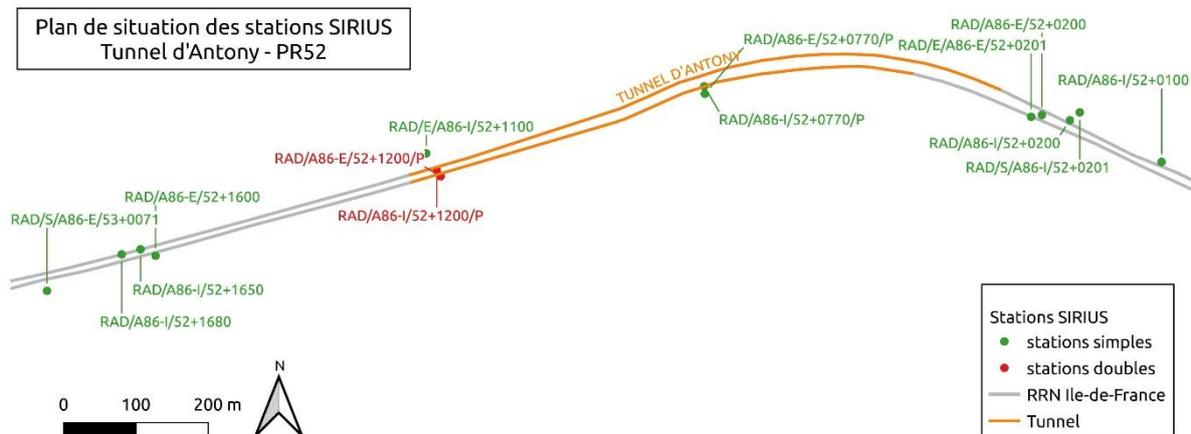


Figure 1 Position des stations de comptage sur la zone du tunnel d'Antony

La figure 2 présente les stations pour lesquelles nous disposons de données, leur localisation, le nombre de valeurs disponibles et les min et max des variables sur la période 2019-2020. On peut constater qu'il n'y a que 4 stations (#4, #6, #13 et #16, surlignées en jaune foncé) qui semblent disposer de suffisamment de données au pas de temps de 6 mn. En ce qui concerne les vitesses, on peut constater que certains max sont très élevés : 289 km/h (#4, le 23 mars 2020 à 3 :54) ou 459 km/h (#13, le 26 avril 2020 à 4h06).

#	Station	Sens des voies	Localisation	NbVoies	Nline	MinTJ	MaxTJ	Ndébits	MinDébits	MaxDébits	NTO	MinTO	MaxTO	Nvitesses	MinVitesses	MaxVitesses	NPL
1	A86-E/51+0340/P	Ouest vers Est		3	175440	1	7	32824	7	443	32824	0.13	47.7	30723	9	98	0
2	A86-E/51+0800	Ouest vers Est		2	175440	1	7	0			0			0			0
3	A86-E/51+0920	Ouest vers Est		2	175440	1	7	33235	2	434	33235	0.07	64.6	33235	3	188	0
4	A86-E/52+0200	Ouest vers Est	Sortie du tunnel	2	175440	1	7	125870	1	372	125870	0.02	74.5	125854	1	289	0
5	A86-E/52+0770/P	Ouest vers Est	Dans tunnel	2	175440	1	7	32422	1	375	32422	0.03	70.6	32418	2	187	0
6	A86-E/52+1200/P	Ouest vers Est	Entrée du tunnel	2	175440	1	7	125228	2	432	125228	0.03	74.4	117342	7	107	0
7	A86-E/52+1600	Ouest vers Est		2	175440	1	7	30139	2	439	30139	0.05	73.7	30066	2	176	0
8	A86-E/53+0070	Ouest vers Est		2	175440	1	7	0			0			0			0
9	A86-E/53+0215	Ouest vers Est		2	175440	1	7	0			0			0			0
10	A86-E/53+0630/P	Ouest vers Est		2	175440	1	7	0			0			0			0
11	A86-I/51+0340/P	Est vers Ouest		2	175440	1	7	0			0			0			0
12	A86-I/52+0100	Est vers Ouest		2	175440	1	7	33030	2	427	33030	0.21	64.4	33030	1	127	0
13	A86-I/52+0200	Est vers Ouest	Entrée du tunnel	2	175440	1	7	125220	1	357	125220	0.01	75.7	125201	1	459	0
14	A86-I/52+0770/P	Est vers Ouest	Dans tunnel	2	175440	1	7	32880	1	359	32880	0.03	63.7	32879	1	207	0
15	A86-I/52+1200/P	Est vers Ouest	Sortie du tunnel	2	175440	1	7	236	2	112	236	0.05	48.2	0			0
16	A86-I/52+1650	Est vers Ouest	Sortie du tunnel	2	175440	1	7	126778	1	472	126777	0.03	72.2	126750	1	202	0
17	A86-I/52+1680	Est vers Ouest		2	175440	1	7	0			0			0			0
18	A86-I/53+0395	Est vers Ouest		2	175440	1	7	0			0			0			0

Figure 2 Données pour les différentes stations de comptage sur la portion de route de la TC d'Antony

Dans cette liste, il y a bien les stations qui nous intéressent pour la modélisation des 2 voies Intérieures, c.à.d. du sens Est vers Ouest, ce sont : **A86-I/52+0200 (entrée du tunnel dans ce sens) et A86-I/52+1650 (sortie du tunnel dans ce sens)**. Ces deux stations donnent des résultats similaires mais il semble que les réductions de vitesse se font davantage sentir à l'entrée du tunnel qu'à la sortie (les 27 et 30 décembre 2019 entre 19h et 20h par exemple). On notera aussi qu'une nouvelle station prioritaire en termes de maintenance (A86-I/52+0770/P) a été placée au milieu du tunnel mais elle compte trop peu de données.

On peut noter que nous avons également des données pour le sens inverse (Extérieur) de circulation d'ouest en est, ce sont les stations A86-E/52+1200/P (entrée du tunnel dans ce sens) et A86-E/52+0200 (sortie du tunnel dans ce sens). Les deux sens de circulation ont des profils de variation de vitesse différents, il semble que la direction d'ouest en est soit davantage perturbée que celle d'est en ouest (celle simulée). Mais en dehors des perturbations, la vitesse de circulation dans ce sens Ouest/Est est plus faible que dans l'autre sens : elle est voisine de 80 km/h ce qui indique un meilleur respect de la vitesse limite de 70 km/h indiquée comme vitesse limite du tunnel. A noter qu'il n'y a pas de radar présent dans la zone du tunnel. **Les données de A86-E/52+1200/P sont moins bruitées que celles de A86-E/52+0200. Parmi les 4 stations, c'est la seule qui soit prioritaire en maintenance, c'est peut-être la raison du bruit de mesures plus réduit.**

L'étape suivante consiste à modifier le format de chacun des fichiers pour qu'il puisse être représenté directement avec le programme de représentation graphique en calendrier mensuel. Les anciens fichiers portent le nom de la station suivi de « _raw », les nouveaux portent le nom de la station. Les données de 2019 sont séparées de celles de 2020. Nous obtenons ainsi 8 fichiers : A86-I_52+0200_2019.txt, A86-I_52+1650_2019.txt, A86-E_52+0200_2019.txt, A86-E_52+1200_P_2019.txt, A86-I_52+0200_2020.txt, A86-I_52+1650_2020.txt, A86-E_52+0200_2020.txt et A86-E_52+1200_P_2020.txt. Les données de débit et de vitesse des 4 stations d'intérêt en 2019 et 2020 ont été visualisées au format calendrier. Cela nous a permis d'identifier les périodes de données manquantes. La comparaison entre les différentes stations montre que la disponibilité des données en 2019 ou 2020 est à peu de chose près la même pour les 4 stations. **Sur la base de ces observations, nous nous concentrons alors sur deux stations de mesures : A86-I/52+0200 (même sens de circulation que celui modélisé mais vitesses trop souvent au-dessus des vitesses limites) et A86-E/52+1200/P (sens inverse de circulation et vitesses proches de la vitesse limite).**

L.2 Création de fichiers de données complets pour 2019

L'étape suivante est de voir s'il est possible de compléter les données 2019 par celles de 2020 en n'utilisant pas les périodes de confinement de 2020 pour lesquelles le trafic très réduit en débit n'est pas représentatif (particulièrement la première période du mardi 17 mars 2020 au dimanche 10 mai 2020 inclus, puis la seconde moins stricte du vendredi 30 octobre au lundi 14 décembre inclus). Avant cela, nous avons vérifié en 2019 et 2020, les

différences entre les débits mesurés les jours de la semaine et ceux mesurés le weekend. Les mercredis ne sont pas différents des autres jours de la semaine, le samedi est différent du dimanche, tous deux sont différents des jours de la semaine, enfin les jours fériés sont proches du dimanche. Pour compléter 2019 à partir de 2020, on s'attachera donc à respecter les jours de la semaine et à utiliser pour un jour férié, le résultat d'un dimanche. La procédure retenue est la suivante : lorsque quelques instants (4 à 5 périodes de 6 minutes, souvent vers 2h30 du matin) ont des données manquantes dans une journée, on utilise les données des instants juste avant et juste après. On évite les interpolations : si seule la vitesse manque (souvent le cas pour A86-E/52+1200/P), on utilise celle des instants avant ou après qui correspond à un débit et un TO proche. S'il manque plus de 4 à 5 périodes, on va chercher dans le jour d'avant ou le jour d'après les données de ces périodes en faisant attention à la différence entre jours de semaine, samedis et dimanches. Enfin, s'il manque toutes les données du jour, on utilise celles d'un autre jour. La Figure 3 présente pour l'année 2019, les jours avec des données manquantes (surlignage jaune) et les jours utilisés en substitution.

Complètes	A compléter		Jours Fériés				
2019 complétée par 2020							
janv-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1		2020_1	2020_2	2020_3	2020_10	2020_4	2020_5
week 2	2020_6	2020_7	2020_8	2020_9	2020_10	2020_11	2020_12
week 3	2020_13	2020_14	2020_15	2020_16	2020_17	2020_18	2020_19
week 4	2020_20	2020_21	2020_22	2020_23	2020_24	2020_25	2020_26
week 5	2020_27	2020_28	2020_29	2020_30			
févr-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1					2020_31	2020_1	2020_2
week 2	2020_3	2020_4	2020_5	2020_6	8	9	10
week 3	11	12	13	14	15	16	17
week 4	18	19	20	21	22	23	24
week 5	25	26	27	28			
mars-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1					1	2	3
week 2	4	5	6	7	8	9	10
week 3	11	12	13	14	15	16	17
week 4	18	19	20	21	22	23	24
week 5	25	26	27	28	29	30	31
avr-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1	1	2	3	4	5	6	7
week 2	8	9	10	11	12	13	2019_7
week 3	15	16	17	18	19	20	21
week 4	22	23	24	25	26	27	28
week 5	29	30					
mai-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1			1	2	3	4	5
week 2	6	7	8	9	10	11	12
week 3	13	14	15	16	17	18	19
week 4	20	21	22	23	24	25	26
week 5	27	28	29	30	31		
juin-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1						1	2
week 2	3	4	5	6	7	8	9
week 3	10	11	12	13	14	15	16
week 4	17	18	19	20	21	22	23
week 5	2020_22	2020_23	2020_24	2020_25	2020_26	2020_27	2020_28
juil-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1	2020_6	2020_7	2020_1	2020_2	2020_3	2020_11	2020_5
week 2	2020_6	2020_7	2020_8	2020_9	2020_10	2020_11	2020_14
week 3	2020_20	2020_21	2020_15	2020_23	2020_17	2020_18	2020_19
week 4	2020_20	2020_21	2020_15	2020_23	2020_24	2020_25	2020_26
week 5	2020_27	2020_28	2020_29				
août-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1				2020_6	2020_7	2020_1	2020_2
week 2	2020_3	2020_4	2020_5	2020_6	2020_7	2020_8	2020_9
week 3	2020_10	2020_4	2020_5	2020_9	2020_8	2020_8	2020_9
week 4	2020_10	2020_4	2020_5	2020_27	2020_28	2020_29	2020_30
week 5	2020_10	2020_4	2020_5	2020_27	2020_28	2020_29	
sept-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1							2020_30
week 2	2020_7	2020_1	2020_2	2020_3	2020_4	2020_5	2020_6
week 3	2020_7	2020_8	2020_9	2020_10	2020_11	2020_12	2020_13
week 4	2020_14	2020_15	2020_16	2020_17	2020_18	2020_19	2020_20
week 5	2020_21	2020_22	2020_23	2020_24	2020_25	2020_26	2020_27
week 6	2020_28						
oct-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1		2020_29	2020_30	2020_1	2020_2	2020_3	2020_4
week 2	2020_5	2020_6	2020_7	2020_8	2020_9	2020_10	2020_11
week 3	2020_12	2020_13	2020_14	2020_15	2020_16	2020_17	2020_18
week 4	2020_12	22	23	24	25	26	27
week 5	28	29	30	24			
nov-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1					1	9	3
week 2	4	5	6	7	8	9	10
week 3	11	12	13	14	15	16	17
week 4	18	19	20	21	22	23	24
week 5	25	26	27	28	29	30	
déc-19	lun.	mar.	mer.	jeu.	ven.	sam.	dim.
week 1							1
week 2	2	3	4	5	6	7	8
week 3	9	10	11	12	13	14	15
week 4	16	17	18	19	20	21	22
week 5	23	24	25	26	27	28	29
week 6	30	31					

Figure 3 Indication des données manquantes en 2019 et des jours de 2019 ou 2020 utilisés pour les compléter.

Les fichiers de 2019 complétés s'appellent « A86-I/52+0200_2019_6mn.txt » et « A86-E/52+1200P_2019_6mn.txt ». Ils sont représentés graphiquement en calendrier mensuel pour vérifier qu'après l'ajout des données manquantes, les débits et les vitesses semblent corrects, ce qui est le cas.

Finalement, les données toutes les 6 mn sont transformées en données toutes les 15 mn pour être au même pas de temps que les données climatiques. Comme les données climatiques sont en heure d'hiver et que les données de la DIRIF sont présentées en heure locale, celles-ci sont donc ajustées pour être en heure d'hiver. Les données sur 15 mn du nombre de véhicules sont calculées en faisant la somme du nombre de véhicules sur deux périodes de 6 mn et de la moitié d'une période de 6 mn (donc 3 mn). Les données sur 15 mn de la vitesse des véhicules est la moyenne des vitesses sur trois périodes de 6 mn (2 affectées d'un coefficient de 6 et une affectée d'un coefficient de 3, le tout divisé par 15). **Une fois le fichier créé, les données sont représentées graphiquement sous forme de calendrier et comparées aux données toutes les 6 mn. Les résultats sont bons.**

L.3 Sélection du fichier de données final

Pour déterminer laquelle des 2 stations de mesures choisir, des données statistiques de trafic basées sur les valeurs toutes les 15 mn ont été calculées. La figure 4 donne le nombre de véhicules moyen journalier mensuel en comparant les deux stations.

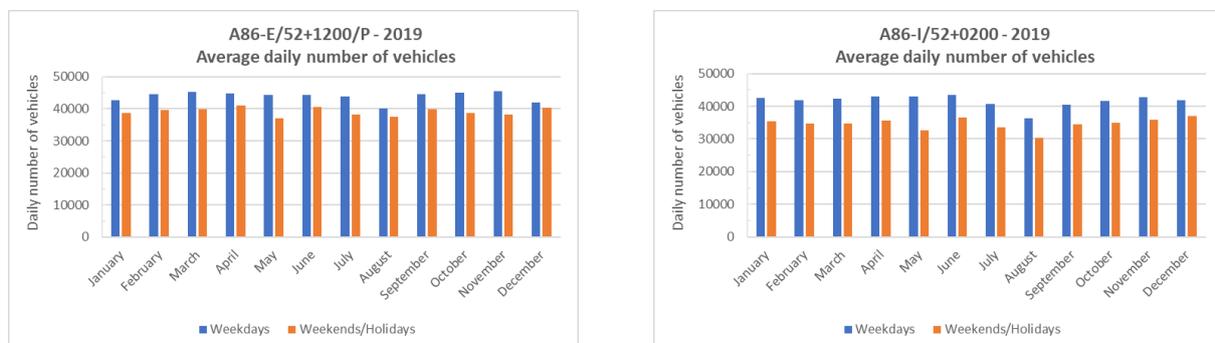


Figure 4 Nombre de véhicules moyen journalier, par mois

La station A86-E/52+1200/P (Ouest en Est) a compté davantage de véhicules par jour que la station A86-I/52+0200 (Est en Ouest). A l'année, la moyenne journalière de E/52 est de 43900 véhicules/jour en semaine (41647 pour I/52, soit 5% de moins) et de 39120 véhicules/jour le weekend ou jours fériés (34660 pour I/52 soit 12% de moins).

La figure 5 présente la valeur médiane horaire mensuelle de la vitesse des véhicules mesurée les jours de semaine et les weekends/jours fériés, pour chacune des deux stations. Les vitesses rapportées par la station E/52 sont représentatives de la limitation de vitesse à 70 km/h, les valeurs médianes dépassent cette valeur d'environ 10 km/h et seulement entre 21h et 6h. Ce

n'est pas le cas de celles rapportées par la station I/52 qui peuvent atteindre 90 km/h ou plus le soir en semaine et pendant le weekend. En semaine, pour cette station, il est surprenant d'observer une réduction des vitesses à 60 km/h entre 2h et 5h du matin. De plus en semaine, la vitesse n'est réduite que le matin entre 7h et 10h puis elle ne cesse d'augmenter au fil de la journée.

Le weekend ou les jours fériés, la station I/52 ne présente jamais de réduction de vitesse dans la journée, contrairement à la station E/52 qui présente des vitesses réduites à partir de 11h du matin et jusqu'à 20h tous les mois sauf le mois d'août pendant les vacances d'été.

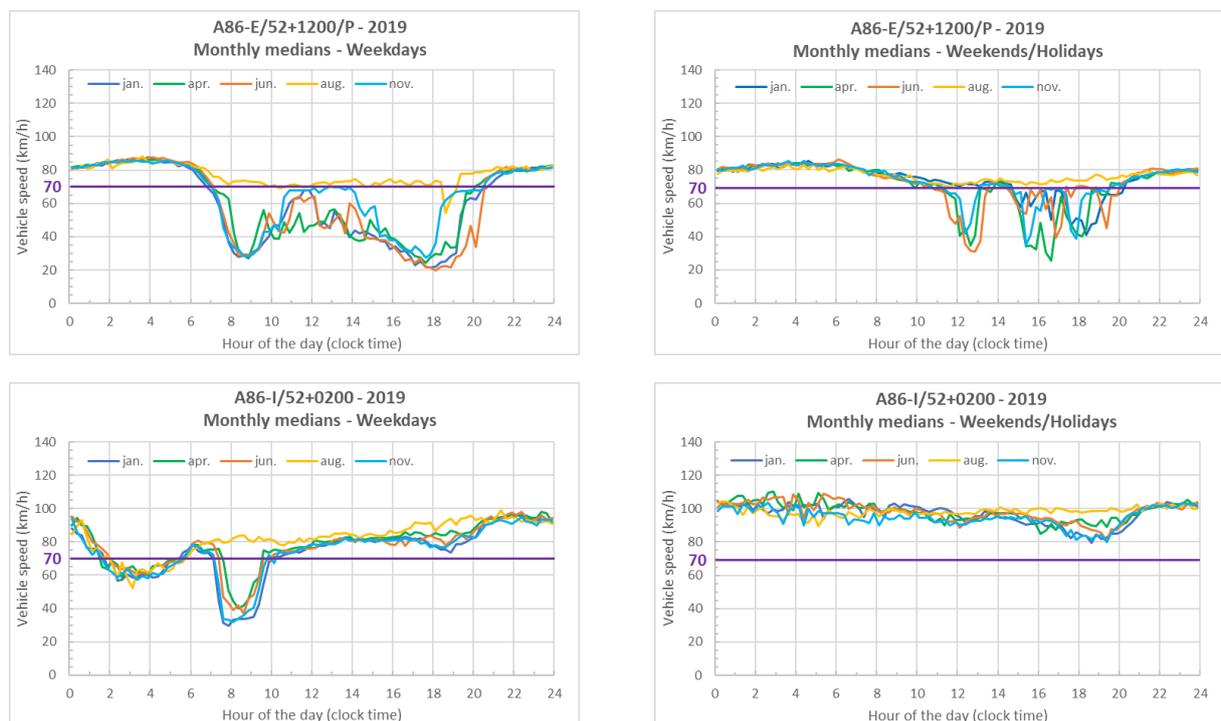


Figure 5 Valeur médiane horaire mensuelle de la vitesse des véhicules pour les jours de semaine et de weekend pour les deux stations de mesures A86-E/52+1200/P et A86-I/52+0200.

La Figure 6 présente la valeur médiane mensuelle du nombre de véhicules mesuré en 15 mn, les jours de semaine et de weekend pour les deux stations de mesures A86-E/52+1200/P et A86-I/52+0200. Le nombre de véhicules rapporté par la station E/52 pendant les jours de semaine présente deux pics : l'un entre 6h et 8h et l'autre entre 18h et 21h, chacun des pics est précédé et suivi par un trafic plus réduit avec toutefois une augmentation plus conséquente sur la tranche horaire 12h-14h (pause de midi). En semaine, la station I/52 présente également deux pics, celui du matin entre 6h et 8h, mais le deuxième plus étalé commence à 16h et s'achève à 20h. Avec I/52, le trafic minimum est entre 12h et 15h. Le weekend ou les jours fériés, le nombre de véhicules atteint un maximum de 700 véhicules en 15 mn plus rapidement avec E/52 (dès 10h) qu'avec I/52 (à partir de 12h). Il diminue ensuite à partir de 20h. Cette différence explique pourquoi le nombre journalier de véhicules est plus

élevé le weekend avec E/52 qu'avec I/52. Comme on pouvait s'y attendre, le nombre minimal de véhicules dans la journée est atteint pendant le mois d'août. Dans la nuit, il est légèrement plus élevé au mois d'août peut-être en raison de départs en vacances nocturnes.

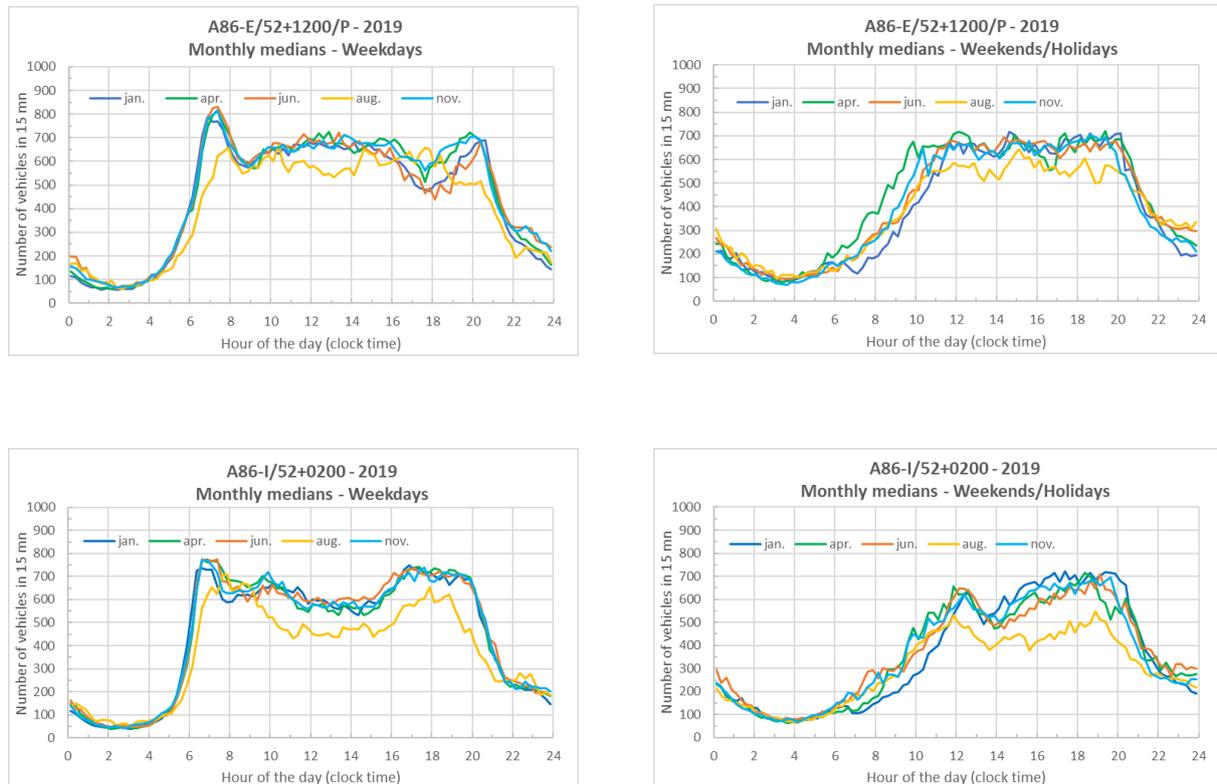


Figure 6 Valeur médiane mensuelle du nombre de véhicules mesuré en 15 mn, les jours de semaine et de weekend pour les deux stations de mesures A86-E/52+1200/P et A86-I/52+0200.

Compte tenu de l'observation des données des deux stations, nous choisissons d'utiliser celles de A86-E/52+1200/P (entrée du tunnel en sens inverse de circulation à celui du tunnel simulé). Cette station est une station dont l'entretien annuel est prioritaire (code /P) et les vitesses rapportées sont plus proches de la limite de vitesse à 70 km/h. Globalement les données semblent plus représentatives de la circulation au sein d'un tunnel routier urbain. Le fichier de données toutes les 15 mn pour 2019 (complété par 2020) est alors appelé « ANTONY_TRAFFIC.txt ».