N° d'ordre NNT : 2025ENTP0013

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

Ecole Doctorale N°162
MEGA - Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique

Spécialité de doctorat : Thermique-Énergétique

Soutenue publiquement le 11 décembre 2025, par :

Benjamin LEGRAND

Reproduction en environnement virtuel de scènes urbaines nocturnes pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage urbain

---

Devant le jury composé de :

Vincent BOUCHER, Directeur de recherche, Cerema Angers / Équipe Éclairage et Lumière	Rapporteur
Gaël OBEIN, Professeur des universités, LNE - CNAM / EPN03	Rapporteur
Kynthia CHAMILOTHORI, Maîtresse de conférences, Eindhoven University of Technology / Industrial Engineering and Innovation Sciences	Examinatrice
Guillaume LAVOUE, Professeur des universités, Centrale Lyon ENISE / LIRIS	Président et examinateur
Raphaël LABAYRADE, Professeur ENTPE, ENTPE / LTDS	Directeur de thèse
Céline VILLA, IDTPE Chercheure, Université Gustave Eiffel / COSYS - PICS-L	Co-encadrante de thèse

Remerciements

Je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury de ma thèse. Ainsi, je souhaite remercier Vincent Boucher et Gaël Obein pour avoir accepté de rapporter mon travail. Je souhaite également remercier Kynthia Chamilothori et Guillaume Lavoué pour avoir accepté d'en être examinateurs.

Je souhaite remercier le plus sincèrement possible mes deux encadrants de thèse qui ont su m'orienter, me former et confirmer mon appétence pour la réalisation de travaux scientifiques. Ainsi, je souhaite remercier Céline Villa pour son temps, son énergie fournie ainsi que pour les échanges constructifs que l'on a pu avoir ensemble autour de ce premier projet réalisé conjointement. Je souhaite également remercier Raphaël Labayrade pour son temps, pour m'avoir rassuré tout au long de la réalisation de ce travail et pour avoir échangé autour de sujets passionnants autant pour lui que pour moi.

Je souhaite remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, pour avoir apporté leurs regards critiques via leurs expertises ou pour avoir contribué de près comme de loin à l'aboutissement de ce travail. Ainsi, je souhaite remercier Émile Bouillot et Elisa Dessenne pour nos réflexions communes. Je souhaite également remercier l'ensemble des chercheurs, experts et ingénieurs avec lesquels j'ai eu la chance d'échanger. De plus, je souhaite remercier l'ensemble des 84 participants aux expériences que j'ai menées durant mes travaux de thèse, grâce à qui, les travaux de cette thèse ont pu être concrétisés.

Je souhaite remercier ma famille proche qui, bien que nous soyons éloignés, m'a permis de garder la détermination pour aboutir dans ce travail. Ainsi, je remercie mon père, ma mère, mes frères et sœurs, mes deux tantes, mes cousins et mes grands-parents.

Je souhaite remercier l'ensemble de mes amis qui ont réussi à me faire penser à autre chose et avec lesquels nous avons partagé d'excellents moments.

Enfin, comment ne pas finir en remerciant l'ensemble des collègues que j'ai pu voir passer au cours de ces trois années à l'ENTPE et nos innombrables pauses cafés partagées.

Table des matières

Table des figures **10**

Liste des tableaux **18**

Introduction **23**

1 État de l'art **27**

1.1 Système visuel et photométrie 28

1.1.1 Fonctionnement de l'œil 28

1.1.2 Type de vision et sensibilité spectrale 29

1.1.3 Radiométrie et photométrie 33

1.1.4 Photométrie mésopique 34

1.1.5 Espaces colorimétriques 35

1.1.6 Modèles d'apparence colorée en vision mésopique 41

1.2 Qualité de l'éclairage d'une scène urbaine nocturne pour les piétons 44

1.2.1 Description d'une scène urbaine nocturne 44

1.2.2 Critères de qualité de l'éclairage pour les piétons 46

1.2.3 Évaluation de la qualité de l'éclairage : matériel et méthodes 48

1.3 Acquisition de scènes urbaines nocturnes via un appareil photographique numérique 53

1.3.1 Description d'un appareil photographique numérique 53

1.3.2 Principe et limites des étalonnages colorimétriques 56

1.3.3 Principe et limites des méthodes de reconstruction spectrale 58

1.4 Restitution de scènes urbaines nocturnes sur un dispositif d'affichage 59

1.4.1 Définition des dispositifs d'affichage 60

1.4.2 Etalonnage colorimétrique d'un dispositif d'affichage 60

1.4.3 Algorithme de mise en correspondance tonale 63

1.5 Évaluation et validation d'ambiances lumineuses en environnement virtuel 65

1.5.1 Évaluation d'ambiances lumineuses en environnement virtuel 65
1.5.2 Validation de l'utilisation d'environnement virtuel pour l'évaluation d'ambiances lumineuses 67
1.6 Conclusion de l'état de l'art 73

I Développement et validation de méthodes pour l'acquisition de données photométriques et radiométriques de scènes urbaines nocturnes 76

2 Étude des outils d'étalonnage colorimétrique 79
2.1 Objectifs, démarche scientifique et hypothèses 80
2.1.1 État de l'art 80
2.1.2 Objectifs 84
2.1.3 Démarches et hypothèses 84
2.2 Étude sur l'amélioration des protocoles d'acquisition pour les outils d'étalonnage colorimétrique - environnements photopiques 85
2.2.1 Matériels et méthodes 86
2.2.2 Résultats 91
2.3 Étude pour des scènes comportant une grande dynamique de luminance - environnements photopiques et mésopiques 97
2.3.1 Matériels et méthodes 97
2.3.2 Résultats 100
2.4 Étude pour des scènes comportant plusieurs sources de caractéristiques spectrales différentes - environnements photopiques 107
2.4.1 Matériels et méthodes 107
2.4.2 Résultats 110
2.5 Discussion 113
2.5.1 Contributions 113
2.5.2 Limites et perspectives 115
2.6 Conclusion 116

3 Étude des outils de reconstruction spectrale 118
3.1 Objectifs, démarche scientifique et hypothèses 119
3.1.1 État de l'art 119
3.1.2 Objectifs 124
3.1.3 Démarches et hypothèses 124
3.2 Méthode de reconstruction par splines : proposition d'une formulation matricielle et étude de sensibilité 125

3.2.1 Matériels et méthodes . . . 125
3.2.2 Résultats . . . 134
3.3 Discussion . . . 144
3.3.1 Contributions . . . 144
3.3.2 Limites et perspectives . . . 144
3.4 Conclusion . . . 145

II Développement et validation d'une méthode pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage urbain nocturne en environnement virtuel 150

4 Établissement d'une vérité terrain : expérimentation sur site 153
4.1 Objectifs, démarche scientifique et hypothèses . . . 154
4.1.1 État de l'art . . . 154
4.1.2 Objectifs . . . 155
4.1.3 Démarche et hypothèses . . . 155
4.2 Matériels et méthodes . . . 156
4.2.1 Panel . . . 156
4.2.2 Stimuli . . . 156
4.2.3 Protocole expérimental . . . 161
4.2.4 Procédure . . . 163
4.2.5 Plan expérimental . . . 163
4.2.6 Analyses statistiques . . . 163
4.3 Résultats . . . 165
4.3.1 Statistiques descriptives et analyse préliminaire . . . 165
4.3.2 Comparaisons des évaluations en position statique et dynamique . . . 168
4.3.3 Tâche FER . . . 169
4.4 Discussion . . . 171
4.4.1 Contributions . . . 171
4.4.2 Limites et perspectives . . . 172
4.5 Conclusion . . . 173

5 Expérimentation en environnement virtuel et comparaisons réel et virtuel 179
5.1 Objectifs, démarche scientifique et hypothèses . . . 180
5.1.1 État de l'art . . . 180
5.1.2 Objectifs . . . 181
5.1.3 Démarche et hypothèses . . . 181

5.2 Expérience sur l'évaluation de la qualité de l'éclairage en environnement virtuel - expérience 5.1 . . . 182
5.2.1 Matériels et méthodes . . . 182
5.2.2 Résultats . . . 195
5.3 Expérience sur les conditions lumineuses ambiantes - expérience 5.2 . . . 211
5.3.1 Rappel des objectifs . . . 211
5.3.2 Matériels et méthodes . . . 211
5.3.3 Résultats . . . 216
5.4 Discussion . . . 218
5.4.1 Contributions . . . 218
5.4.2 Limites et perspectives . . . 221
5.5 Conclusion . . . 224

6 Conclusion, contributions et perspectives 229
6.1 Conclusion . . . 230
6.2 Contributions scientifiques . . . 232
6.2.1 Expériences sur les outils d'étalonnage colorimétrique . . . 232
6.2.2 Expérience sur l'outil de reconstruction spectrale . . . 233
6.2.3 Expériences sur le recueil de ressentis subjectifs de la qualité de l'éclairage . 233
6.3 Perspectives . . . 234
6.3.1 Expériences sur les outils d'étalonnage colorimétrique . . . 234
6.3.2 Expérience sur l'outil de reconstruction spectrale . . . 234
6.3.3 Expériences sur le recueil de ressentis subjectifs de la qualité de l'éclairage . 235
6.3.4 Réflexion finale . . . 236

Production scientifique 237

Bibliographie 239

7 Annexes 248
7.1 Notions de géométrie . . . 249
7.2 Différence colorimétrique ΔE^*_{00} . . . 252
7.3 Description de l'algorithme de Reinhard et al. (2002) . . . 253
7.4 Synthèse des travaux présentés dans l'état de l'art sur les comparaisons entre les évaluations en environnements réel et virtuel . . . 255
7.5 Estimation des transmittances spectrales de la caméra Nikon D850 . . . 256

7.6 Fonction matlab et exemple d'utilisation de la forme matricielle des splines cubiques de Hermite . . . 261
7.7 Éclairement dans le plan de l'œil le long des parcours - mesures sur site . . . 264
7.8 Comparaison sur site incluant la position statique bis de la scène B . . . 265
7.9 Exemple de questionnaire utilisé lors de l'expérience en environnement réel . . . 268
7.10 Statistiques descriptives supplémentaires - expérience en environnement réel . . . 272
7.11 Méthode pour l'analyse des données de la tâche de perception des couleurs . . . 277
7.12 Caractérisation en luminance de l'écran utilisé lors de l'expérience en environnement virtuel . . . 281
7.13 Caractérisation colorimétrique de l'écran utilisé lors des expériences en environnement virtuel . . . 284
7.14 Étude sur les méthodes d'estimation des cartes de luminances à partir d'images RVB dans le contexte de scènes ayant de grande gamme de dynamique et des niveaux lumineux photopiques et mésopiques . . . 285
7.15 Description de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) . . . 289
7.16 Statistiques descriptives supplémentaires - expérience en environnement virtuel . . . 294
7.17 Comparaison entre les évaluations sur site après une marche de 15 m et en environnement virtuel . . . 302
7.18 Cartes de luminance pour les conditions lumineuses ambiante haute et ambiante basse - expérience 5.2 . . . 306
7.19 Questionnaire pour l'expérience en environnement virtuel sur les conditions lumineuses ambiantes . . . 307
7.20 Extraction des grandeurs photométriques et contrastes perçus à partir des réponses relatives à la tâche de détection des contrastes des participants lors de l'expérience sur les comparaisons entre les conditions lumineuses ambiantes . . . 308
7.20.1 Extraction des grandeurs photométriques . . . 308
7.20.2 Estimation des contrastes perçus . . . 311
7.21 Statistiques descriptives supplémentaires - expérience sur les conditions lumineuses ambiantes . . . 313

Table des figures

1 Schéma présentant les deux types d'évaluation envisagés dans les travaux de la thèse 24

1.1 Classification des ondes électromagnétiques en fonction de leur plage de longueur d'onde. Schéma provenant de Zaatour (2021) 28

1.2 Schéma simplifié d'un œil 28

1.3 Fonctions de sensibilités spectrales relatives des cellules photoréceptrices de l'œil projetées dans le plan de la cornée, données issues de la CIE (2019a, 2019c) 29

1.4 Illustrations de scènes lumineuses sollicitant les différents modes de vision de l'œil 30

1.5 Courbes d'efficacité lumineuse relative, données issues de la CIE 30

1.6 Illustration de différentes couleurs en faisant varier le paramètre de luminance (a), chroma (b) et teinte (c) 31

1.7 Illustrations des différents phénomènes qu'introduit la vision mésopique 32

1.8 Fonctions colorimétriques associées à l'espace CIE-RGB, données dérivées de CIE (2019b) 36

1.9 Fonctions colorimétriques associées à l'espace CIE-XYZ 2°, données issues de la CIE CIE (2019b) 37

1.10 Gamut de l'œil représenté dans le repère xy avec x+y+z = 1, diagramme obtenu à partir des valeurs issues de la CIE (2019b) 38

1.11 Illustration d'une scène urbaine nocturne comportant : (a) une forte dynamique de luminance ; (b) un fort contraste ; (c) divers types de matériaux ; (d) diverses sources lumineuses 45

1.12 Catégorisation des critères de qualité de l'éclairage par Rahm and Johansson (2016) 47

1.13 Illustration du fonctionnement d'un appareil photographique numérique 53

1.14 Illustration de différentes matrices de filtres colorés 54

1.15 Illustration de la capture issue d'images LDR d'une scène lumineuse qui présente une forte dynamique de luminance à ouverture constante (D = f/4, où f correspond à la focale de l'appareil photographique ici f = 28 mm) 54

1.16 Diagramme de chromaticité CIE 1931 xy où les gamuts de l'espace sRGB et Adobe-RGB ont été représentés. Le fond coloré en forme d'arche correspond à l'ensemble des couleurs qu'il est possible pour l'œil de capter dans l'espace CIE-XYZ (2°) . . 55

1.17 Illustration de la création d'un modèle d'étalonnage colorimétrique local 57
1.18 Illustration des outils permettant l'acquisition de données colorimétriques à partir d'une caméra numérique 58
1.19 Principe général d'acquisition via une caméra numérique et restitution via un dispositif d'affichage 59
1.20 Principe de fonctionnement d'un dispostif d'affichage type LCD, OLED ou miniLED 60
1.21 Illustration de l'algorithme de Reinhard et al. (2002) 64
1.22 Principe général d'acquisition via une caméra numérique et restitution via un dispositif d'affichage avec une validation psychovisuelle 65
1.23 Illustration des principales différences entre les évaluations d'ambiances lumineuses en environnement réel et virtuel 66

2.1 Luminances spectriques normalisées des quatre sources utilisées pour les expériences sur les étalonnages colorimétriques. Mesures en réflexion sur une case blanche d'une des palettes de patchs colorés 86
2.2 Illustration des palettes de patchs colorés utilisées lors des expériences sur les étalonnages colorimétriques 87
2.3 Transmittances spectrales de la caméra estimées en utilisant la méthode de reconstruction spectrale par splines 90
2.4 Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues pour les jeux de données réelles et synthétiques - interpolation . . . 93
2.5 Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues pour les jeux de données réelles et synthétiques - extrapolation . . 93
2.6 Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en utilisant la palette d'échantillons CC24 et CC96 pour créer le modèle d'étalonnage colorimétrique - interpolation 94
2.7 Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en utilisant la palette d'échantillons CC24 et CC96 pour créer le modèle d'étalonnage colorimétrique - extrapolation 95
2.8 Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en utilisant la palette d'échantillons CC24 éclairée à un ou deux niveaux lumineux pour créer le modèle d'étalonnage colorimétrique - interpolation 96
2.9 Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en utilisant la palette d'échantillons CC24 éclairée à un ou deux niveaux lumineux pour créer le modèle d'étalonnage colorimétrique - extrapolation 97
2.10 Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - interpolation . 102
2.11 Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de l'amplitude de l'extrapolation en luminance (extrapolations positive et négative) 102

2.12 Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - interpolation - étalonnages passant par l'espace LMSR pour un blanc de référence à 3 cd/m^2 . . . 104

2.13 Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - interpolation - étalonnages passant par l'espace LMSR pour un blanc de référence à environ 1000 cd/m^2. 104

2.14 Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - interpolation - étalonnages passant par l'espace CIE-XYZ (2°) pour un blanc de référence à environ 1000 cd/m^2 105

2.15 Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - extrapolations négative et positive - étalonnages passant par l'espace LMSR pour un blanc de référence à environ 1000 cd/m^2 105

2.16 Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - extrapolations négative et positive - étalonnages passant par l'espace CIE-XYZ (2∘) pour un blanc de référence à environ 1000 cd/m^2 106

2.17 Transmittances spectrales des filtres colorés utilisés lors des expériences portant sur les étalonnages 6D vers 3D. Les mesures ont été réalisées dans la configuration géométrique suivante : $\theta_{in} = 0$, $\phi_{in} = 0$, $\theta_{out} = 45$ et $\phi_{out} = 0$ 108

2.18 Photographies de deux palettes de patchs colorés capturées nativement par la caméra, et au travers des filtres « rouge » et « orange » 108

3.1 Photographie du montage mis en place afin de réaliser les acquisitions spectrales (luminances spectriques) des matériaux éclairés par une ou deux sources lumineuses 125

3.2 Distributions spectrales des sources utilisées lors de l'étude utilisant l'outil de reconstruction spectrale par splines. La mesure a été réalisée en réflexion sur le patch blanc de la palette CC24 126

3.3 Transmittances spectrales des filtres colorés utilisés lors de l'étude sur la méthode de reconstruction spectrale par splines 127

3.4 Polynômes de Hermite de degré 3 représentés sur le segment $[0\,;\,1]$ 129

3.5 Exemple d'estimation par splines cubiques de Hermite utilisant une répartition régulière des nœuds 129

3.6 Exemple d'oscillations observées au niveau des extrémités de l'intervalle de définition lors des reconstructions (avant traitement) 130

3.7 Exemples de reconstructions spectrales présentant des GFC de 85 %, 90 % et 98 % 134

3.8 Résultats de l'indicateur GFC (en %) pour les données synthétiques sans bruit . . 136

3.9 Résultats de l'indicateur RMSE (en %) pour les données synthétiques sans bruit . 136

3.10 Résultats de l'indicateur ΔE^*_{00} pour les données synthétiques sans bruit dans les domaines photopique et mésopique 137

3.11 Exemple de reconstructions spectrales – données synthétiques sans bruit 138
3.12 Résultats de l'indicateur GFC (en %) pour des données comportant 1 % de bruit . 139
3.13 Résultats de l'indicateur GFC (en %) pour des données comportant 3 % de bruit . 139
3.14 Résultats de l'indicateur RMSE (en %) pour des données comportant 1 % de bruit 140
3.15 Résultats de l'indicateur RMSE (en %) pour des données comportant 3 % de bruit 140
3.16 Résultats de l'indicateur ΔE^*_{00} pour des données comportant 1 % de bruit dans les domaines photopique et mésopique 141
3.17 Résultats de l'indicateur ΔE^*_{00} dans le domaine mésopique pour des données comportant 3 % de bruit 142
3.18 Exemple de reconstructions spectrales - données comportant 1 % de bruit 142
3.19 Exemple de reconstructions spectrales - données comportant 3 % bruit 143
3.20 Exemple de reconstructions spectrales - données comportant 5 % bruit 143
3.21 Exemple de reconstructions spectrales - données comportant 10 % bruit 143
3.22 Cartes de différences colorimétriques (voir (c) et (f)) pour les images initiales (a) et (d) à partir des estimations des cartes de luminances (b) et (e), en utilisant le standard sRGB 149

4.1 Vue aérienne fusionnée avec une carte IGN représentant les environs du campus de l'ENTPE où la localisation des scènes utilisées lors de l'expérience en environnement réel ont été ajoutées. Fonds de carte issus du site geoportail.gouv.fr 157
4.2 Photographies des trois scènes (A, B et C) utilisées lors de l'expérience en environnement réel. Les photographies ont été prises aux niveaux des positions statiques des participants 158
4.3 Schéma à l'échelle représentant les alentours des parcours A et B 158
4.4 Cartes d'éclairements horizontaux le long du parcours de 15 m pour les scènes de l'expérience en environnement réel 159
4.5 Modèles et images utilisées pour la tâche FER. Les images proviennent de la banque d'image de Ebner et al. (2010) 160
4.6 Photographie de la scène statique bis en comparaison avec la scène statique de la scène B utilisée lors de l'expérience en environnement réel. La photographie statique bis a été prise à la fin du parcours de 15 m 160
4.7 Nuancier coloré utilisé pour reporter les perceptions colorées du sol et de l'herbe des participants. Les traits rouges illustrent les réponses d'un participant. 162
4.8 Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol et de l'herbe sur site . . 166
4.9 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item fusionné portant sur le sentiment de sécurité (S - Statique ; D - Dynamique) 168
4.10 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item sentiment de sécurité fusionné (évaluations dynamiques) par classe de réponse FER - scène A 170
4.11 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item sentiment de sécurité fusionné (évaluations dynamiques) par classe de réponse FER - scène B 170

4.12 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item sentiment de sécurité fusionné (évaluations dynamiques) par classe de réponse FER - scène C 171

5.1 Schéma à l'échelle du dispositif expérimental avec une vue de profil (à gauche) et une vue de face (à droite). La source du plafonnier (à 2.72 m du sol) est éteinte pour cette expérience. Les cotations sont exprimées en mètre 184

5.2 Photographie du dispositif expérimental. Note : le plafonnier était éteint lors de l'expérience 184

5.3 Cartes de luminance dans la boîte « à vide » et avec le carton devant l'écran . . . 185

5.4 Illustration des trois chaînes d'acquisition / restitution utilisées lors de l'expérience en environnement virtuel 186

5.5 Illustration d'un stimulus pour la tâche FER 189

5.6 Stimuli obtenus. Note : Les consignes RVB des images ont été multipliées par 5 pour l'impression du manuscrit 190

5.7 Illustration du plan expérimental 192

5.8 Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol et de l'herbe - scène A . 197

5.9 Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol et de l'herbe - scène B . 198

5.10 Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol et de l'herbe - scène C . 199

5.11 Densité spectrale de la source du plafonnier. Mesure obtenue par réflexion sur un matériau type spectralon 211

5.12 Nuancier de gris utilisé pour la tâche de détection des contrastes. Note : les consignes RVB ont été multipliées par 5 pour l'impression du manuscrit 212

5.13 Illustration de la procédure de passation de l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes - ordre : haute puis basse 214

5.14 Illustration de la procédure de passation de l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes - ordre : basse puis haute 215

7.1 Illustration d'un angle solide 249

7.2 Illustration d'un angle solide élémentaire 250

7.3 Illustration de l'étendue géométrique élémentaire 251

7.4 Illustration d'estimation d'une luminance spectrique mesurée par des splines - 14 nœuds 256

7.5 Palettes de patchs colorés utilisées lors de la création du jeu de données servant à la caractérisation des transmittances spectrales des filtres colorés de la caméra . . 257

7.6 Sources utilisées lors de l'acquisition des données qui ont servi à l'estimation des transmittances spectrales de la caméra en utilisant l'outil de reconstruction spectrale 258

7.7 Transmittances spectrales de la caméra estimées en utilisant la méthode de reconstruction spectrale 258

7.8 Transmittances spectrales de la caméra estimées en utilisant le monochromateur (mono) et après lissage par splines (mono + splines) 260

7.9 Comparaison des transmittances spectrales de la caméra estimées en utilisant le monochromateur (mono + splines) et l'outil de reconstruction spectrale (rec splines) 260

7.10 Résultat de l'exemple d'utilisation du code de lissage par splines cubiques de Hermite 262

7.11 Éclairements verticaux dans le plan de l'œil le long du parcours de 15 m pour les scènes de l'expérience en environnement réel 264

7.12 Photographie de la scène statique bis en comparaison avec la scène statique de la scène B utilisée lors de l'expérience en environnement réel. La photographie statique bis a été prise à la fin du parcours de 15 m 265

7.13 Questionnaire expérience en environnement réel - page de garde 268

7.14 Questionnaire expérience en environnement réel - questionnaire principal pour une scène lors de l'évaluation en position statique avec les items de perceptions colorées et l'item de la tâche FER 269

7.15 Questionnaire expérience en environnement réel - questionnaire principal pour une scène lors de l'évaluation en position dynamique avec les items de perceptions colorées et l'item de la tâche FER 270

7.16 Questionnaire expérience en environnement réel - questionnaire final 271

7.17 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Sombre–Lumineuse » 272

7.18 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Agréable–Désagréable » . . . 272

7.19 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Chaude–Froide » 273

7.20 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 273

7.21 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 274

7.22 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Totalement satisfaisant » 274

7.23 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité » 275

7.24 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » . . . 275

7.25 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 276

7.26 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 276

7.27 Nuancier coloré utilisé pour la tâche de perception colorée du sol et de l'herbe. Les traits rouges illustrent les réponses d'un participant 277

7.28 Densités spectrales normalisées des sources lumineuses qui éclairaient la barre colorée. Note : les densités spectrales ont été lissées en utilisant un filtre de Savitzky-Golay à l'ordre 3 avec une fenêtre de 100 nm 279

7.29 Illustration des différentes sections colorées 279

7.30 Exemple de patchs rectangulaires imprimés sur une feuille pour réaliser les mesures correspondantes à la section « bleu » de la barre colorée 280
7.31 Illustration de la conversion des données recueillies via la barre colorée en données colorimétriques x et y 280
7.32 Profil Consigne–Luminance de l'écran (mode LDR) utilisé lors des expériences en environnement virtuel 281
7.33 Profil Consigne–Luminance de l'écran (mode HDR) utilisé lors des expériences en environnement virtuel 282
7.34 Photographie du dispositif d'affichage - source « *Cool* » 285
7.35 Schéma du montage fourni dans le rapport du laboratoire PICS-L de l'Université Gustave Eiffel concernant le montage utilisé lors de la caractérisation de la caméra 286
7.36 Image initiale avec sa carte de luminance estimée à partir du standard sRGB . . . 289
7.37 Cartes de luminances modifiées en fonction du nombre de flous gaussiens appliqués. Note : La fonction T est prise linéaire (dans le domaine logarithmique) 291
7.38 Image initiale en comparaison avec l'image prenant en compte les phénomènes liés à la vision mésopique 292
7.39 Illustration de la mise en place de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) . . . 293
7.40 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Sombre–Lumineuse » 294
7.41 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Agréable–Désagréable » . . . 294
7.42 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Chaude–Froide » 295
7.43 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 295
7.44 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 296
7.45 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Totalement satisfaisant » 296
7.46 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité » 297
7.47 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » . . . 297
7.48 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 298
7.49 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 298
7.50 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item fusionné portant sur le sentiment de sécurité 299
7.51 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Dans l'environnement virtuel, j'ai eu le sentiment "d'y être" : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 299

7.52 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je me suis senti présent(e) dans l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 300

7.53 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'étais complètement captivé(e) par l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » 300

7.54 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Comment l'environnement virtuel vous a-t-il semblé : Complètement réel–Pas du tout réel » 301

7.55 Cartes de luminance dans le dispositif expérimental pour les deux conditions lumineuses ambiantes 306

7.56 Questionnaire utilisé pour le recueil des jugements subjectifs lors de l'expérience en environnement virtuel sur les conditions lumineuses ambiantes 307

7.57 Mesures de luminance sur le de nuancier gris - expérience sur les conditions lumineuses ambiantes 309

7.58 Mesures des luminances moyennes sur le nuancier de gris - une courbe correspond à un niveau lumineux de l'écran 309

7.59 Reflet induit par la condition lumineuse ambiante haute sur l'écran. En l'absence de reflet l'écran est censé être uniformément noir 310

7.60 Profil de luminance pour le réglage de l'écran 12 - condition lumineuse haute . . . 310

7.61 Profil de luminance pour le réglage de l'écran 5 - condition lumineuse basse 311

7.62 Contrastes perçus le long du nuancier de gris pour un participant de 29.7 ans pour un réglage au niveau maximum de l'écran en condition ambiante haute et le réglage 5 de l'écran en condition lumineuse ambiante basse 312

7.63 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Sombre–Lumineuse » 313

7.64 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité » 313

7.65 Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - différence de contraste perçu ΔC_p . . 314

Liste des tableaux

1.1 Les différents modes de fonctionnement de l'œil. Les seuils sont issues de Rea (2000) 29

1.2 Coefficients du modèle de Shin et al. (2004) fournis dans l'article original 42

1.3 Coefficients du modèle de Cao et al. (2008) fournis dans l'article original. 43

1.4 Exemple d'items relevés des questionnaires de la littérature scientifique relatifs aux critères de qualité de l'éclairage pour les piétons 52

1.5 Récapitulatif des différences entre les technologies des dispositifs d'affichage couramment utilisés 61

1.6 Récapitulatif des différences entres les technologies de dispositif d'affichage couramment utilisées 67

1.7 Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Perception de l'ambiance lumineuse ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure 70

1.8 Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de performances visuelles. En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure 71

1.9 Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Inconfort dû à l'éblouissement ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure 71

1.10 Synthèse de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Confort et satisfaction générale ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure 72

1.11 Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Sentiment de sécurité ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure 72

1.12 Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Impression de l'espace éclairé ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure 73

2.1 Niveaux de luminance pour chaque consigne des sources LED 87

2.2 Niveaux de luminance (photopique) pour chaque consigne des sources LED ajoutés au jeu de données initial 98

2.3 Niveaux de luminance pour chaque consigne des sources LED 108

2.4 Différences colorimétriques moyennes ΔE^*_{00} (et écarts-types) pour un modèle construit utilisant les données colorimétriques provenant de deux sources lumineuses et réalisant l'étalonnage colorimétrique pour une scène éclairée par l'une des deux sources - interpolation 111

2.5 Différences colorimétriques moyennes ΔE^*_{00} (et écarts-types) pour un modèle construit utilisant les données colorimétriques provenant de deux sources lumineuses et réalisant l'étalonnage colorimétrique pour une scène éclairée par une des deux sources - extrapolation 111

2.6 Différences colorimétriques moyennes ΔE^*_{00} (et écarts-types) pour un modèle construit utilisant les données colorimétriques provenant de deux sources lumineuses et réalisant l'étalonnage colorimétrique pour une scène éclairée par un mélange des deux sources - interpolation 112

2.7 Différences colorimétriques moyennes ΔE^*_{00} (et écarts-types) pour un modèle construit utilisant les données colorimétriques provenant de deux sources lumineuses et réalisant l'étalonnage colorimétrique pour une scène éclairée par un mélange des deux sources - extrapolation 113

2.8 Récapitulatif des hypothèses testés et de leurs validités - étalonnages colorimétriques 117

3.1 Synthèse des résultats de la littérature portant sur l'utilisation des outils de reconstruction spectrale. * : Analyse en composantes principales 123

3.2 Niveaux lumineux mesurés sur le patch blanc de la palette CC24 éclairé par les sources lumineuses utilisées lors de l'étude sur les reconstructions spectrales 126

3.3 Temps de calcul théorique (en secondes) nécessaire pour réaliser la reconstruction spectrale d'une image 1920x1080 - via la fonction Matlab « lsqcurvefit » 133

3.4 Temps de calcul théorique (en secondes) nécessaire pour réaliser la reconstruction spectrale d'une image 1920x1080 - via la méthode matricielle proposée 133

3.5 Récapitulatif des hypothèses testés et de leurs validités - reconstructions spectrales 146

4.1 Récapitulatif des caractéristiques photométriques des scènes utilisées lors de l'expérience en environnement réel 158

4.2 Données complémentaires concernant les stimuli FER 162

4.3 Taille d'effet des indicateurs η_p^2 et d de Cohen. D'après Watson (2021) 164

4.4 Résultats de la tâche FER pour l'expérience en environnement réel 165

4.5 α de Cronbach pour l'item fusionné « SENTIMENT_SECURITE_FUSION ». « ABC_SD » signifie que l'ensemble des stimuli (toutes scènes confondues et statique/dynamique confondus) a été pris pour le calcul de α. « ABC » signifie que l'ensemble des stimuli par position (toutes les évaluations statiques / toutes les évaluations dynamiques) et scènes a été pris pour le calcul de α. « A » ou « B » ou « C » signifie que seulement les données de la scène « A » ou « B » ou « C » ont été prises pour le calcul de α 167

4.6 Récapitulatif des hypothèses testées et de leur validité - expériences en environnement réel 174

4.7 Résultats des ANOVAs à mesures répétées de l'expérience en environnement réel hors item relatif au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$). Pour l'item 5) un test non paramétrique de Friedman a été réalisé 175

4.8 Résultats des ANOVAs à mesures répétées de l'expérience en environnement réel pour les items relatifs au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$). 176

4.9 Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur SCENE) hors items relatifs au sentiment de sécurité. 177

4.10 Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur SCENE) pour les items relatifs au sentiment de sécurité. 178

5.1 Table de synthèse des paramètres des chaînes d'acquisition / restitution 189

5.2 Résultats de la tâche FER pour l'expérience en environnement virtuel - R_LDR . 195

5.3 Résultats de la tâche FER pour l'expérience en environnement virtuel - W_LDR 195

5.4 Résultats de la tâche FER pour l'expérience en environnement virtuel - W_HDR 195

5.5 α de Cronbach pour l'item fusionné « SENTIMENT_SECURITE_FUSION ». « ABC_all » signifie que l'ensemble des stimuli (toutes scènes confondues et chaînes confondues) a été pris pour le calcul de α. « ABC » signifie que l'ensemble des stimuli par chaine (toutes les évaluations R_LDR ou W_LDR ou W_HDR) et scènes a été pris pour le calcul de α. « A » ou « B » ou « C » signifie que seulement les données de la scène « A » ou « B » ou « C » ont été prises pour le calcul de α 196

5.6 Statistiques descriptives et résultats des ANOVAs à mesures répétées des données de l'expérience en environnement virtuel pour les items relatifs au questionnaire IPQ. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$) 202

5.7 Statistiques descriptives et résultats des ANOVAs à mesures répétées des données de l'expérience en environnement virtuel hors item relatif au sentiment de sécurité et IPQ. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$). Pour les items 4) et 5) un test non-paramétrique de Friedman a été réalisé pour chaque scène 203

5.8 Statistiques descriptives et résultats des ANOVAs à mesures répétées des données de l'expérience en environnement virtuel pour les items relatifs au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$) 204

5.9 Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur SCENE) hors item relatif au sentiment de sécurité 205

5.10 Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur SCENE) pour les items relatifs au sentiment de sécurité 206

5.11 Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur CHAINE) hors item relatif au sentiment de sécurité 207

5.12 Résultats des analyses (ANOVAs à mesures répétées ou test de Mann-Whitney par scène*) des données collectées en environnement réel et virtuel (facteur inter-sujets : ENVIRONNEMENT_EVALUATION) hors item relatif au sentiment de sécurité. Les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$) 209

5.13 Résultats des analyses (ANOVAs à mesures répétées) des données collectées en environnement réel et virtuel (facteur inter-sujets : ENVIRONNEMENT_EVALUATION) pour les items relatifs au sentiment de sécurité. Les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$) 210

5.14 Résultats des ANOVAs à mesures répétées réalisées sur les données de l'expérience portant sur les conditions lumineuses ambiantes. Les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$) 217

5.15 Résultats des tests de Student (scène C) et Wilcoxon signé (scène B) sur les différences de contrastes perçus. Les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$) 217

5.16 Synthèse des résultats portant sur les comparaisons entre les évaluations réalisées sur site et en environnement virtuel 218

5.17 Récapitulatif des hypothèses testées et de leurs validités - expériences en environnement virtuel 226

5.18 Récapitulatif des hypothèses testées et de leurs validités - expériences en environnement virtuel 227

7.1 Synthèse de l'état de l'art sur les comparaisons entre évaluations en environnements réel et virtuel 255

7.2 Résultats des analyses statistiques hors items relatifs au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$) 266

7.3 Résultats de l'ANOVA à mesures répétées des items relatifs au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$) 267

7.4 Niveaux lumineux de la dalle miniLED de l'écran utilisé pour les expériences en environnement virtuel. Les valeurs en gras indiquent les réglages utilisés pour les expériences psychovisuelles (hors ajustement du réglage de l'écran par les participants lors de l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes) 283

7.5 Luminances des palettes de patchs colorées (max - min) en cd/m^2 286

7.6 Erreur relative moyenne (en %) (et écart-type) en fonction des méthodes d'estimation des luminances - interpolation / proche-interpolation. La référence étant les mesures effectuées avec le spectroradiomètre 288

7.7 Erreur relative moyenne (en %) (et écart-type) en fonction des méthodes d'estimation des luminances - extrapolation dans les zones sombres. La référence étant les mesures effectuées avec la caméra LMK 6-5L 288

7.8 Résultats des analyses (ANOVAs à mesures répétées ou test de Mann-Whitney par scène*) des données collectées en environnement réel et virtuel (facteur inter-sujet : ENVIRONNEMENT_EVALUATION) hors item relatif au sentiment de sécurité. Les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$) 304

7.9 Résultats des analyses (ANOVAs à mesures répétées) des données collectées en environnement réel et virtuel (facteur inter-sujet : ENVIRONNEMENT_EVALUATION) pour les items relatifs au sentiment de sécurité. Les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$) 305

7.10 Données des participants concernant la tâche de détection des contrastes. ΔC_p correspond à la différence de contraste perçu entre les conditions lumineuses ambiantes haute et basse 314

Introduction

L'éclairage public vise à éclairer les lieux pour les Hommes en fonction de leurs usages (*e.g.* éclairage routier, éclairage urbain, mise en valeur architecturale) pour assurer entre autres la sécurité de leurs déplacements, leur bien-être et l'attractivité des lieux nocturnes. Il joue un rôle majeur dans le contexte actuel de renforcement de la mobilité douce de jour comme de nuit. Ces éclairages sont soumis, pour une grande majorité, à des normes et réglementations (*e.g.* norme EN-13201, 2015). En particulier, l'arrêté du 27 décembre 2018, obligatoire, vise à réduire l'impact des installations d'éclairage sur l'environnement. De plus, l'éclairage public contribue grandement aux dépenses énergétiques des villes, avec en France 2,42 TWh par an (CEREMA, 2025). Ainsi, l'éclairage public de demain se doit de répondre à divers enjeux tels que la réduction des consommations d'énergie, la limitation de l'impact sur l'environnement et la santé, tout en préservant la sécurité routière et la sécurité des lieux et des personnes la nuit.

Ainsi, dans l'objectif de concilier les enjeux de transition écologique et énergétique, de nouvelles stratégies d'éclairage public sont mises en place (*e.g.* diminution des flux lumineux, modification des températures de couleur ou extinction de certaines rues). Néanmoins, il est nécessaire d'évaluer la qualité de l'éclairage de ces stratégies déployées, notamment pour les usagers piétons.

L'évaluation de la qualité de l'éclairage urbain nocturne pour les piétons peut s'effectuer de deux façons (voir Figure 1). La première consiste à recueillir les ressentis subjectifs des piétons. Ces évaluations réalisées par les piétons sur site peuvent être entreprises par les municipalités dans des démarches de consultation citoyenne / participative, ou dans un contexte de recherche permettant de produire des connaissances à des fins pré-normatives. Une autre façon de réaliser des évaluations portant sur la qualité de l'éclairage urbain nocturne consiste à effectuer des mesures physiques de l'environnement lumineux, sur lesquelles s'appuient des modèles perceptifs. Ce type d'évaluation permet de s'affranchir des contraintes logistiques et offre la possibilité d'appliquer et / ou de définir des normes et réglementations. On peut noter que l'évaluation de qualité de l'éclairage urbain nocturne, via le recueil de ressentis subjectifs ou l'acquisition de données terrain et mesures physiques, sont deux méthodes complémentaires. La première permet de centrer les évaluations sur le ressenti des usagers tandis que la seconde permet une approche opérationnelle, plus facilement déployable.

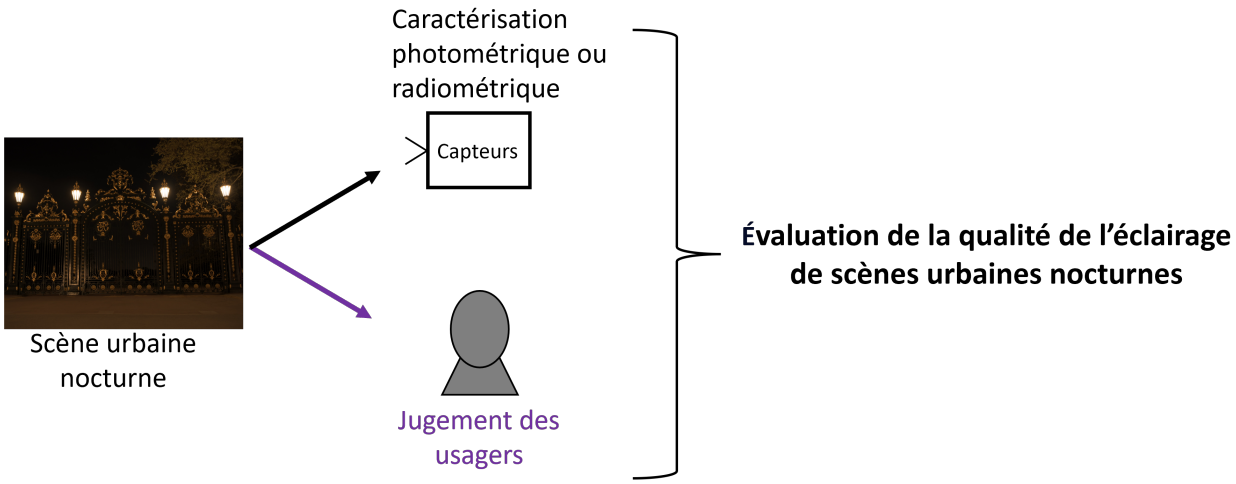


FIGURE 1 – Schéma présentant les deux types d'évaluation envisagés dans les travaux de la thèse

Le recueil de ressentis subjectifs sur site est soumis à des contraintes logistiques lourdes, d'autant plus lorsque l'environnement à évaluer est nocturne. Ainsi, il peut être intéressant d'envisager, à partir des acquisitions terrain et mesures physiques, de reproduire des scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel (*e.g.* sur écran). Cependant, l'évaluation des scènes urbaines nocturnes dans des environnements virtuels nécessite d'être validée au préalable, c'est-à-dire qu'il faut s'assurer que les conclusions obtenues à partir d'évaluations recueillies en environnement virtuel sont transposables en réalité.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de proposer des méthodes et outils qui sont facilement déployables pour évaluer la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes. Pour ce faire, nous nous concentrons sur des acquisitions sur site via une caméra numérique RVB, afin d'obtenir facilement des images qui permettront de déterminer à la fois des grandeurs radiométriques et photométriques, et qui seront affichées sur des écrans pour mener des évaluations avec des observateurs en environnement virtuel. La particularité des travaux de la thèse réside dans l'étude de scènes urbaines nocturnes qui se distinguent des scènes diurnes par l'introduction de niveaux lumineux élevés et faibles pouvant affecter le mode de vision de l'œil, passant d'un fonctionnement diurne à nocturne (une définition formelle des modes de vision sera donnée en section 1.1.1), et par la présence de sources de lumière présentant des caractéristiques spectrales différentes. Ainsi la problématique de la thèse est la suivante :

Développer des méthodes facilement déployables pour évaluer la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes à partir d'une caméra RVB via :

- **l'estimation de grandeurs photométriques et radiométriques permettant l'usage de modèles perceptifs ;**
- **le recueil de jugements subjectifs en environnement virtuel, transposables à l'environnement réel.**

Soit deux sous-problématiques déclinées de la façon suivante :

1. Développer et évaluer des méthodes d'estimation des grandeurs photométriques et radiométriques de scènes urbaines nocturnes à partir d'images acquises avec une caméra RVB pour pouvoir mettre en œuvre des modèles perceptifs via des étalonnages colorimétriques ou des reconstructions spectrales.
2. Développer une méthode d'évaluation de la qualité de l'éclairage en environnement virtuel :
   - en proposant une chaîne d'acquisition / restitution adaptée à l'évaluation de la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes ;
   - en explorant l'impact du degré de fidélité physique et perceptif selon les critères de qualité de l'éclairage ;
   - en explorant l'impact des conditions d'observations en environnement virtuel ;
   - en comparant les jugements de qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnements réel et virtuel pour valider la méthode développée.

Des liens existent entre ces deux types d'approche : l'estimation de grandeurs physiques à partir d'images de scènes urbaines nocturnes pourrait alimenter la chaîne d'acquisition nécessaire au recueil de jugements subjectifs en environnement virtuel ; ces derniers constituant les données de base pour construire des modèles perceptifs, lesquels pourraient finalement être appliqués à partir d'images estimant des grandeurs physiques via les méthodes développées ; voire guider les méthodes d'acquisition d'images pour estimer des grandeurs physiologiques directement utilisables par les modèles perceptifs.

Le chapitre 1 du manuscrit détaille le contexte scientifique et l'état de l'art sur les méthodes d'acquisition et d'étalonnage colorimétrique via des appareils photographiques numériques, et la validation d'évaluations subjectives en environnement virtuel, en mettant en avant les verrous scientifiques auxquels ce travail se confrontera. Puis, le manuscrit s'articule en deux parties. La première partie, centrée sur l'acquisition de mesures physiques de l'environnement lumineux, est intitulée « Développement et validation de méthodes pour l'acquisition de données photométriques et radiométriques de scènes urbaines nocturnes ». Elle comporte deux chapitres :

— le chapitre 2 étudie l'usage des méthodes d'étalonnage colorimétrique adaptées au contexte de scènes urbaines nocturnes :

1. en proposant une méthode d'étalonnage colorimétrique qui permet d'estimer des données colorimétriques prenant en compte la contribution des cônes et des bâtonnets dans le système visuel ;
2. en étudiant le comportement de méthodes d'étalonnage colorimétrique dans le contexte d'une grande dynamique de luminance ;
3. en étudiant et proposant des protocoles d'acquisitions et méthodes d'étalonnage colorimétrique permettant l'acquisition de données colorimétriques de scènes comportant des sources lumineuses de caractéristiques spectrales différentes.

— le chapitre 3 étudie la reconstruction spectrale adaptée à des scènes présentant une grande dynamique de luminance dans les niveaux photopiques et mésopiques.

La seconde partie se focalise sur les ressentis subjectifs d'observateurs. Elle est intitulée « Développement et validation d'une méthode pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage urbain nocturne en environnement virtuel », et comporte aussi deux chapitres :

— le chapitre 4 décrit l'établissement d'une vérité terrain. Des jugements subjectifs sont recueillis via un questionnaire portant sur la qualité de l'éclairage urbain nocturne sur site dans trois scènes urbaines nocturnes. Ces jugements serviront de référence pour la validation du recueil de jugements subjectifs en environnement virtuel. Dans la thèse, nous nous concentrerons sur les critères de qualité de l'éclairage principaux identifiés dans la littérature sur l'éclairage piéton ;
— le chapitre 5 a pour objectif de déterminer quelles chaînes d'acquisition / restitution utiliser pour le recueil de jugements subjectifs en environnement virtuel, en fonction des critères de qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes. Pour cela, des jugements subjectifs sont recueillis dans des environnements virtuels (reproductions obtenues selon différentes chaînes d'acquisition), et comparés avec ceux obtenus en environnement réel.

Ainsi, dans la suite du manuscrit, nous cherchons à apporter des éléments de réponse aux questionnements suivants :

1. Quelles méthodes d'étalonnage colorimétrique utiliser pour des scènes urbaines nocturnes ? (Partie I - Chapitre 2)
2. Quelles méthodes utiliser pour effectuer des reconstructions spectrales de scènes urbaines nocturnes ? (Partie I - Chapitre 3)
3. Quelles méthodes utiliser pour le recueil de jugements subjectifs portant sur la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel ? (Partie II)

Conformément à la problématique générale, les méthodes identifiées devront privilégier un déploiement simple afin d'assurer leur efficacité opérationnelle sur le terrain.

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Système visuel et photométrie

1.1.1 Fonctionnement de l'œil

L'œil est l'organe de l'Homme permettant la captation d'ondes électromagnétiques (*i.e.* lumière ; voir Figure 1.1). L'œil est composé de divers sous-organes (voir Figure 1.2) permettant l'acheminement des rayons lumineux (cornée, iris, pupille et cristallin) jusqu'à la captation et le traitement des signaux lumineux (rétine puis nerf optique). Si un objet émet ou réémet des rayons lumineux en direction d'un œil, alors les rayons lumineux vont entrer par la cornée pour ensuite être régulés par la pupille dont son diamètre est contrôlé par l'iris qui permet une modulation allant de 8 mm (environnement sombre) à 2 mm (environnement lumineux) (*e.g.* Boyce, 2014 ; DiLaura et al., 2011 ; Watson and Yellott, 2012). Le rayon lumineux converge ensuite dans le centre optique du cristallin pour ensuite être projeté sur la rétine qui est composée de cellules photoréceptrices. Finalement, les excitations des cellules photoréceptrices localisées dans la rétine sont transmises au cerveau à travers le nerf optique.

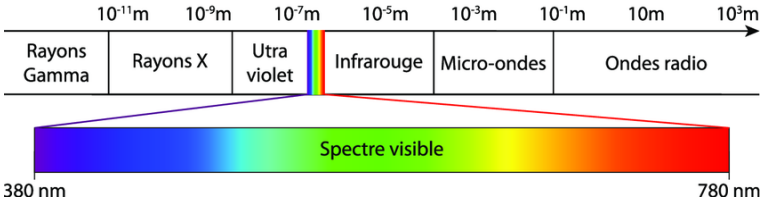


FIGURE 1.1 – Classification des ondes électromagnétiques en fonction de leur plage de longueur d'onde. Schéma provenant de Zaatour (2021)

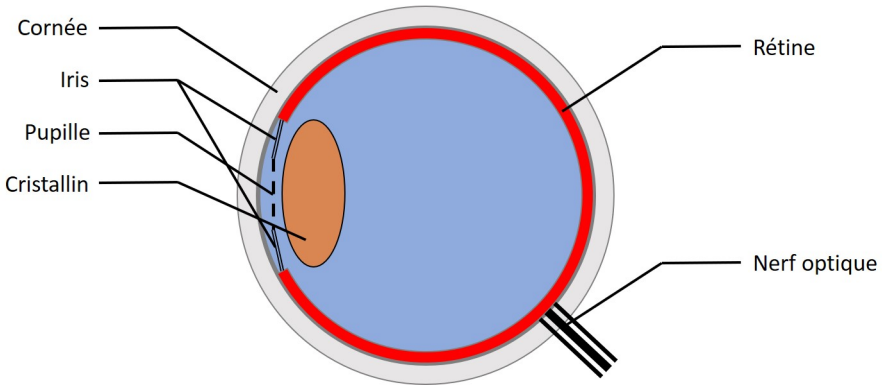


FIGURE 1.2 – Schéma simplifié d'un œil

Les cellules photoréceptrices de l'œil peuvent agir sur le système visuel (les cônes et bâtonnets - Bowmaker and Dartnall, 1980) ou servir à réguler des fonctionnalités du corps tel que le rythme circadien (*e.g.* l'ipRGC - Hankins et al., 2008 ; Provencio and Warthen, 2012). Les cônes sont situés dans la fovéa (région de la rétine correspondant à la vision centrale) alors que les bâtonnets sont dispersés sur l'ensemble de la rétine (Wandell, 1995).

Les cônes sont représentés par trois types de cellules photoréceptrices, les cônes longs ($\lambda \mapsto \bar{l}(\lambda)$), moyens ($\lambda \mapsto \bar{m}(\lambda)$) et courts ($\lambda \mapsto \bar{s}(\lambda)$) qui sont majoritairement sensibles aux couleurs rouge, vert et bleu. Les bâtonnets sont représentés par un type de cellule photoréceptrice ($\lambda \mapsto \bar{rods}(\lambda)$).

Les courbes de sensibilités spectrales relatives des cellules photoréceptrices sont tracées en Figure 1.3. Les courbes de sensibilités spectrales des cônes et bâtonnets ne sont pas nulles sur une plage de longueur d'onde variant de 380 à 780 nm ce qui permet de définir le domaine visible des ondes électromagnétiques (voir Figure 1.1).

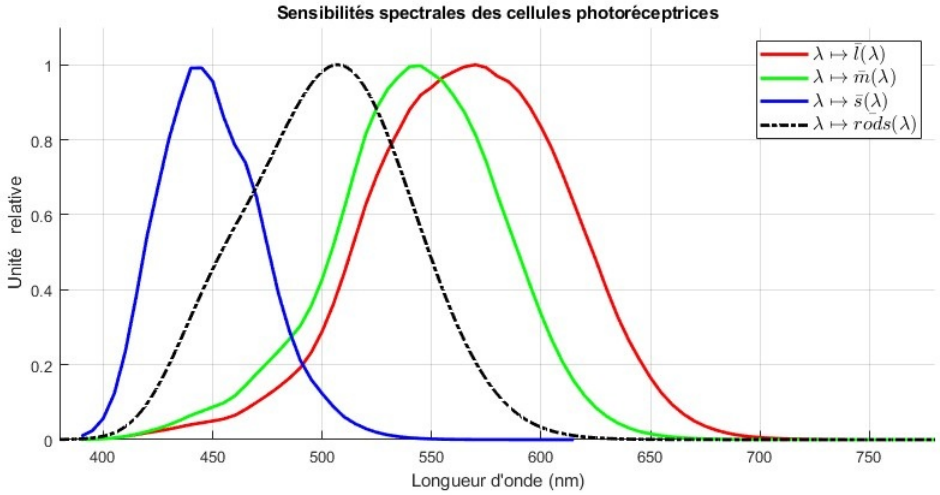


FIGURE 1.3 – Fonctions de sensibilités spectrales relatives des cellules photoréceptrices de l'œil projetées dans le plan de la cornée, données issues de la CIE (2019a, 2019c)

1.1.2 Type de vision et sensibilité spectrale

A partir des seuils d'activation de ces cellules photoréceptrices (voir Table 1.1), il est possible de définir trois modes de vision de l'œil, la vision photopique (diurne), dans laquelle seuls les cônes sont actifs (Figure 1.4c), la vision scotopique (nocturne) assurée par les bâtonnets (Figure 1.4a), et la vision mésopique (crépusculaire) dans laquelle les cônes et bâtonnets sont sollicités (Figure 1.4b).

	Scotopique	Mésopique	Photopique
Plage de luminance photopique ($cd.m^{-2}$)	0-0.01	0.01-3	3-∞
Cellules photoréceptrices excitées	Bâtonnets	Cônes et bâtonnets	Cônes (et bâtonnets saturés)
Contribution des cellules photoréceptrices dans le système visuel	Bâtonnets	Cônes et bâtonnets	Cônes
Type de vision	Achromatique	Chromatique	Chromatique

TABLE 1.1 – Les différents modes de fonctionnement de l'œil. Les seuils sont issues de Rea (2000)



(a) Une scène en vision scotopique. Crédit photo : « meeraf_ » utilisateur de Pinterest



(b) Une scène en vision mésopique. Crédit photo : utilisateur anonyme de Pinterest



(c) Une scène en vision photopique. Crédit photo : « jojopatrice » utilisateur de Pinterest

FIGURE 1.4 – Illustrations de scènes lumineuses sollicitant les différents modes de vision de l'œil

En se fondant sur les travaux de Guild (1931) et Wright (1929), la commission internationale de l'éclairage (CIE 1924, 2019c) a défini des courbes d'efficacité lumineuse spectrale en vision photopique et scotopique, notées $\lambda \mapsto K(\lambda)$ et $\lambda \mapsto K'(\lambda)$. Leur unité commune est le lumen par watt et par nanomètre. Les courbes d'efficacité lumineuse spectrale en vision photopique et scotopique sont tracées en Figure 1.5. Pour la vision photopique l'efficacité lumineuse maximale est obtenue pour une longueur d'onde de 555 nm (vert) contre 507 nm (bleu-vert) pour la vision scotopique.

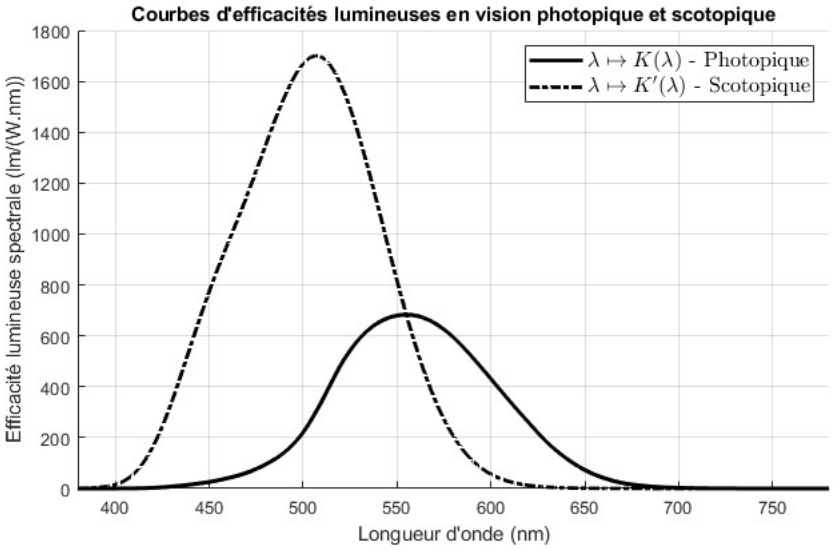
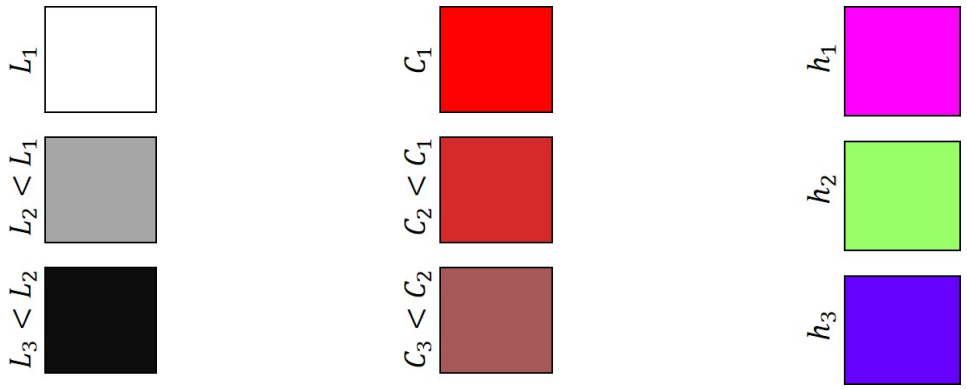


FIGURE 1.5 – Courbes d'efficacité lumineuse relative, données issues de la CIE

Il est possible de normaliser ces courbes (K et K') de façon à ce que leurs maximums respectifs valent l'unité. Dans ce cas, le coefficient de normalisation de la courbe $\lambda \mapsto K(\lambda) = Km.V(\lambda)$ (resp. $\lambda \mapsto K'(\lambda) = Km'.V(\lambda)$) vaut $Km = 683\ lm.W^{-1}$ (resp. $Km' = 1700\ lm.W^{-1}$). Km et Km' sont appelés efficacité lumineuse maximale en vision photopique et scotopique, et les courbes $\lambda \mapsto V(\lambda)$ et $\lambda \mapsto V'(\lambda)$ sont appelées efficacité lumineuse relative spectrale en vision photopique et scotopique.

Les sensations colorées peuvent être décrites en utilisant trois indicateurs (voir Figure 1.6) : la luminance, la chrominance et la teinte. La luminance correspond à la sensation qu'une couleur paraît plus ou moins lumineuse. La chrominance correspond à la sensation qu'une couleur paraît plus ou moins saturée. La teinte correspond à la « couleur » dans le sens usuel (*e.g.* bleu, vert, rouge, jaune).

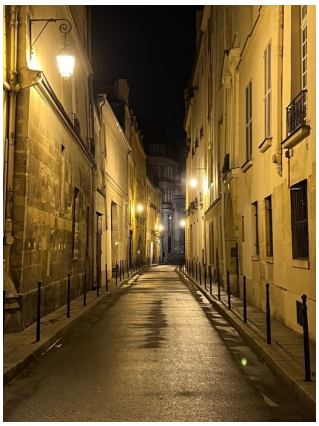


(a) Différentes luminances (b) Différentes chrominances (c) Différentes teintes

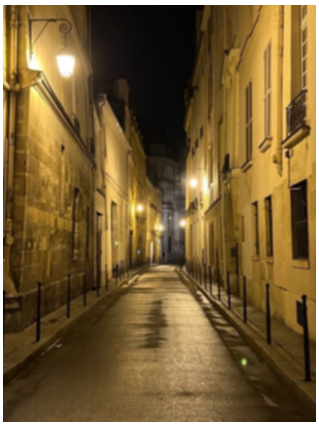
FIGURE 1.6 – Illustration de différentes couleurs en faisant varier le paramètre de luminance (a), chroma (b) et teinte (c)

En vision mésopique, l'œil ne présente pas les mêmes caractéristiques que dans le cas de la vision photopique. Parmi les phénomènes qu'introduit la vision mésopique par rapport à la vision photopique (voir Figure 1.7), il y a :

— la perte d'acuité visuelle (*e.g.* Hiraoka et al., 2015) ;
— l'effet Purkinje qui est une conséquence du décalage entre les courbes d'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil $\lambda \mapsto V(\lambda)$ (en vision photopique) et $\lambda \mapsto V'(\lambda)$ (en vision scotopique) qui se traduit en terme de sensations visuelles par un décalage des couleurs dans le bleu lorsque l'on passe d'une vision photopique à mésopique (*e.g.* Barlow, 1957) ;
— la saturation colorée qui se traduit par le fait que les couleurs paraissent plus ou moins saturées en vision mésopique qu'en vision photopique (*e.g.* Sergienko, 2016).



(a) Image initiale vue en vision photopique. Crédit photo : « vrshka_m » utilisateur de Pinterest



(b) Scène vue avec une acuité réduite. Simulation obtenue en appliquant un flou gaussien



(c) Scène vue avec l'effet Purkinje via le modèle de Cao et al. (2008)



(d) Scène vue avec une saturation colorée en vision mésopique issue de Wanat and Mantiuk (2014)



(e) Scène vue en vision mésopique. Simulation de l'ensemble des phénomènes simultanément

FIGURE 1.7 – Illustrations des différents phénomènes qu'introduit la vision mésopique

1.1.3 Radiométrie et photométrie

Un rayonnement lumineux est caractérisé par une onde électromagnétique dont les longueurs d'ondes varient entre 380 et 780 nm. Les grandeurs radiométriques font référence à ces rayonnements lumineux tandis que les grandeurs photométriques font référence à ces rayonnements tels qu'ils seraient perçus par des observateurs moyens via l'œil humain.

Les grandeurs radiométriques nécessaires à la description physique des scènes lumineuses sont définies dans les sections 1.1.3.1 à 1.1.3.3. Les grandeurs photométriques sont définies dans les sections 1.1.3.4 à 1.1.3.6.

Avant de définir les grandeurs radiométriques et photométriques, des notions de géométrie doivent être introduites (angle solide et étendue géométrique). Ces notions sont rappelées en Annexe 7.1.

1.1.3.1 Flux énergétique spectral

Le flux énergétique spectral ($\phi_e : (\lambda, t) \mapsto \phi_e(\lambda, t)$) est défini comme la quantité d'énergie qu'émet une source lumineuse par longueur d'onde et par unité de temps. Son unité est le watt par nanomètre ($W.nm^{-1}$) ou joule par seconde par nanomètre ($J.s^{-1}.nm^{-1}$).

Pour alléger les notations futures le flux énergétique spectral sera pris pour un instant donné t : $\phi_e : (\lambda) \mapsto \phi_e(\lambda)$. Cependant, l'ensemble des grandeurs qui dérivent du flux énergétique spectral peuvent se généraliser en introduisant un terme temporel.

1.1.3.2 Éclairement énergétique spectral

L'éclairement énergétique spectral ($E_e : (\lambda) \mapsto E_e(\lambda)$) est défini comme la quantité élémentaire de flux énergétique spectral $d\phi_e$ qui est reçue par une surface élémentaire dS, son unité est le watt par mètre carré par nanomètre ($W.m^{-2}.nm^{-1}$).

L'éclairement énergétique spectral est défini par :

$$E_e(\lambda) = \frac{d\phi_e(\lambda)}{dS} \qquad \forall\ \lambda \qquad [W.m^{-2}.nm^{-1}] \tag{1.1}$$

1.1.3.3 Luminance spectrique

La luminance spectrique ($L_e : (\lambda) \mapsto L_e(\lambda)$) se définit comme la quantité élémentaire de flux énergétique $d^2\phi_e$ qui est émis par une source lumineuse et capté par une surface élémentaire réceptrice dS à travers l'angle solide élémentaire de la source $d\Omega_s$. La luminance spectrique s'exprime en $W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$:

$$\begin{aligned} L_e(\lambda) &= \frac{d^2\phi_e(\lambda)}{dS.cos(\alpha_s).d\Omega_s} \\ &= \frac{d^2\phi_e(\lambda)}{d^2G} \qquad \forall\ \lambda \qquad [W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}] \end{aligned} \tag{1.2}$$

où : α_s correspond à l'angle tel que décrit en Figure 7.3 (voir Annexe 7.1) ; d^2G correspond à l'étendue géométrique élémentaire de la source par rapport au récepteur.

1.1.3.4 Flux lumineux

Le flux lumineux (ϕ_v) est défini comme la somme sur les longueurs d'ondes du flux énergétique spectral ($(\lambda) \mapsto \phi_e(\lambda)$) pondéré par la courbe d'efficacité lumineuse spectrale de l'œil ($\lambda \mapsto K(\lambda)$) :

$$\phi_v = \int_{780\text{ nm}}^{380\text{ nm}} \phi_e(\lambda).K(\lambda).d\lambda \qquad [lm] \tag{1.3}$$

Le flux lumineux s'exprime en lumen (lm).

1.1.3.5 Éclairements lumineux

L'éclairement lumineux photopique (E_v) est défini comme la somme sur les longueurs d'ondes de l'éclairement énergétique spectral ($E_e : (\lambda) \mapsto E_e(\lambda)$) pondéré par la fonction d'efficacité spectrale photopique ($\lambda \mapsto K(\lambda)$) :

$$E_v = \int_{780\text{ nm}}^{380\text{ nm}} E_e(\lambda).K(\lambda).d\lambda \qquad [lx] \tag{1.4}$$

L'éclairement lumineux photopique s'exprime en lux (lx).

De manière similaire, l'éclairement lumineux scotopique ($E_{v'}$) est obtenu lorsque la courbe d'efficacité spectral photopique ($\lambda \mapsto K(\lambda)$) est remplacée par celle relative à la vision scotopique $\lambda \mapsto K'(\lambda)$:

$$E_{v'} = \int_{780\text{ nm}}^{380\text{ nm}} E_e(\lambda).K'(\lambda).d\lambda \qquad [lx] \tag{1.5}$$

1.1.3.6 Luminance lumineuse

La luminance lumineuse (L_v) est définie comme la somme sur les longueurs d'ondes de la luminance spectrique ($L_e : \lambda \mapsto L_e(\lambda)$) pondérée par la fonction d'efficacité spectrale ($\lambda \mapsto K(\lambda)$) :

$$L_v = \int_{780\text{ nm}}^{380\text{ nm}} L_e(\lambda).K(\lambda).d\lambda \qquad [cd.m^{-2}] \tag{1.6}$$

La luminance lumineuse s'exprime en candela par mètre carré ($cd.m^{-2}$).

1.1.4 Photométrie mésopique

Les courbes d'efficacité lumineuse spectrale en vision photopique et scotopique permettent de définir les grandeurs liées à la photométrie (flux lumineux, éclairement lumineux et luminance lumineuse). Cependant, en vision mésopique tous les types de photorécepteurs (cônes et bâtonnets) interviennent dans le système visuel ce qui introduit des phénomènes tels que l'effet Purkinje et la saturation colorée rendant difficile l'obtention d'une seule courbe d'efficacité lumineuse spectrale en vision mésopique.

Ainsi, des études ont été réalisées dans l'objectif de proposer des méthodes d'estimation de l'efficacité lumineuse spectrale en vision mésopique à partir de celles en vision photopique et scotopique (Eloholma and Halonen, 2006 ; Rea et al., 2004 ; Viikari et al., 2008). Généralement, ces études estiment une courbe d'efficacité spectrale en vision mésopique comme une moyenne pondérée entre celles en vision photopique et scotopique qui dépend de la luminance d'adaptation. Par exemple, le modèle MOVE modifié (*Mesopic Optimisation of Visual Efficiency* ; Viikari et al., 2008) détermine le facteur de pondération x_∞ de manière itérative par :

$$\begin{cases} x_0 = 0.5 \\ \\ x_n = a + b.log_{10}(L_{mes,n}), \qquad 0 \leq x_n \leq 1\,;\, 1 \leq n \\ \\ L_{mes,n} = \frac{x_{n-1}.L_p + (1-x_{n-1}).L_s.V'(\lambda_0)}{x_{n-1} + (1-x_{n-1}).V'(\lambda_0)}, \qquad 1 \leq n \end{cases} \tag{1.7}$$

où : L_p (resp. L_s) correspond à la luminance lumineuse en vision photopique (resp. scotopique) ; $\lambda \mapsto V'(\lambda)$ correspond à l'efficacité lumineuse relative spectrale en vision scotopique ; $\lambda_0 = 555$ nm, $a = 0.7670$ et $b = 0.3334$.

Puis il est possible d'estimer la courbe d'efficacité spectrale en vision mésopique par :

$$K_{mes}(\lambda) = x_\infty.K(\lambda) + (1 - x_\infty).K'(\lambda), \qquad \lambda \in [380; 780] \text{ nm} \tag{1.8}$$

où : $\lambda \mapsto K(\lambda)$ (resp. $\lambda \mapsto K'(\lambda)$ et $\lambda \mapsto K_{mes}(\lambda)$) correspond à la courbe d'efficacité spectrale en vision photopique (resp. scotopique et mésopique) ; x_∞ correspond à la valeur limite de la suite $(x_n)_{0 \leq n}$.

Une fois que la courbe d'efficacité spectrale en vision mésopique est estimée, il est possible de définir le flux lumineux, l'éclairement lumineux et la luminance lumineuse équivalente en vision mésopique en remplaçant $\lambda \mapsto K(\lambda)$ par $\lambda \mapsto K_{mes}(\lambda)$.

1.1.5 Espaces colorimétriques

Un espace colorimétrique est un outil mathématique (espace métrique) permettant d'effectuer des calculs qui s'appuient sur les différences colorimétriques perçues par un humain standard. Dans cette section sont décrits trois espaces colorimétriques (CIE-RGB ; CIE-XYZ 2° ; CIE-L*a*b* - voir sous-sections 1.1.5.1 à 1.1.5.3) ainsi que des métriques associées (CIE ΔE_{ab} et CIE ΔE^*_{00} voir sous-section 1.1.5.4). Ces espaces colorimétriques, puisqu'ils s'appuient sur l'usage exclusif des cônes, sont adaptés à la vision photopique. Cependant, en vision mésopique, le système visuel est défini par l'usage des cônes et des bâtonnets. Ainsi, des outils disponibles pour réaliser des calculs en vision mésopique sont détaillés en sous-sections 1.1.5.5 à 1.1.6.3.

Dans le cas d'un espace colorimétrique de dimension quelconque n, il est possible d'écrire la relation d'équivalence reliant une couleur perçue $[C]$ et ses coordonnées (C_1, C_2, ..., C_n) associées aux vecteurs directeurs de l'espace colorimétrique ($[S_1]$, $[S_2]$, ..., $[S_n]$) :

$$[C] \equiv \sum_{k=1}^{n} C_k.[S_k] \tag{1.9}$$

où : « $\equiv$ » est le symbole correspondant à une relation d'équivalence.

On parle d'équivalence et non d'égalité car il existe des cas où deux combinaisons différentes de composantes colorimétriques $((C1_k)_k)$ et $((C2_k)_k)$ fournissent la même sensation colorée $[C]$. On parle alors de métamérisme (Foster et al., 2006).

Un espace colorimétrique s'appuie sur des fonctions colorimétriques spectrales $((\lambda \mapsto [S_k(\lambda)])_k)$ qui permettent, connaissant la luminance énergétique spectrale d'une source $\lambda \mapsto S(\lambda)$ (émission lumineuse ou rémission par réflexion ou transmission à travers un matériau), d'obtenir ses coordonnées $((C_k)_k)$ dans l'espace colorimétrique par :

$$C_k = \int_{780\text{ nm}}^{380\text{ nm}} S_k(\lambda).S(\lambda).d\lambda \qquad k \in \{1, ...n\} \tag{1.10}$$

1.1.5.1 L'espace colorimétrique CIE-RGB

Dans l'objectif de normaliser les sensations colorées de l'Homme, les travaux de Wright (1929) et Guild (1931) ont servi de référence. Durant leurs expériences, Wright (1929) et Guild (1931) ont mesuré les différences de sensations colorées auprès de participants en faisant varier trois sources lumineuses, chacune d'entre elles étant située en grande partie dans la courbe de sensibilité spectrale des cônes (longs - source rouge, moyens - source verte et courts - source bleue). Durant leurs travaux respectifs, les auteurs ont obtenu des résultats similaires, ce qui a permis de définir un premier type d'espace colorimétrique (RGB). Finalement, la CIE a proposé leurs travaux en 1931 afin de normaliser les composantes spectrales à utiliser lorsque l'on fait référence à l'espace colorimétrique CIE-RGB, dont les fonctions colorimétriques élémentaires ($\lambda \mapsto \bar{r}(\lambda)$, $\lambda \mapsto \bar{g}(\lambda)$ et $\lambda \mapsto \bar{b}(\lambda)$) sont tracées en Figure 1.8. Ainsi, il est possible de reproduire n'importe quelle sensation colorée à partir d'une moyenne pondérée de ces trois vecteurs :

$$[C] \equiv \alpha_R.K_m.[\bar{r}] + \alpha_G.K_m.[\bar{g}] + \alpha_B.K_m.[\bar{b}] \tag{1.11}$$

où : α_R (resp. α_G et α_B) est la coordonnée associée à la couleur $[C]$ projetée sur le vecteur $\lambda \mapsto K_m.\bar{r}(\lambda)$ (resp. $\lambda \mapsto K_m.\bar{g}(\lambda)$ et $\lambda \mapsto K_m.\bar{b}(\lambda)$).

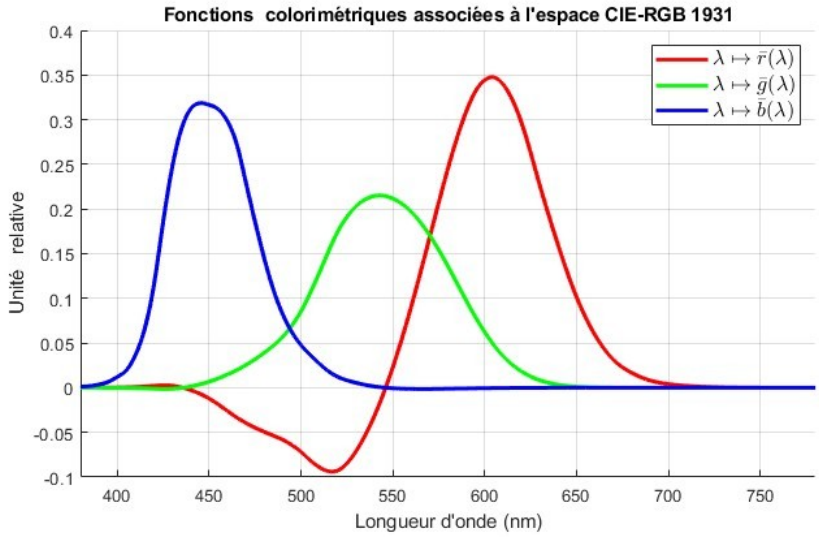


FIGURE 1.8 – Fonctions colorimétriques associées à l'espace CIE-RGB, données dérivées de CIE (2019b)

1.1.5.2 L'espace colorimétrique CIE-XYZ 2°

L'espace colorimétrique CIE-RGB permet de disposer d'un outil mathématique permettant la description de toutes les couleurs que l'Homme peut percevoir mais présente le désavantage de s'appuyer sur des fonctions colorimétriques avec des parties négatives. Des couleurs équivalentes peuvent donc être « négatives » ce qui peut poser des problèmes dans les interprétations et les calculs. Dans l'objectif de s'affranchir des valeurs négatives, la CIE a défini, en 1931, un espace colorimétrique nommé CIE-XYZ 2° qui se déduit de l'espace colorimétrique CIE-RGB comme un changement de base défini sur les coordonnées colorimétriques par :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.768892 & 1.751748 & 1.130160 \\ 1 & 4.5907 & 0.060100 \\ 0 & 0.056508 & 5.594292 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \tag{1.12}$$

où : X (resp. Y et Z) correspond à la coordonnée colorimétrique associée à la fonction colorimétrique $\lambda \mapsto \bar{x}(\lambda)$ (resp. $\lambda \mapsto \bar{y}(\lambda)$ et $\lambda \mapsto \bar{z}(\lambda)$) qui compose l'espace CIE-XYZ 2°.

La Figure 1.9 regroupe les fonctions colorimétriques associées à l'espace CIE-XYZ 2°. On remarque également que la fonction colorimétrique $\lambda \mapsto \bar{y}(\lambda)$ correspond à la courbe d'efficacité lumineuse normalisée ($\lambda \mapsto V(\lambda)$).

Finalement, l'espace colorimétrique est nommé « 2° » car il est applicable que pour des tâches impliquant la vision colorée correspondant à une ouverture angulaire de 2° ce qui correspond à une majorité des cellules photoréceptrices de type « cônes » (long, moyen et court). Une déclinaison prenant en compte un champ visuel plus large (10°), correspondant quasiment à l'ensemble des cellules photoréceptrices de type « cônes », a été proposée par la CIE (2019c).

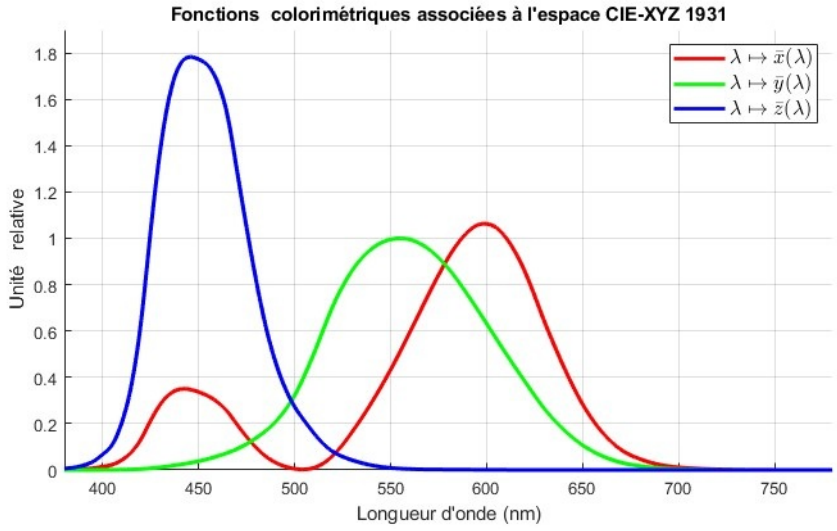


FIGURE 1.9 – Fonctions colorimétriques associées à l'espace CIE-XYZ 2°, données issues de la CIE CIE (2019b)

L'ensemble des couleurs qu'il est possible d'obtenir à partir de cet espace colorimétrique est appelé gamut coloré de l'espace CIE-XYZ (2°) :

$$G = \{[C] \equiv \alpha_X.K_m.[\bar{x}] + \alpha_Y.K_m.[\bar{y}] + \alpha_Z.K_m.[\bar{z}], \qquad (\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z) \in [0; +\infty]^3\} \tag{1.13}$$

Le gamut coloré G correspond à celui de l'œil humain standard, et il peut être représenté en deux dimensions via un diagramme chromatique. Généralement, le diagramme chromatique xy est utilisé (voir Figure 1.10). Le diagramme xy est obtenu en traçant les coordonnées normalisées xy qui proviennent de l'espace CIE-XYZ (2°) :

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases} \tag{1.14}$$

où : X, Y et Z correspondent aux coordonnées chromatiques d'une couleur $[C] \equiv X.K_m.[\bar{x}] + Y.K_m.[\bar{y}] + Z.K_m.[\bar{z}]$.

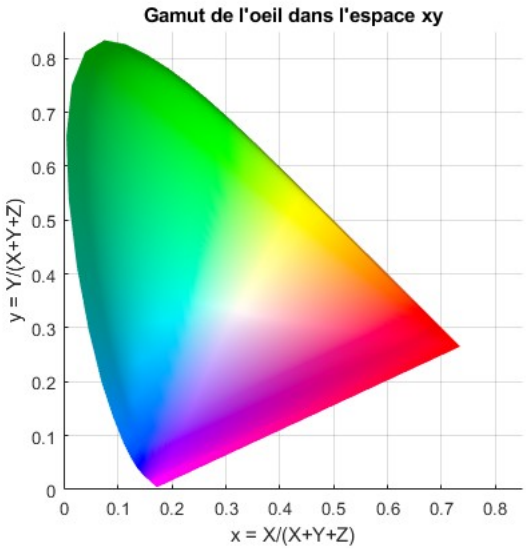


FIGURE 1.10 – Gamut de l'œil représenté dans le repère xy avec x+y+z = 1, diagramme obtenu à partir des valeurs issues de la CIE (2019b)

Cette représentation graphique présente l'avantage de fournir un outil d'interprétation simple, et permet de représenter l'ensemble des couleurs que l'œil peut percevoir. De plus, il est possible de visualiser les contributions relatives entre les coordonnées X, Y et Z de l'espace CIE-XYZ (2°). En effet, plus la coordonnée X est élevée relativement aux autres (x grand et y faible), plus la couleur sera perçue « rouge » ; plus la coordonnée Y est élevée (y grand et x faible), plus la couleur sera perçue « verte » ; enfin plus la coordonnée Z est élevée (x et y faibles), plus la couleur sera « violette-bleue ».

1.1.5.3 L'espace colorimétrique CIE-L*a*b*

L'espace colorimétrique CIE-XYZ (2°) permet de réaliser des calculs sur des vecteurs qui sont positifs, garantissant que l'ensemble des coordonnées colorimétriques X, Y et Z sont positives. Cependant, lorsque trois couleurs ($[C_1] = [X_1, Y_1, Z_1]$, $[C_2] = [X_2, Y_2, Z_2]$ et $[C_3] = [X_3, Y_3, Z_3]$) sont comparées entre elles à l'aide de la distance euclidienne ($\Delta XYZ([C_i], [C_j])$), il peut arriver que $\Delta XYZ([C_1], [C_2]) = \Delta XYZ([C_1], [C_3])$ sans pour autant que cette égalité mathématique ne corresponde à une égalité en termes de différences perceptives des couleurs. Ainsi, des ambiguïtés peuvent être induites dans les interprétations de sensations colorées lorsque l'espace colorimétrique CIE-XYZ (2°) est utilisé.

En prenant en compte des travaux visant à définir des égalités colorées, la CIE (2019d) a proposé un nouvel espace colorimétrique prenant en compte ces inégalités perceptives : l'espace colorimétrique CIE-L*a*b*. Ce nouvel espace colorimétrique se décompose en trois composantes : une composante achromatique liée à la luminance (L*), deux composantes colorées suivant l'axe « vert-rouge » et « bleu-vert » (a* et b*). L'espace colorimétrique CIE-L*a*b* est défini à partir de l'espace CIE-XYZ (2°) par :

$$\begin{cases} L^* = 116.f(\frac{Y}{Y_{ref}}) - 16 \\ a^* = 500.\left[f(\frac{X}{X_{ref}}) - f(\frac{Y}{Y_{ref}})\right] \\ b^* = 200.\left[f(\frac{X}{X_{ref}}) - f(\frac{Z}{Z_{ref}})\right] \end{cases} \tag{1.15}$$

où : X_{ref}, Y_{ref} et Z_{ref} sont les coordonnées X, Y et Z d'un blanc de référence, et la fonction $t \mapsto f(t)$ est définie par :

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & \text{si } t > (\frac{6}{29})^3 \\ \frac{1}{3}.\left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29} & \text{sinon} \end{cases} \tag{1.16}$$

Le blanc de référence permet d'établir une couleur qui sert de comparaison durant l'ensemble des traitements réalisés dans l'espace colorimétrique CIE-L*a*b*. Ainsi, par définition (équations 1.15 et 1.16) le blanc de référence permet de fixer l'origine de l'espace CIE-L*a*b* de façon à ce que la couleur $[C_{ref}] = [X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref}]_{CIE-XYZ\ 2^\circ}$ vaut $[C_{ref}] = [100, 0, 0]_{CIE-L^*a^*b^*}$.

Ainsi, une couleur $[C] = [L^*_C, a^*_C, b^*_C]_{CIE-L^*a^*b^*}$ aura : une valeur L^*_C supérieure (resp. inférieure) à 100 lorsque cette couleur est perçue plus lumineuse (resp. sombre) par rapport à la couleur de référence ; une valeur a^*_C négative (resp. positive) lorsque cette couleur est perçue « plus verte » (resp. « plus rouge ») par rapport à la couleur de référence ; une valeur b^*_C négative (resp. positive) lorsque cette couleur est perçue « plus bleue » (resp. « plus verte ») par rapport à la couleur de référence.

1.1.5.4 Différences colorimétriques en vision photopique

Une différence colorimétrique est définie comme une distance sur un espace colorimétrique. La distance euclidienne dans l'espace CIE-L*a*b* permet de définir la différence colorimétrique ΔE^*_{ab} (CIE, 2019d). Ainsi, la différence colorimétrique $\Delta E^*_{ab}([C_1], [C_2])$ entre les couleurs $[C_1] = [L^*_1, a^*_1, b^*_1]$ et $[C_2] = [L^*_2, a^*_2, b^*_2]$ est définie par :

$$\Delta E^*_{ab}([C_1], [C_2]) = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2} \tag{1.17}$$

Mokrzycki and Tatol (2011) proposent une interprétation de l'indicateur ΔE^*_{ab} par :

— $0 < \Delta E^*_{ab} < 1$, les deux couleurs sont perçues comme identiques ;
— $1 < \Delta E^*_{ab} < 2$, les deux couleurs peuvent avoir des différences pour l'observateur attentif ;
— $2 < \Delta E^*_{ab} < 3.5$, les deux couleurs peuvent être perçues différentes ;
— $3.5 < \Delta E^*_{ab} < 5$, les deux couleurs sont clairement, pour un observateur lambda, perçues différemment.

Des améliorations de cet indicateur de différences colorimétriques ont été proposées dans la littérature. Notamment grâce aux travaux de Luo et al. (2000), une nouvelle métrique ΔE^*_{00} (CIE, 2022) a été définie (voir Annexe 7.2).

Mokrzycki and Tatol (2011) proposent une interprétation de l'indicateur ΔE^*_{00} par :
— $0 < \Delta E^*_{00} < 1$, les deux couleurs sont perçues comme identiques ;
— $1 < \Delta E^*_{00} < 2$, les deux couleurs peuvent avoir des différences pour l'observateur attentif ;
— $2 < \Delta E^*_{00} < 5$, les deux couleurs peuvent être perçues différemment ;
— $5 < \Delta E^*_{00}$, les deux couleurs sont clairement, pour un observateur lambda, perçues différemment.

1.1.5.5 L'espace métrique fondé sur les cônes et bâtonnets

Les espaces colorimétriques CIE-RGB, CIE-XYZ (2°) et CIE-L*a*b* présentent le désavantage de n'être applicables que dans le cas où l'œil est en fonctionnement photopique, ce qui dans certain cas (évaluation de scène urbaines nocturnes, voir section 1.2.1) n'est plus applicable. Ainsi, il est possible de définir un espace générique (nommé espace LMSR) qui prend en compte le fonctionnement des cônes (long, moyens et courts) et des bâtonnets. De façon similaire à la définition des espaces CIE-RGB et CIE-XYZ (2°) l'espace générique se fonde sur des vecteurs directeurs. Les vecteurs directeurs utilisés sont les courbes de sensibilité spectrale des cônes et des bâtonnets (tracés en Figure 1.3).

Les courbes de sensibilité liées aux cônes $\lambda \mapsto \bar{l}(\lambda)$, $\lambda \mapsto \bar{m}(\lambda)$ et $\lambda \mapsto \bar{s}(\lambda)$ sont fournis par la CIE (2019a) lors de la définition de l'espace colorimétrique CIE-LMS (2°), tandis que la courbe de sensibilité $\lambda \mapsto \bar{rods}(\lambda)$ correspond à l'efficacité lumineuse relative spectrale en vision scotopique $\lambda \mapsto V'(\lambda)$. Il existe un lien entre l'espace colorimétrique CIE-LMS (2°) (LMS - cônes longs, moyens et courts ; qui correspond à l'espace métrique LMSR sans la composante liée aux bâtonnets) et l'espace colorimétrique CIE-XYZ 2°. En effet, Stockman (2019) a fourni une matrice de passage qui relie ces deux espaces colorimétriques qui est définie par :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.94735469 & -1.41445123 & 0.36476327 \\ 0.68990272 & 0.34832189 & 0 \\ 0 & 0 & 1.93485343 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \tag{1.18}$$

Finalement, les excitations théoriques des cellules photoréceptrices sont connues mais ne sont pas pour autant descriptives des phénomènes dans les trois canaux de communication du cerveau (parvocellular - PC, koniocellular - KC et magnocellular-MC ; Dacey, 2000), ce qui ne permet pas de réellement déterminer une sensation visuelle / couleur perçue et interprétée par le cerveau. Ainsi, en vision mésopique, des modèles issus de travaux de biologistes sont proposés afin de déterminer l'impact qu'ont les excitations des bâtonnets dans le système visuel en fonction de la quantité de lumière qui entre dans l'œil (niveaux d'éclairements et lumineux). Il s'agit de modèles d'apparence colorée prenant en compte la vision mésopique.

1.1.6 Modèles d'apparence colorée en vision mésopique

Les modèles d'apparence colorée en vision mésopique ont pour objectif de définir des modèles mathématiques qui prennent en compte l'impact des bâtonnets dans les phénomènes colorés (*e.g.* effet Purkinje et la saturation colorée) en vision mésopique. Pour ce faire les travaux prenant en compte la vision mésopique dans les modèles d'apparence colorée reviennent sur des notions théoriques de l'interprétation des couleurs par le cerveau, s'appuyant notamment sur des modèles par opposition de couleurs de Kaiser and Boynton (1996) dont l'impact des bâtonnets a été prouvé par Buck et al. (2000).

L'œil transmet au cerveau des informations suivant trois canaux de transmission (MC, PC et KC) qui sont en lien direct avec les signaux électriques transmis au cerveau L, M et S dans le cas de la vision photopique. En effet, dans le modèle par opposition de couleurs de Kaiser and Boynton (1996), les auteurs stipulent qu'il est possible de relier les signaux L, M et S en fonction des canaux de transmission du cerveau MC, PC et KC par :

$$\begin{cases} PC \propto L - 2.M & \text{(rouge/vert)} \\ KC \propto L + M - S & \text{(jaune/vert)} \\ MC \propto L + M & \text{(luminance)} \end{cases} \tag{1.19}$$

où : le symbole « $\propto$ » se lit « est lié à ». Davantage de détails sont fournis dans les articles de Shin et al. (2004) et Cao et al. (2008).

Ainsi, les modèles prenant en compte l'interférence des excitations des bâtonnets dans le système visuel s'apparentent à ajouter une quantité issue de $\lambda \mapsto \bar{rods}(\lambda)$ (i.e. $\lambda \mapsto V'(\lambda)$) dans l'ensemble des canaux de communication.

Dans les sous-sections 1.1.6.2 et 1.1.6.1 deux modèles d'apparence colorée couramment utilisés dans la littérature sont détaillés, prenant en compte la vision mésopique (*e.g.* Akhavan, 2017 ; Rezagholizadeh, 2016 ; Wanat and Mantiuk, 2014).

1.1.6.1 Le modèle de Shin et al. (2004)

Le modèle de Shin et al. (2004) s'appuie sur le modèle d'opposition de couleurs présenté dans les travaux de Kaiser and Boynton (1996). Pour ce faire, Shin et al. (2004) introduisent dans le modèle de Kaiser and Boynton (1996) des interférences liées aux bâtonnets pour un niveau d'éclairement photopique E :

$$\begin{cases} A(E) = \alpha(E).K_\omega.((L_p + M_p)/(L_{p.\omega} + M_{p.\omega})) + \beta(E).K'_\omega.(Y'/Y'_\omega)^\gamma & \text{(luminance)} \\ r/g(E) = l(E).(L_p + -2.M_p) + a(E).Y' & \text{(rouge/vert)} \\ b/y(E) = m(E).(L_p + M_p - S_p) + b(E).Y' & \text{(jaune/vert)} \end{cases} \tag{1.20}$$

où : $\alpha(E)$, $\beta(E)$, $l(E)$, $a(E)$, $m(E)$ et $b(E)$ sont des paramètres introduits par le modèle de Shin et al. (2004) ; L_p, M_p et S_p correspondent aux excitations des cônes longs, moyens et courts (coordonnées liées aux composantes LMS dans l'espace métrique CIE-LMS ou LMSR) ; Y' correspond à la coordonnée associée à la composante des bâtonnets (« rods » dans l'espace LMSR) ; $L_{p.\omega}$, $M_{p.\omega}$ et Y_ω correspondent aux coordonnées « L », « M » et « rods » d'un blanc de référence dans l'espace LMSR ; K_ω et K'_ω correspondent à des constantes de normalisation liées au blanc de référence pour des luminances photopique et scotopique.

Dans sa version matricielle le système d'équations décrit en (1.20) devient :

$$\begin{pmatrix} A(E) \\ r/g(E) \\ b/y(E) \end{pmatrix} = M(E). \begin{pmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \\ Y' \end{pmatrix} \tag{1.21}$$

Les coefficients du modèle de Shin et al. (2004) sont donnés dans leurs travaux pour quelques niveaux d'éclairement, présentés dans la Table 1.2.

Lorsque l'éclairement E est supérieur à 1000 lx (c'est-à-dire lorsque l'œil est probablement en vision photopique), les paramètres sont fixés tel que $\alpha(E = 1000) = l(E = 1000) = m(E = 1000) = 1$ et $\beta(E = 1000) = a(E = 1000) = b(E = 1000) = 0$, ce qui est équivalent au modèle initial d'apparence colorée en vision photopique de Kaiser and Boynton (1996). Ainsi il est possible, en écrivant l'égalité entre les quantités $[A(E), r/g(E), b/y(E)]$ provenant du modèle de Shin et al. (2004) ($M(E < 1000)$) et du modèle de Kaiser and Boynton (1996) ($M(E = 1000)$), d'obtenir pour une couleur donnée $[C] = [L_p, M_p, S_p, Y']$ dans l'espace LMSR, un équivalent photopique dans l'espace CIE-LMS (2°) $[C^*] = [L_p^*, M_p^*, S_p^*]$. En effet, il est possible d'écrire l'égalité suivante :

$$M(E = 1000)^+.M(E). \begin{pmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_p^* \\ M_p^* \\ S_p^* \\ Y'^* \end{pmatrix} \tag{1.22}$$

où : le « $.^+$ » désigne l'opération pseudo-inverse ; Y'^* est un artefact provenant de la résolution du système qui n'a pas de sens physique ni biologique.

Finalement, en utilisant l'équation (1.18) avec le vecteur $[L_p^*, M_p^*, S_p^*]$, il est possible d'obtenir un équivalent photopique à la couleur $[C] = [L_p, M_p, S_p, Y']$ dans l'espace CIE-XYZ (2°) $[C] = [X^*, Y^*, Z^*]$.

Coefficient	Éclairement (lx)					
	0.01	0.1	1	10	100	1000
$\alpha(E)$	0	0.042	0.222	0.356	0.735	1
$\beta(E)$	0.829	0.722	0.512	0.356	0.070	0
$l(E)$	0.020	0.049	0.188	0.409	0.748	1
$m(E)$	0.017	0.042	0.132	0.307	0.689	1
$a(E)$	-0.033	-0.028	-0.014	0.006	0.015	0
$b(E)$	0.075	0.063	0.094	0.107	0.073	0

TABLE 1.2 – Coefficients du modèle de Shin et al. (2004) fournis dans l'article original

1.1.6.2 Le modèle de Cao et al. (2008)

De façon similaire, les travaux de Cao et al. (2008) visent à obtenir des coordonnées équivalentes en vision photopique pour des domaines d'application en vision mésopique. Pour ce faire, les auteurs modélisent l'interférence des bâtonnets sur les cônes par :

$$\begin{cases} L_p^* = L_p + k_5(Y).Y' \\ M_p^* = M_p + k_5(Y).Y' \\ S_p^* = S_p + k_6(Y).Y' \end{cases} \tag{1.23}$$

où : L_p^*, M_p^* et S_p^* sont des coordonnées équivalentes photopiques dans l'espace CIE-LMS (2°) ; $Y \mapsto k_5(Y)$ et $Y \mapsto k_6(Y)$ sont des fonctions qui définissent les paramètres du modèle de Cao et al. (2008) dont quelques valeurs sont fournies dans l'article original (voir Table 1.3).

Lorsque les paramètres k_5 et k_6 sont nuls ou que Y' est nul, on retrouve $L_p^* = L_p$, $M_p^* = M_p$ et $S_p^* = S_p$, *i.e.* qu'il n'y a pas d'interférence des bâtonnets dans le système visuel (modèle de Kaiser and Boynton (1996)), ce qui correspond bien aux cas d'usage de la vision photopique.

Finalement, comme pour le modèle de Shin et al. (2004), il est possible d'estimer pour une couleur $[C] = [L_p, M_p, S_p, Y']$ son équivalent photopique dans l'espace CIE-LMS (2°) $[C] = [L_p^*, M_p^*, S_p^*]$ et, par conséquent, CIE-XYZ (2°) $[C] = [X^*, Y^*, Z^*]$.

	Luminance ($cd.m^{-2}$)		
Coefficient	10	0.62	0.1
$k_5(Y)$	0	0.0173	0.173
$k_6(Y)$	0	0.0101	0.357

TABLE 1.3 – Coefficients du modèle de Cao et al. (2008) fournis dans l'article original.

1.1.6.3 Différences colorimétriques en vision mésopique

Cette sous-section vise à définir une différence colorimétrique qui est applicable dans le cas de la vision mésopique. En effet, la différence colorimétrique définie par la CIE ΔE_{00}^* n'est applicable que dans le domaine de vision photopique.

Pour ce faire, Ashraf et al. (2022) ont proposé quatre métriques et les ont évalué dans les domaines de vision photopique et mésopique. Les évaluations de ces métriques ont été réalisées à l'aide des jeux de données obtenus en réalisant des expériences avec des participants pour des luminances variants de 0.002 à 10000 $cd.m^{-2}$. Les métriques étudiées dans les travaux de Ashraf et al. (2022) sont :

- la distance euclidienne dans l'espace LMSR ;
- la différence colorimétrique ΔE_{00}^* ;
- la différence colorimétrique ΔE_{00}^* avec prise en compte de l'interférence des bâtonnets dans le système visuel ;
- la différence colorimétrique ΔE_{00}^* avec prise en compte de l'interférence des bâtonnets dans le système visuel et l'adaptation chromatique.

Ashraf et al. (2022) concluent que la métrique la plus performante est la métrique de différence colorimétrique ΔE^*_{00} qui prend en compte l'interférence des bâtonnets. Cette métrique peut être calculée en suivant les trois étapes :

1. A partir des coordonnées d'une couleur $[C]$ dans l'espace LMSR, la convertir en LMS équivalent photopique (LMS*) en utilisant le modèle de Cao et al. (2008) ;
2. Convertir les données LMS* dans l'espace CIE-XYZ (2°), puis ensuite les convertir dans l'espace CIE-L*a*b* ;
3. Calculer la différence colorimétrique comme dans le cas de la vision en photopique, en utilisant les équations (7.4) et (7.5).

Cette métrique est applicable dans le domaine des visions mésopique et photopique. En effet, lorsque l'interférence dans les bâtonnets est nulle, alors on retrouve la métrique ΔE^*_{00} définie par la CIE (2022).

1.2 Qualité de l'éclairage d'une scène urbaine nocturne pour les piétons

Après avoir balayé les caractéristiques radiométriques et photométriques d'une scène urbaine nocturne (voir sous-section 1.2.1) ainsi que les usages de l'éclairage public pour les piétons (voir sous-section 1.2.2.1), les critères permettant de mesurer la qualité des éclairages urbains nocturnes (voir sous-section 1.2.2.2) sont recensés. Finalement, les moyens mis en place pour réaliser des évaluations portant sur ces critères de qualité de l'éclairage sont décrits en sous-section 1.2.3.

1.2.1 Description d'une scène urbaine nocturne

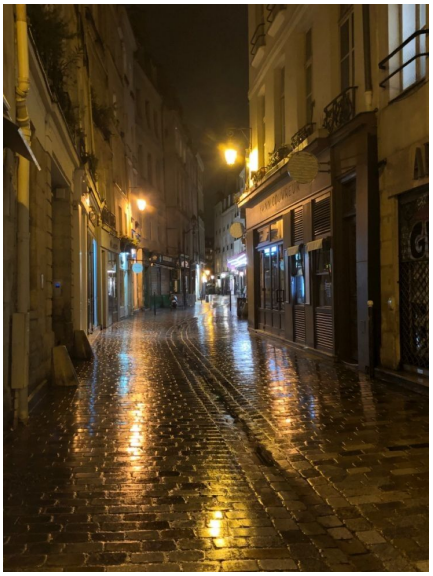
Une scène urbaine nocturne est généralement constituée d'éclairage artificiel même si certaines communes expérimentent la réduction des niveaux lumineux et l'extinction partielle ou totale des luminaires (Hodgers, 2025).

Dans les scènes urbaines nocturnes, l'éclairage artificiel est utilisé de plusieurs façons :

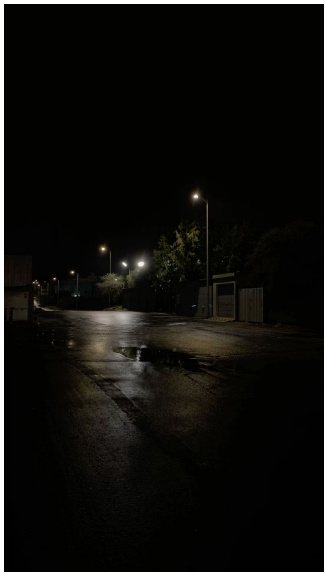
1. l'éclairage fonctionnel ;
2. l'éclairage de mise en valeur (architecturale ou du patrimoine naturel) ;
3. l'éclairage artistique (théatralisation nocturne ou spectacle de rue) ;
4. l'éclairage relatif au marketing urbain et à la publicité ;
5. l'éclairage décoratif (public comme privé) ;
6. l'éclairage privé.

Cette diversité lumineuse fait intervenir des typologies et variétés de scènes urbaines nocturnes (voir Figure 1.11). En effet, les scènes urbaines nocturnes présentent des niveaux lumineux variant de 1.10^{-3} cd/m^2 (zones sombres) à 1.10^6 cd/m^2 (sources lumineuses). Ainsi, les dynamiques de luminance ($\delta_L = L_{max} - L_{min}$) peuvent être de l'ordre de $1.10^6 cd/m^2$ et les ratios ($r_L = L_{max}/L_{min}$) atteindre 1.10^9, ce qui peut introduire des contrastes de Weber $C = \frac{L_{max}-L_{min}}{L_{min}}$ allant jusqu'à 1.10^9. Les scènes urbaines nocturnes appartiennent aux classes P définies par la norme EN-13201 (EN-13201, 2015).

De plus, les scènes urbaines nocturnes peuvent être construites à partir de différents types de matériaux et luminaires. Ce qui introduit des scènes complexes pouvant présenter des sources lumineuses de différentes technologies, distributions spectrales, températures de couleur et apparences colorées.



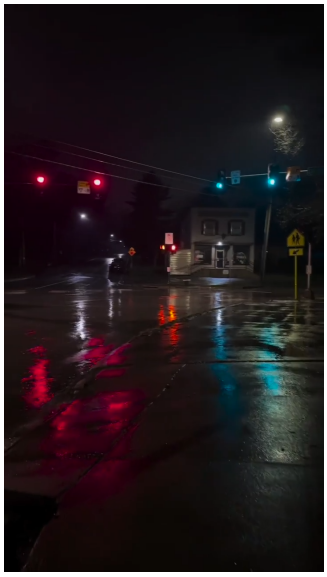
(a) Crédit photo : « lavliza1806 » utilisateur de Pinterest



(b) Crédit photo : « 1wcv » utilisateur de Pinterest



(c) Crédit photo : « alimosapor59 » utilisateur de Pinterest



(d) Crédit photo : « theonlycontext » utilisateur de Pinterest

FIGURE 1.11 – Illustration d'une scène urbaine nocturne comportant : (a) une forte dynamique de luminance ; (b) un fort contraste ; (c) divers types de matériaux ; (d) diverses sources lumineuses

1.2.2 Critères de qualité de l'éclairage pour les piétons

1.2.2.1 Les besoins des piétons dans une scène urbaine nocturne

La CIE (2019e) définit les besoins des piétons dans les scènes urbaines nocturnes comme :
— voir ;
— être vu ;
— être en sécurité ;
— se sentir en sécurité.

Le fait de pouvoir voir l'environnement dans lequel on se déplace est une nécessité première pour analyser les potentiels dangers qu'ils proviennent des autres usagers (en lien avec le sentiment de sécurité) ou des obstacles qui pourraient entraver notre chemin, ce qui est en lien direct avec le fait de se déplacer en sécurité. Être vu permet aux autres usagers de l'espace public de nous identifier réduisant ainsi les conflits tels que les accidents de la route, ce qui est en lien direct avec le fait de se sentir et d'être en sécurité.

L'ensemble de ces besoins sont fonctionnels et peuvent être complétés par des besoins à caractères plus esthétiques pour rendre l'espace attractif, procurant du bien-être et une identité nocturne tel que le fait d'éclairer pour mettre en valeur le patrimoine culturel (*e.g.* Mallet and Comelli, 2017).

1.2.2.2 Les critères d'évaluations de l'éclairage urbain nocturne pour les piétons

Afin de quantifier si un projet d'éclairage urbain permet de répondre aux besoins et usages des piétons (voir sous-section 1.2.2.1) il est nécessaire de définir des critères de qualité d'éclairage urbain.

Rahm and Johansson (2016) ont identifié des critères permettant de définir un éclairage extérieur de qualité. Ils distinguent trois catégories (voir Figure 1.12) : perception, évaluation et comportement dans l'environnement éclairé. Les critères en lien avec la perception de l'environnement éclairé portent sur les performances visuelles telles que l'acuité visuelle et la capacité des usagers à détecter les contrastes, les obstacles, et reconnaître les expressions faciales et les visages. En complément, il y a les critères portant sur la perception subjective de l'ambiance lumineuse, tels que la luminosité perçue et l'identification des couleurs. La catégorie évaluation regroupe le sentiment de sécurité, le confort et la satisfaction de l'éclairage. Finalement, le comportement des usagers dans l'environnement, peut être décrit, par exemple, avec la densité de piétons.

Trop et al. (2023) distinguent trois catégories de réponse d'un piéton à son environnement éclairé : perception, cognition et émotion. Trop et al. (2023) ne détaillent pas les catégories perception et cognition mais fournissent des éléments pour sa dernière catégorie émotion. En effet, la catégorie émotion telle que décrite par Trop et al. (2023) regroupe la sécurité (*e.g.* sentiment de sécurité), le confort (*e.g.* satisfaction et préférence des lieux), l'agrément (*e.g.* qualité et attractivité des lieux) et l'inconfort (*e.g.* inconfort dû à l'éblouissement et le scintillement).

L'impression subjective de l'espace éclairé (et pas seulement de l'ambiance lumineuse) est aussi évoqué dans certains travaux à la marge (*e.g.* Bishop and Rohrmann, 2003 ; Haans and de Kort, 2012). Par exemple, Haans and de Kort (2012) révèlent un lien entre le sentiment de plaisance et de sécurité, et le fait de voir ou d'avoir l'impression que l'espace architectural est délimité / clos.

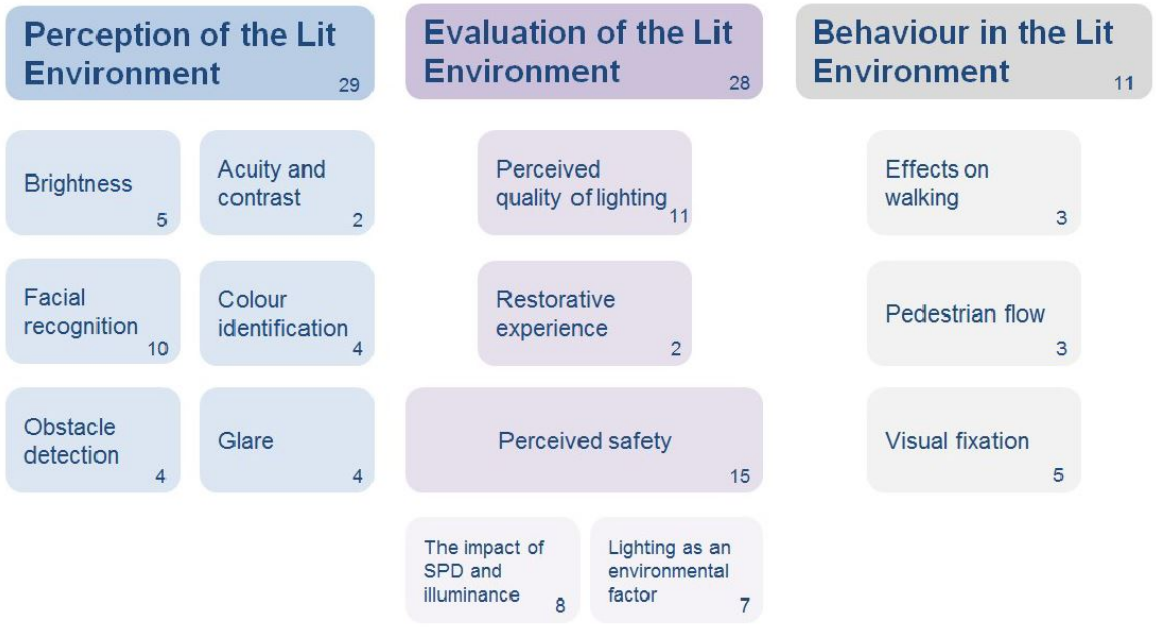


FIGURE 1.12 – Catégorisation des critères de qualité de l'éclairage par Rahm and Johansson (2016)

Finalement, en prenant en compte les travaux cités précédemment, nous proposons de regrouper les critères subjectifs portant sur les évaluations de la qualité de l'éclairage en six catégories (voir Table 1.4). Deux catégories sont liées à la perception, l'une à des jugements relatifs à la perception de l'ambiance lumineuse subjective, et l'autre objective avec les performances visuelles des usagers. Quatre catégories sont liées à « l'évaluation », influencée par les constructions mentales et expériences passées des usagers :

— la sensation d'inconfort relative à l'éblouissement ;
— le confort visuel et la satisfaction globale ;
— le sentiment de sécurité ;
— l'impression subjective de l'espace éclairé.

Centrale dans la littérature d'architecture et éclairage intérieur (Atié, 2024 ; Cauwerts, 2013), l'impression subjective de l'espace éclairé est un critère quasiment inexistant pour l'instant dans les recherches sur la qualité de l'éclairage urbain pour les piétons (Trop et al., 2023 ; Rahm and Johansson, 2016). De ce fait, contrairement à l'approche des ambiances, notamment utilisée dans la thèse de Atié (2024), nous avons choisi dans notre classification de distinguer la perception de l'ambiance lumineuse (telle que proposé notamment par Johansson et al. (2014) avec son POLQ avec des impressions uniquement portées sur la lumière et l'éclairage) et l'impression subjective de l'espace éclairé (qui portent sur les impressions de l'espace architectural, notamment sa géométrie ou s'il est complexe par exemple). Le critère portant sur les impressions de l'espace architectural ne sera pas étudié dans notre travail.

1.2.3 Évaluation de la qualité de l'éclairage : matériel et méthodes

Après avoir identifié les critères qui permettent de définir si un éclairage est de qualité, il est nécessaire de les évaluer. Dans les travaux de Johansson et al. (2014), il est proposé de séparer les moyens d'acquisition en deux catégories : a. en utilisant les ressentis des usagers (*observer-based environmental assessment (OBEA)*) ; b. en utilisant des outils de mesures (*technical environmental assessment (TEA)*). Cette classification est renforcée par les études scientifiques dans lesquelles les deux visions se complètent. Certains travaux menés en situation réelle (*e.g.* Rahm and Johansson, 2016, 2021) ou en environnement virtuel (*e.g.* Hao et al., 2022) consistent à recueillir les ressentis des usagers à travers des questionnaires. D'autres travaux consistent à chercher des corrélations ou développer des modèles pour faire le lien entre les ressentis subjectifs des usagers et des indicateurs radiométriques et photométriques (*e.g.* CIE, 2019e ; Pena-Garcia et al., 2015 ; Villa et al., 2017 ; Ye et al., 2017 ; Wei et al., 2024). Ces derniers ont pour objectif final de proposer des indicateurs permettant de s'affranchir des évaluations obtenues à partir des ressentis des usagers, pour alimenter, à terme, un contexte normatif. En effet, ces indicateurs sont faciles d'utilisation puisqu'ils peuvent être calculés au moment de la conception dans des logiciels d'éclairage ou obtenus sur site via des mesures photométriques.

Toutefois, il est nécessaire de collecter le ressenti des usagers que ce soit pour évaluer directement un éclairage ou pour alimenter et consolider les modèles fondés sur des grandeurs radiométriques et photométriques. Ainsi, dans la section 1.2.3.1 sont détaillés les modes de recueil des ressentis des usagers. Les indicateurs (et corrélations) radiométriques et photométriques existants pour concevoir un éclairage urbain nocturne de qualité (ou l'évaluer) sont présentés en sous-section 1.2.3.2.

1.2.3.1 Le recueil de données via des évaluations subjectives

Comment recueillir des jugements subjectifs ?

Pour déterminer si une installation d'éclairage est satisfaisante pour les usagers (*e.g.* Johansson et al., 2014) des jugements subjectifs peuvent être recueillis auprès de panels d'observateurs. Le plus écologique est de mener une étude terrain en condition réelle (*e.g.* Pena-Garcia et al., 2015 ; Rahm and Johansson, 2021 ; Viliunas et al., 2014). Néanmoins, d'un point de vue logistique, les expériences et recueils de données subjectives sur site de nuit sont contraignants. Ainsi, des études comme celle de Wei et al. (2024) ont vu le jour. Ces dernières visent à trouver des corrélations entre les évaluations obtenues sur site de nuit et de jour, de façon à ce que, par la suite, il n'y est plus de recueils sur site la nuit mais plutôt de jour là où il est plus facile de faire venir des personnes. Cependant, afin de valider un tel protocole, il est nécessaire d'avoir un recueil de données issues à la fois des évaluations de jour et de nuit. L'environnement étant très différent de jour, la pertinence d'une telle démarche est discutable. De plus, les expériences sur site réel de jour ou de nuit sont soumises à des conditions expérimentales incontrôlées (*e.g.* présence d'autres usagers). Ainsi des expériences sur piste (*e.g.* Villa et al., 2017) ou à l'échelle 1 en laboratoire (*e.g.* Rham and Johansson, 2018) permettent dans une certaine mesure d'éliminer certaines sources de variabilité.

Toujours dans l'objectif de s'affranchir des contraintes logistiques, il est aussi possible de réaliser le recueil de données subjectives en utilisant des images imprimées (*e.g.* Stamps, 1990) ou affichées à l'aide d'un dispositif d'affichage type écran (*e.g.* Hao et al., 2022 ; Stamps, 2010). Cela présente l'avantage d'éviter d'aller sur site, ce qui enlève des contraintes logistiques (et également des variables contextuelles) tout en permettant d'étudier l'influence de certains facteurs pouvant impacter les jugements subjectifs. Cependant, cette étape nécessite des travaux de validations notamment en

comparant les évaluations de scènes réelles avec celles recueillies quand elles sont reproduites en environnement virtuel. Cette démarche peut également être utile dans la conception d'installation d'éclairage. En effet, lors de la conception il peut être demandé aux usagers d'évaluer la scène à travers des images de synthèses. Cependant, les procédés de création des images de synthèses doivent être validés (*e.g.* Bishop and Rohrmann, 2003), par exemple en comparant les jugements subjectifs obtenus sur site réel et ce même site reproduit en image de synthèse.

Finalement, pour s'affranchir totalement des jugements subjectifs des participants il peut être intéressant d'utiliser des modèles et indicateurs radiométriques et photométriques. Cependant, il est nécessaire de valider l'usage de ces modèles et indicateurs, par exemple en réalisant des études visant à déterminer si la corrélation entre ces modèles et indicateurs, et les jugements subjectifs des usagers est forte (*e.g.* Abboushi et al., 2023).

Les dispositifs de réponses

Généralement, le recueil des jugements subjectifs des usagers se fait à l'aide de questionnaire comportant des items qui visent à évaluer des critères de qualité de l'éclairage. La Table 1.4 regroupe des items en fonction des critères de qualité de l'éclairage identifié en sous-section 1.2.2.2. Les échelles de réponses sont variées (voir ci-dessous), souvent en cinq ou sept points.

En premier lieu, dans les travaux de Haans and de Kort (2012), Johansson et al. (2014) et Pena-Garcia et al. (2015) il est possible de trouver des items qui sont relatifs à la perception subjective des ambiances lumineuses : d'une part, avec des items représentés sous forme de questions « Quelle est l'intensité de l'éclairage public dans cette rue ? » ou « A quel point, totalement à pas du tout, vous pouvez voir ce qu'il se passe dans cette rue ? » (*"How intense do you find the public lighting in this street ?"* ou *"How well or poorly could you see what is happening in this street ?"*). D'autre part avec des échelles sémantiques bipolaires telles que « Sombre–lumineux », « Chaud–Froid » ou « Non-uniforme–Uniforme » (*"Dark–Light"*, *"Warm–Cool"* ou *"Uneven distributed–Even distributed"*).

Ces descriptions des ambiances lumineuses peuvent être complétées avec des critères visant à mesurer les performances visuelles des participants (*e.g.* Rahm and Johansson (2021), Haans and de Kort (2012) et Ye et al. (2017)). Il est notamment possible de mesurer directement les performances visuelles des participants avec des tâches de détection ou de reconnaissance telles que le fait de demander aux participants de s'arrêter de marcher dans la rue lorsqu'ils arrivent à distinguer une expression faciale ou les informations d'un panneau (*e.g.* Rahm and Johansson, 2021 ; Ye et al., 2017).

En complément, il est généralement demandé aux participants d'évaluer leur niveau d'inconfort lié à l'éblouissement que ce soit sous forme de question « Est-ce que l'éclairage public de cette rue vous gêne d'une quelconque manière ? (éblouissement, mal de tête...) » (*"Does the public lighting of this street bother you in any way ? (glare, headache...)"* ; Pena-Garcia et al. (2015)) ou via des échelles avec plusieurs labels (*e.g.* de Boer and Schreuder, 1967 ; Villa et al., 2017) ou via une échelle bipolaire « Éblouissant-Ombré » (*"Glaring–Shaded"* ; Johansson et al., 2014).

De plus, des questions plus générales portant sur l'agrément dans les scènes lumineuses peuvent être demandées aux participants. En effet, dans les études de Johansson et al. (2014) et Viliunas et al. (2014) un critère « Agréable–Désagréable » (*"Pleasant–Unpleasant"*) a été étudié. Par ailleurs, dans l'étude de Pena-Garcia et al. (2015) une question sur l'attrait est formulée : « Est-ce que vous appréciez les couleurs qui composent cette rue ? » (*"Do you like the color of the light in this street ?"*).

Les environnements urbains nocturnes sont généralement conçus pour garantir sécurité et sentiment de sécurité élevé. Que ce soit par le fait que les usagers arrivent bien à se voir chacun (*e.g.* piétons et automobilistes - sécurité routière) ou par le fait que les piétons se sentent en sécurité vis-à-vis du contexte social qui les entourent. Il est possible de recueillir les jugements subjectifs des participants à l'aide de questions que ce soit sur les accidents et conflits (*"Do you think that the lighting of this street could have an influence on potential accidents (traffic, pedestrians falls...) ?"* ; Pena-Garcia et al. (2015)) ou sur le sentiment de sécurité perçu (*"How safe do you fell when you walk along this street at night ?"* - *"How safe or unsafe did you feel while down the street ?"*, *"How comfortable were you with walking down this street ?"* et *"To what extent would you normally avoid or pick this street during nighttime walk ?"* - Haans and de Kort, 2012 ; Pena-Garcia et al., 2015) ou via des comportements projetés « Quelles sont les chances, petite ou grande, qu'un criminel puisse être caché dans la rue sans pour autant être détecté ? » (*"How big or small is the chance that a criminal might hide in this street without being detected ?"* - Haans and de Kort, 2012).

Finalement, des items plus généraux portant sur la satisfaction générale de l'éclairage public sont également abordés dans de précédentes études. En effet, dans les travaux de Pena-Garcia et al. (2015), les items suivants sont étudiés : « De manière générale, évaluer l'éclairage public de la rue » (*"Evaluate the lighting of this street in general terms"*) et « Est-ce que vous pensez que le nombre de luminaires est suffisant dans cette rue ? » (*"Do you think that the number of luminaires in this street is enough ?"*) , ou encore dans l'étude de Portnov et al. (2021) l'item « Satisfaction générale / confort perçu (0. inconfortable ; 1. légèrement inconfortable ; 2. plutôt confortable ; 3. très confortable) » (*"Overall lighting quality/perceived comfort (0-uncomfortable ; 1-slightly uncomfortable ; 2-quite comfortable ; 3-very comfortable)"*).

Analyse de données

Dans certains cas il peut être intéressant de regrouper différents items pour ensuite les fusionner ensemble en une seule note. Par exemple, Johansson et al. (2014) proposent de regrouper son questionnaire composé de dix items en deux dimensions, le *perceived strength quality* et le *perceived comfort quality*. En complément, Haans and de Kort (2012) proposent de regrouper des items par triplet. Le principal avantage est de rendre plus robuste la notation décernée par un participant pour cette dimension (obtenue à partir d'items fusionnés) comparé aux évaluations issues des items individuels. En effet, à l'instar d'une mesure radiométrique il est pertinent d'effectuer plusieurs mesures pour ensuite réaliser une moyenne qui va atténuer les incertitudes de mesures.

1.2.3.2 Le recueil de données via des indicateurs radiométriques et photométriques

Une autre façon de déterminer si un éclairage public est de qualité ou non, est d'utiliser des métriques et indicateurs fondés sur des mesures radiométriques et photométriques. Dans les faits, les projets d'éclairage public sont en grande majorité soumis à un contexte normatif et réglementaire permettant de garantir que les usagers peuvent se mouvoir sans danger et en sécurité (voir et être vu tout en se sentant en sécurité) (*e.g.* EN-13201, 2015). Ces normes peuvent s'appuyer sur des études scientifiques et des rapports techniques (*e.g.* CIE, 2019e).

En particulier la norme EN-13201 (2015) recommande des niveaux d'éclairements moyens au sol minimum à respecter selon l'usage de la voie à éclairer. Pour les piétons les classes P recommandent des niveaux d'éclairements entre 2 lx (classe P6) à 15 lx (classe P1) et un éclairement minimal entre 0.4 lx (classe P6) et 3 lx (classe P1). De plus, une uniformité définie comme le rapport de l'éclairement minimum sur l'éclairement moyen mesurés selon un maillage au sol ($U_0 = E_{min}/E_{moy}$) doit aussi être respectée.

L'éblouissement (des conducteurs, pas encore des piétons) est contrôlé grâce à l'indicateur TI(%) qui quantifie l'augmentation en % du contraste requis entre un objet et le fond pour être aussi bien détecté sans sources éblouissantes dans le champ visuel de l'usager de la route. Le TI(%) s'appuie notamment sur la luminance moyenne (L_{moy}) de la chaussée et une estimation de la luminance de voile (L_v) qui quantifie le phénomène physiologique d'éblouissement d'incapacité qui réduit la capacité de détecter les contrastes dans la scène visuelle :

$$TI(\%) = 65.\frac{L_v}{(L_{moy})^{0.8}} \tag{1.24}$$

Il est à noter que l'indicateur TI(%) est valable que pour des niveaux lumineux photopiques.

En complément, d'autres travaux de la littérature préconisent des recommandations photométriques pour assurer la qualité d'une installation d'éclairage pour les piétons (*e.g.* CIE, 2019e). En effet, dans les travaux de la CIE (2019e) il est préconisé pour garantir :

— des niveaux de sentiment de sécurité optimaux, d'avoir un éclairement horizontal moyen de 4 lx (avec un minimum de 0.8 lx) ;
— des taux de détection d'obstacle optimaux, d'avoir un éclairement horizontal minimum de plus de 1 lx ;
— d'être vu par des automobilistes, un éclairement vertical d'au moins 6 lx.

Pour tenir compte que dans les scènes nocturnes l'usager est généralement en vision mésopique, un autre indicateur utilisé est le rapport S/P. Il se définit comme le rapport entre la luminance spectrique d'une source ($L_e : \lambda \mapsto L_e(\lambda)$) en vision scotopique (en utilisant la courbe $K' : \lambda \mapsto K'(\lambda)$) et en vision photopique :

$$S/P = \frac{\int_{780\text{ nm}}^{380\text{ nm}} L_e(\lambda).K'(\lambda).d\lambda}{\int_{780\text{ nm}}^{380\text{ nm}} L_e(\lambda).K(\lambda).d\lambda} \tag{1.25}$$

L'indicateur S/P vise à traduire le rapport d'efficacité lumineuse perçue entre un mode de vision diurne et celui nocturne que procure une source lumineuse. Ainsi, une source lumineuse avec un rapport S/P supérieur à 1 indique que la source lumineuse sera perçue plus lumineuse en vision mésopique qu'en vision photopique. Cet indicateur a été utilisé dans des études portant sur le confort général qui ont fourni des preuves de l'efficacité de cet indicateur (*e.g.* Knight, 2010).

Pour le critère portant sur l'éblouissement d'inconfort, des études ont mis au point des modèles fondés sur des calculs photométriques qui visent à traduire un niveau d'inconfort dû à l'éblouissement généralement en utilisant l'échelle de de Boer and Schreuder (1967) (*e.g.* Abboushi et al., 2023 ; Villa et al., 2017) en fonction des caractéristiques photométriques et géométriques des sources lumineuses éblouissantes et du fond.

Finalement, l'éclairage artificiel impacte aussi les espèces vivantes (faune et flore). De par la variété d'espèces soumises à l'éclairage artificiel, il y a une multitude de photorécepteurs qui individuellement sont caractérisés par des courbes de sensibilités spectrales qui changent d'une espèce à l'autre. Ainsi, il pourrait être intéressant de réaliser des acquisitions spectrales permettant d'obtenir une multitude d'informations pour plusieurs espèces afin de proposer des indicateurs pour quantifier cet impact. Par exemple, Marchant et al. (2023) ont démontré que la température de couleur d'une source influence le comportement d'un type d'insecte et pourrait être un indicateur pertinent.

Critère de qualité	Exemples d'items de la littérature (traduit en français)	Référence bibliographique
Perception de l'ambiance lumineuse	« A quel point, totalement à pas du tout, vous pouvez voir ce qu'il se passe dans cette rue ? : Totalement(1)–Neutre(3)–Pas du tout(5) » - échelle en cinq points	Haans and de Kort (2012)
	« [La scène est :] Sombre–Lumineuse » et « [La scène est :] Uniforme–Non Uniforme » - échelle en sept points	Johansson et al. (2014)
	« L'intensité de l'éclairage public dans cette rue est : Inexistante(1)–Grande(5) » - échelle en cinq points	Pena-Garcia et al. (2015)
Performance visuelle	Mesure de la distance à laquelle les participants arrivent à distinguer une expression faciale ou les informations écrites sur un panneau	Rahm and Johansson, 2021 Ye et al., 2017
Inconfort dû à l'éblouissement	«[L'éblouissement est :] Insupportable(1) – Dérangeant(3) – Supportable(5) – Acceptable(7) – Négligeable(9) » - échelle en neuf points	de Boer and Schreuder (1967)
	« Est-ce que l'éclairage public de cette rue vous gêne d'une quelconque manière ? (éblouissement, mal de tête...) Pas du tout(1)–Totalement(5) » - échelle en cinq points	Pena-Garcia et al. (2015)
Confort et satisfaction générale	« Est-ce que vous appréciez la couleur des luminaires dans cette rue ? Pas du tout(1)–Totalement(5) » et « Est-ce que vous pensez que le nombre de luminaires est suffisant dans cette rue ? Pas du tout(1)–Totalement(5) » - échelles en cinq points	Pena-Garcia et al. (2015)
	« [La scène est :] Agréable(-3)–Désagréable(3) » - échelle en sept points	Viliunas et al. (2014)
	« [Je trouve la scène :] Inconfortable(0) – Légèrement inconfortable(1) – plutôt confortable(2) – très confortable(3) » - échelle en quatre points	Portnov et al. (2021)
Sentiment de sécurité	« Est-ce que vous pensez que l'éclairage dans cette rue a une influence dans les potentiels accidents (conflit avec des automobilistes ou qu'entre piétons) ? Pas du tout(1)–Totalement(5) » et « Comment vous vous sentez en sécurité lorsque vous traversez la rue ? Pas du tout(1)–Totalement(5) » - échelles en cinq points	Pena-Garcia et al. (2015)
	« Dans quelle mesure, avec un contexte normal, vous éviteriez de traverser ou prendriez cette rue en période nocturne ? : Totalement(1)–Neutre(3)–Pas du tout(5)» et « Quelles sont les chances, petite ou grande, qu'un criminel puisse être caché dans la rue sans pour autant être détecté ? : Totalement(1)–Neutre(3)–Pas du tout(5) » - échelles en cinq points	Haans and de Kort (2012)

TABLE 1.4 – Exemple d'items relevés des questionnaires de la littérature scientifique relatifs aux critères de qualité de l'éclairage pour les piétons

1.3 Acquisition de scènes urbaines nocturnes via un appareil photographique numérique

La section 1.3.1 décrit ce que capture et restitue un appareil photographique numérique en termes de données. Les traitements qu'il est possible de réaliser sur les données acquises sont ensuite développés, pour estimer des données colorimétriques (section 1.3.2), et pour reconstruire des données radiométriques (section 1.3.3).

1.3.1 Description d'un appareil photographique numérique

Un appareil photographique numérique est un outil permettant de convertir des luminances spectriques en données numériques (voir Figure 1.13). Pour décrire le fonctionnement d'un appareil photographique numérique, il est possible de partir d'une luminance spectrique $(\lambda, t \mapsto L_e(\lambda, t))$ incidente à l'objectif de la caméra. La luminance spectrique va passer à travers le système optique composé de lentilles pour ensuite atteindre l'obturateur qui va laisser passer le flux lumineux pendant une durée Δt_{exp}. Le flux lumineux traverse ensuite la matrice de filtres colorés (caractérisée par les transmittances spectrales $\lambda \mapsto F_R(\lambda)$, $\lambda \mapsto F_V(\lambda)$ et $\lambda \mapsto F_B(\lambda)$; voir Figure 1.14) pour finalement atteindre le capteur CMOS ou CCD qui est composé d'un convertisseur analogique vers numérique. Dans le cas d'un appareil photographique numérique idéal capturant une scène statique $(\lambda \mapsto L_e(\lambda))$, il est possible de faire le lien entre la luminance spectrique et la sortie numérique par :

$$\begin{cases} R_{APN}(\Delta t_{exp}) = max(k_{APN}.\Delta t_{exp}.\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}}(L_e(\lambda).F_R(\lambda)).d\lambda, k_{APN}) \\ V_{APN}(\Delta t_{exp}) = max(k_{APN}.\Delta t_{exp}.\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}}(L_e(\lambda).F_V(\lambda)).d\lambda, k_{APN}) \\ B_{APN}(\Delta t_{exp}) = max(k_{APN}.\Delta t_{exp}.\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}}(L_e(\lambda).F_B(\lambda)).d\lambda, k_{APN}) \end{cases} \tag{1.26}$$

où : k_{APN} correspond à une constante numérique généralement égale à $2^{N_{bits}} - 1$ avec N_{bits} le nombre de bits d'encodage alloués par canal coloré.

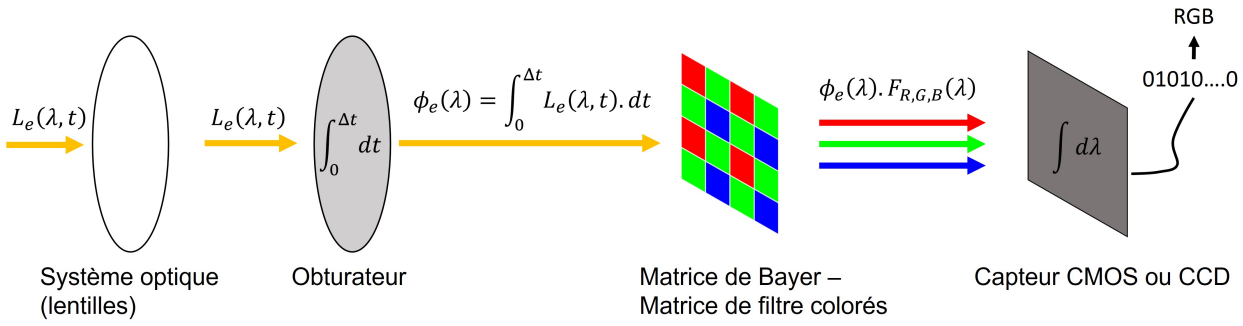
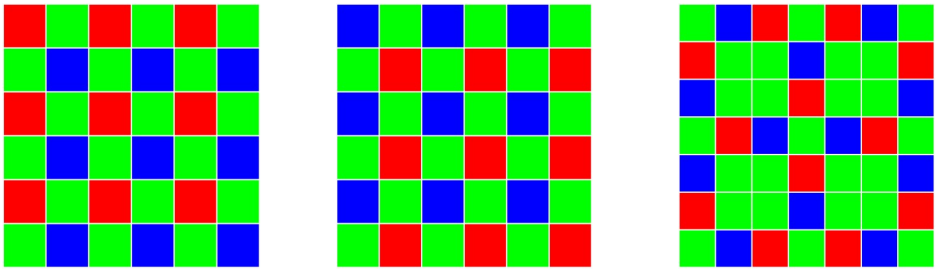


FIGURE 1.13 – Illustration du fonctionnement d'un appareil photographique numérique



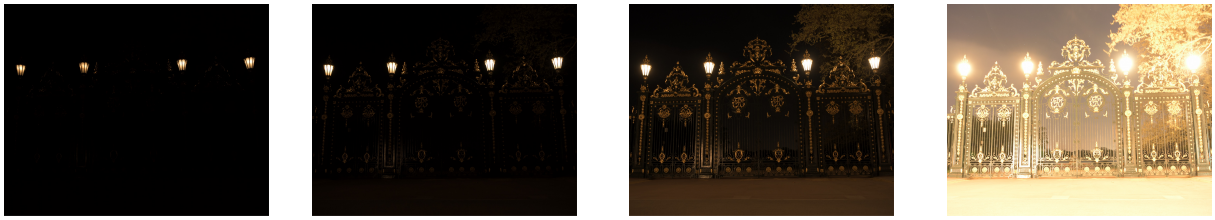
(a) Matrice de Bayer avec une structure RVVB (b) Matrice de Bayer avec une structure BVVR (c) Structure X-Trans

FIGURE 1.14 – Illustration de différentes matrices de filtres colorés

Dans le cas d'une image, un pixel correspond à une valeur R_{APN}, V_{APN} ou B_{APN}. On appelle pixel coloré un triplet RVB qui est obtenu à partir des valeurs R_{APN}, V_{APN} et B_{APN} qui sont situées à proximité en les rassemblant (*e.g.* grâce à des filtres bilinéaires comme indiqué dans Malvar et al. (2004)).

Une image obtenue à partir d'une seule durée d'exposition Δt_{exp} et une ouverture fixe (D diamètre de l'ouverture) est appelée image LDR (*Low Dynamic Range* - Faible dynamique de luminance) et présente le désavantage d'être contrainte par la durée d'exposition et l'ouverture (capture des luminances spectriques minimale et maximale) et l'encodage de la caméra (finesse des mesures). Généralement l'encodage utilisé est de 8 bits (soit 2^8 valeurs possibles, de 0 à 255) par pixel, soit 8/2x8/8 bits (resp. 3x8/8x8/3x8 bits) par pixel R/V/B dans le cas d'une matrice RVVB (resp. X-Trans). Généralement, les standards de stockage des images (*e.g.* JPEG et PNG) regroupent les informations provenant d'un même canal coloré en utilisant 8 bits de façon à disposer d'images encodées sur 8 bits par canal coloré, et ce, indépendamment de la structure de la matrice colorée.

Dans le cas de scène présentant une grande dynamique de luminance, il est impossible d'obtenir une image LDR qui capture à la fois des informations significatives dans les niveaux lumineux sombres (grande durée d'exposition) et élevées (faible durée d'exposition) à ouverture constante (voir Figure 1.15).



(a) $\Delta t_{exp} = 1/125\ s$ (b) $\Delta t_{exp} = 1/15\ s$ (c) $\Delta t_{exp} = 1/2\ s$ (d) $\Delta t_{exp} = 30\ s$

FIGURE 1.15 – Illustration de la capture issue d'images LDR d'une scène lumineuse qui présente une forte dynamique de luminance à ouverture constante (D = f/4, où f correspond à la focale de l'appareil photographique ici f = 28 mm)

Cependant, il est possible via des algorithmes (*e.g.* Debevec and Malik, 1997 ; Reinhard et al., 2010) de fusionner plusieurs images LDR (obtenues pour différentes durées d'exposition et/ou ouverture) pour obtenir une image HDR (R^{HDR}_{APN}, V^{HDR}_{APN} et B^{HDR}_{APN}) (*High Dynamic Range* - Grande dynamique de luminance) qui contient des informations significatives à la fois dans des niveaux lumineux sombres et élevés via un niveau de graduation plus fin.

En effet, si pour un pixel coloré d'une image HDR $[R_{APN}^{HDR}, V_{APN}^{HDR}, B_{APN}^{HDR}]$ sont utilisées N photographies LDR chacune encodée avec n/n/n bits (soit 2^n valeurs possibles par pixel R, V ou B), alors l'image HDR pourra contenir des informations encodées jusqu'à nxN/nxN/nxN par pixel coloré (soit $2^{(N*n)}$ valeurs possibles par pixel R, V ou B).

De plus, une image HDR présente l'avantage d'approximer un comportement linéaire avec l'entrée de la caméra ($\lambda \mapsto L_e(\lambda)$) par, dans le cas idéal :

$$\begin{cases} R_{APN}^{HDR} = k_{APN}. \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} (L_e(\lambda).F_R(\lambda)).d\lambda \\ G_{APN}^{HDR} = k_{APN}. \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} (L_e(\lambda).F_V(\lambda)).d\lambda \\ B_{APN}^{HDR} = k_{APN}. \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} (L_e(\lambda).F_B(\lambda)).d\lambda \end{cases} \tag{1.27}$$

L'ensemble des couleurs qu'un appareil photographique numérique peut restituer par métamérisme est appelé gamut de la caméra. Ainsi le gamut correspond à un volume qui est défini par :

$$GAMUT = \{[C] \equiv \alpha_R.[F_R] + \alpha_G.[F_V] + \alpha_B.[F_B], \qquad (\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B) \in [0;1]^3\} \tag{1.28}$$

L'ICC (*International Color Consortium*) a proposé une uniformisation des données de l'ensemble du processus d'acquisition/restitution (entrées et sorties) d'une scène lumineuse (camera vers écran). Parmi les espaces colorimétriques les plus répandus, il est possible de citer l'espace sRGB et l'espace Adobe-RGB dont les gamuts respectifs sont tracés en Figure 1.16.

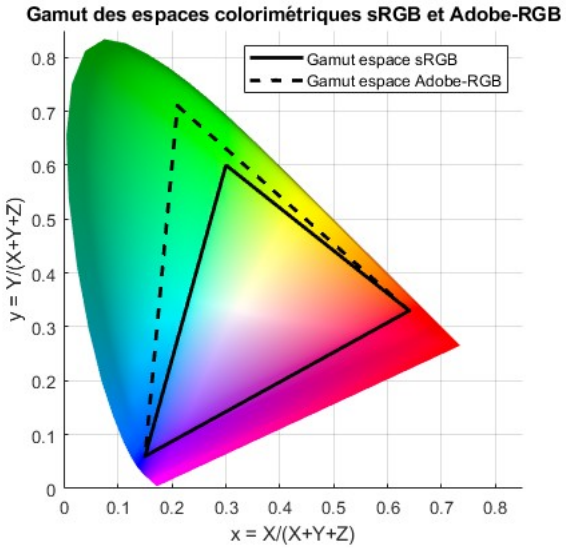


FIGURE 1.16 – Diagramme de chromaticité CIE 1931 xy où les gamuts de l'espace sRGB et Adobe-RGB ont été représentés. Le fond coloré en forme d'arche correspond à l'ensemble des couleurs qu'il est possible pour l'œil de capter dans l'espace CIE-XYZ (2°)

Dans le contexte d'acquisition de scènes urbaines nocturnes, il est nécessaire de réaliser des acquisitions HDR pour disposer à la fois d'informations dans les zones lumineuses claires (*e.g.* aux alentours des luminaires) et sombres. Ainsi, il est nécessaire de réaliser des acquisitions LDR avec des durées d'expositions élevées (pour les zones sombres), ce qui peut devenir contraignant dans le cas d'une scène présentant des éléments dynamiques (*e.g.* des piétons en mouvement). De plus, en raison de leurs comportements numériques et leur conception (caméra conçue pour fonctionner dans des niveaux lumineux photopiques), les caméras numériques peuvent présenter des incertitudes sur les mesures pour des niveaux lumineux faibles (*e.g.* Mornet, 2011) plus élevées que pour des niveaux lumineux photopiques. De plus, par construction, les caméras numériques peuvent ne pas capturer l'ensemble des couleurs (par métamérisme) qu'il est possible d'observer sur site, et par conséquent que l'œil d'un observateur pourrait voir.

Finalement, les données issues d'un appareil photographique numérique (RVB_{APN} ou RVB_{APN}^{HDR}) présentent les principaux défauts d'être dépendantes de la caméra, et ne pas être descriptives de ce que l'œil d'un observateur standard pourrait observer. En effet, les familles des vecteurs de l'appareil photographique ($\lambda \mapsto F_R(\lambda)$, $\lambda \mapsto F_V(\lambda)$ et $\lambda \mapsto F_B(\lambda)$) et les vecteurs des espaces colorimétriques (*e.g.* $\lambda \mapsto \bar{x}(\lambda)$, $\lambda \mapsto \bar{y}(\lambda)$ et $\lambda \mapsto \bar{z}(\lambda)$) forment une famille libre : la condition de Luther n'est pas respectée (Luther, 1927). Ainsi, des méthodes de conversion d'un triplet RVB_{APN} (ou RVB_{APN}^{HDR}) en des coordonnées colorimétriques (*e.g.* dans l'espace CIE-XYZ 2°, CIE-RGB, CIE-LMS ou LMSR) ont été mises en place. Il s'agit d'étalonnage colorimétrique (ou caractérisations colorimétriques).

1.3.2 Principe et limites des étalonnages colorimétriques

Dans l'objectif d'alléger les notations dans la suite de cette section, seuls sont abordés les étalonnages colorimétriques d'un espace colorimétrique du type RVB (*e.g.* caméra) vers l'espace colorimétrique CIE-XYZ (2°), et inversement. Néanmoins, les méthodes présentées peuvent s'appliquer à d'autres espaces colorimétriques (et de façon la plus générale, entre deux espaces vectoriels de dimension trois).

Un étalonnage colorimétrique s'appuie sur une transformation $(R, V, B) \mapsto T(R, V, B) = (X, Y, Z)$. Pour construire cette transformation, on utilise des points de référence entre les espaces RVB et XYZ ($(R(i), V(i), B(i))_i$ et $(X(i), Y(i), Z(i))_i$), tels que :

$$\begin{cases} \forall i \in [1; N], [C_i] \equiv R_i.[F_R] + V_i.[F_G] + B_i.[F_B] \\ \forall i \in [1; N], [C_i] \equiv X_i.[\bar{x}] + Y_i.[\bar{y}] + Z_i.[\bar{z}] \\ \forall i \in [1; N], R_i.[F_R] + V_i.[F_G] + B_i.[F_B] \equiv X_i.[\bar{x}] + Y_i.[\bar{y}] + Z_i.[\bar{z}] \end{cases} \tag{1.29}$$

où : N correspond au nombre de points de références pour lesquels les couleurs $([C_i])_{i\in[1;N]}$ sont connues dans les espaces colorimétriques RVB et CIE-XYZ (2°).

Au sein des méthodes d'étalonnage colorimétrique proposées dans la littérature scientifique, deux catégories se distinguent. D'une part, les méthodes globales qui s'appuient sur des modèles mathématiques dont le nombre de paramètres est fixe et qui appliquent la même transformation en tout point de l'espace (*e.g.* Gordon and Holub, 1993 ; Haneishi et al., 1995 ; Hong et al., 2011). D'autre part, les méthodes locales qui appliquent une transformation différente selon la région dans lequel se situe le point à transformer (*e.g.* Genetten, 1993 ; Menesatti et al., 2012). Dans la suite de cette section seuls les principes généraux de construction des méthodes d'étalonnage colorimétrique sont abordés. Davantage de détails concernant les constructions des modèles sont fournis en section 2.1.

Pour déterminer une transformation provenant d'une méthode globale, le problème à considérer est du type :

$$argmin\{E(T(R,V,B),(X,Y,Z))_i, \qquad (t_1,...,t_n)\} \tag{1.30}$$

où : $argmin\{x,(t_1,...,t_n)\}$ correspond au n-uplet $(t_1,...,t_n)$ qui minimise la quantité x ; $(t_1,...,t_n)$ correspond aux paramètres de la transformation T ; $E(.,.)_i$ correspond à une erreur calculée entre l'ensemble des estimations $(T(R(i),V(i),B(i)))_i$ et les données de références $(X(i),Y(i),Z(i))_i$: par exemple il peut s'agir de la racine carré de l'erreur quadratique moyenne entre l'ensemble des estimations $(T(R(i),V(i),B(i)))_i$ et les données cibles $(X(i),Y(i),Z(i))_i$.

La création des modèles locaux s'appuie sur les deux structures de référence de façon à ce que le sommet d'indice i corresponde à la fois dans l'espace d'entrée au triplet RVB_i et dans l'espace de sortie au triplet XYZ_i (voir Figure 1.17). L'objectif est de construire un modèle qui repose sur le fait qu'un triplet RVB_q en entrée se trouve à proximité de points de référence, et qu'une relation peut être établie entre ce triplet et ces points de référence.

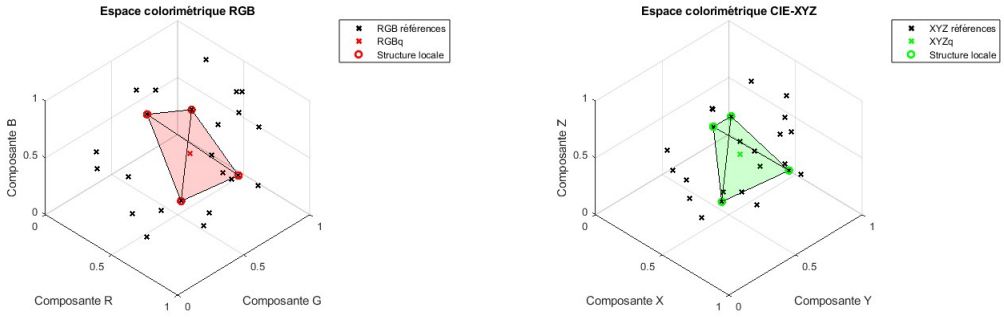


FIGURE 1.17 – Illustration de la création d'un modèle d'étalonnage colorimétrique local

Les méthodes locales offrent l'avantage de conserver tous les points de référence. En revanche, les méthodes globales, qui appliquent une transformation sur l'ensemble de l'espace colorimétrique, tendent à une modélisation moyenne.

Ainsi, les méthodes locales sont davantage sensibles aux points de références et font l'hypothèse implicite qu'ils sont exempts de bruit. Or, dans le cas de scènes urbaines nocturnes, il est difficile d'obtenir des acquisitions non bruitées en raison du bruit de mesure pouvant être plus élevé aux faibles niveaux lumineux. Cette limite sera à prendre en compte dans ce travail.

Les études précédentes (e.g Ashraf et al., 2024 ; Haneishi et al., 1995 ; Menesatti et al., 2012) ont démontré l'intérêt d'utiliser des outils d'étalonnage colorimétrique dans divers domaines (caméras, écrans et imprimantes) avec des différences colorimétriques ΔE^*_{ab} variant entre 2 et 5 (cas le plus défavorable), ce qui est acceptable pour une majorité d'applications. Ces valeurs de différences colorimétriques sont obtenues sans distinction des interpolations et extrapolations, ce qui ne permet pas de différencier les performances dans ces deux cas, notamment dans le cas des extrapolations aux niveaux lumineux très faibles et élevés. Or, ces performances seraient intéressantes à connaître dans le cas de scènes comportant une grande dynamique de luminance et des contrastes marqués, comme une scène urbaine nocturne. De plus, ces études ont été réalisées en vision photopique, ne permettant pas de présager de leurs performances en conditions mésopiques. Enfin, ces méthodes n'ont été validées que dans le cas de scènes simples, comportant des sources lumineuses de mêmes caractéristiques spectrales, ce qui n'est pas forcément le cas des scènes urbaines nocturnes.

1.3.3 Principe et limites des méthodes de reconstruction spectrale

Une autre façon d'obtenir des données colorimétriques consiste à estimer la luminance spectrique incidente à la caméra $\lambda \mapsto L_e(\lambda)$ (voir équation (1.27) et Figure 1.18). Il s'agit de reconstruction spectrale à partir de triplets RVB.

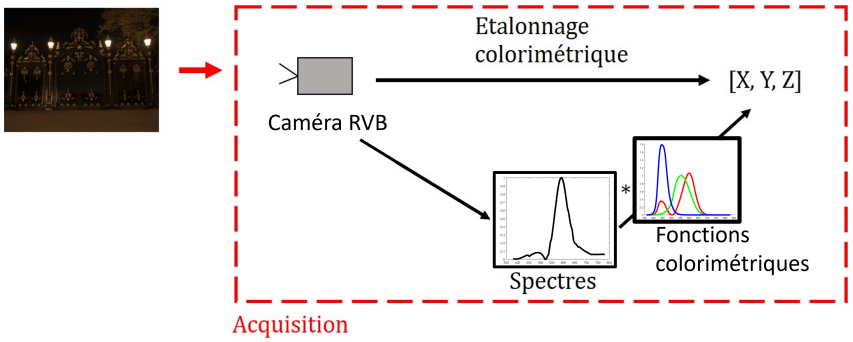


FIGURE 1.18 – Illustration des outils permettant l'acquisition de données colorimétriques à partir d'une caméra numérique

Il est nécessaire de disposer d'un jeu de données reliant les données acquises par la caméra RVB $((R(i), V(i), B(i))_i)$ et les luminances spectriques $((L_{e,i})_i)$, puis obtenir une transformation T_{Ls} garantissant :

$$T_{Ls}(R(i), V(i), B(i)) = L_{e,i}, \qquad \forall i \tag{1.31}$$

Les équations (1.27) et (1.31) peuvent être regroupées, de façon à obtenir le problème inverse suivant :

$$\begin{cases} argmin\{E((R^{HDR}_{APN}, V^{HDR}_{APN}, B^{HDR}_{APN}), (\tilde{R}^{HDR}_{APN}, \tilde{V}^{HDR}_{APN}, \tilde{B}^{HDR}_{APN}))_i, \qquad (L_{e,i})_i\} \\ \tilde{R}^{HDR}_{APN} = k_{APN}. \int_{380\ \text{nm}}^{780\ \text{nm}} (L_e(\lambda).F_R(\lambda)).d\lambda \\ \tilde{V}^{HDR}_{APN} = k_{APN}. \int_{380\ \text{nm}}^{780\ \text{nm}} (L_e(\lambda).F_V(\lambda)).d\lambda \\ \tilde{B}^{HDR}_{APN} = k_{APN}. \int_{380\ \text{nm}}^{780\ \text{nm}} (L_e(\lambda).F_B(\lambda)).d\lambda \end{cases} \tag{1.32}$$

où : $(\tilde{R}^{HDR}_{APN}, \tilde{V}^{HDR}_{APN}, \tilde{B}^{HDR}_{APN})_i$ sont les observations initiales qui sont fournies, et dont l'on souhaite trouver une luminance spectrique métamère ; $(\tilde{R}^{HDR}_{APN}, \tilde{V}^{HDR}_{APN}, \tilde{B}^{HDR}_{APN})_i$ sont les coordonnées obtenues par calcul pour une luminance spectrique incidente $\lambda \mapsto L_e(\lambda)$, connaissant les transmittances spectrales de la caméra (F_R, F_V et F_B) et les luminances spectriques $(L_{e,i})_i$. Note : il est possible d'ajouter d'autres types d'observations, par exemple ajouter des filtres colorés devant l'objectif de la caméra.

Bien qu'il existe des méthodes n'utilisant que les valeurs RVB directement issues de la caméra (*e.g.* Deschaintre, 2019 ; Stiebel et al., 2018), la majorité des travaux s'appuie sur un enrichissement des données d'entrée via l'acquisition de triplets RVB additionnels obtenus au travers de différents filtres colorés positionnés devant l'objectif de la caméra (ou lorsque c'est possible, en modifiant la source éclairant la scène) (*e.g.* Brauers and Aach, 2006 ; Nieves et al., 2007 ; Parmar et al., 2012 ; Shrestha et al., 2011 ; Shrestha and Hardeberg, 2013, 2014 ; Wen et al., 2022b, 2022a). Les méthodes et outils de reconstruction spectrale seront détaillés dans la section 3.1.

Les travaux n'utilisant que les valeurs RVB directement issues de la caméra s'appuient sur des outils d'intelligence artificielle (e.g. réseaux de neurones par convolution qui considèrent un pixel non pas indépendamment, mais au sein d'une image, qui est porteuse d'un contexte pouvant réduire les ambiguïtés sur la reconstruction spectrale ; Shrestha et al., 2011). Ces approches nécessitent la création de base de données volumineuses afin d'entrainer les réseaux de neurones. Or, de telles bases de données relatives à des scènes urbaines nocturnes ne sont pas encore disponibles et nécessitent d'être construites, ce qui n'est pas la voie qui sera explorée dans ce travail.

Les travaux qui s'appuient sur la résolution de problème inverse en enrichissant les données d'entrées (*e.g.* Brauers and Aach, 2006 ; Nieves et al., 2007) sont en majorité des preuves de concept (*e.g.* Shrestha and Hardeberg, 2013) ou ont été mis en place sur des cas particuliers à une source et un type de matériaux (*e.g.* sources LEDs et reconstruction de luminances spectriques de peaux humaines - Parmar et al., 2012). Néanmoins, il n'existe pas de travaux qui ont étudié la performance de ces méthodes vis-à-vis de notre contexte d'étude.

1.4 Restitution de scènes urbaines nocturnes sur un dispositif d'affichage

Afin d'évaluer les scènes urbaines nocturnes via des environnements virtuels, il est nécessaire d'afficher (via des dispositifs d'affichage) les images qui ont été acquises sur site (voir Figure 1.19).

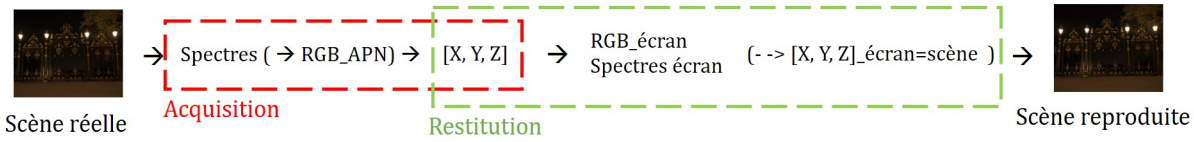


FIGURE 1.19 – Principe général d'acquisition via une caméra numérique et restitution via un dispositif d'affichage

Ainsi, les dispositifs d'affichage et leurs limites, lorsque l'on souhaite afficher une scène urbaine nocturne, sont décrits dans cette section (voir sous-section 1.4.1). Les outils permettant la restitution de scènes lumineuses sont ensuite évoqués : d'une part les étalonnages colorimétriques de ces dispositifs d'affichage 1.4.2, et d'autre part les algorithmes de mise en correspondance tonale (*Tone-Mapping Operator* ; TMO) en sous-section 1.4.3. Ces algorithmes proposent des approches pour répondre aux limitations techniques des dispositifs d'affichage vis-à-vis des scènes à afficher.

1.4.1 Définition des dispositifs d'affichage

Un dispositif d'affichage (e.g. vidéo-projecteur, écran LCD ou casque de réalité virtuelle) permet l'affichage d'une image sur un support. Dans le cas des écrans LCD, OLED et miniLED, les dispositifs d'affichages convertissent une consigne RVB en une luminance spectrique (voir Figure 1.20). La consigne numérique RVB est convertie en une consigne électrique (V_{elec}) qui permet ensuite d'alimenter un dispositif permettant de réguler les sources lumineuses blanche ou RVB (*e.g.* OLED, miniLED) ou le transfert d'énergie à travers un dispositif semi-occultant disposant de filtres colorés (*e.g.* LCD, miniLED) pour finalement afficher l'image sur un écran. L'ensemble des couleurs qu'il est possible d'afficher est caractérisé par les luminances spectriques maximales par canal coloré $\lambda \mapsto L_R(\lambda)$, $\lambda \mapsto L_V(\lambda)$ et $\lambda \mapsto L_B(\lambda)$, et définit le gamut :

$$GAMUT = \{[C] \equiv k_N(\alpha_R.[L_R] + \alpha_V.[L_V] + \alpha_B.[L_B]),\ (\alpha_R, \alpha_V, \alpha_B) \in \{0, 1, ..., 2^N - 1\}^3\} \quad (1.33)$$

où : N correspond au nombre de bits d'encodage du dispositif d'affichage, généralement valant 8 bits, 10 bits, 12 bits ou 16 bits ; k_N est une constante de normalisation qui vaut $\frac{1}{2^N-1}$.

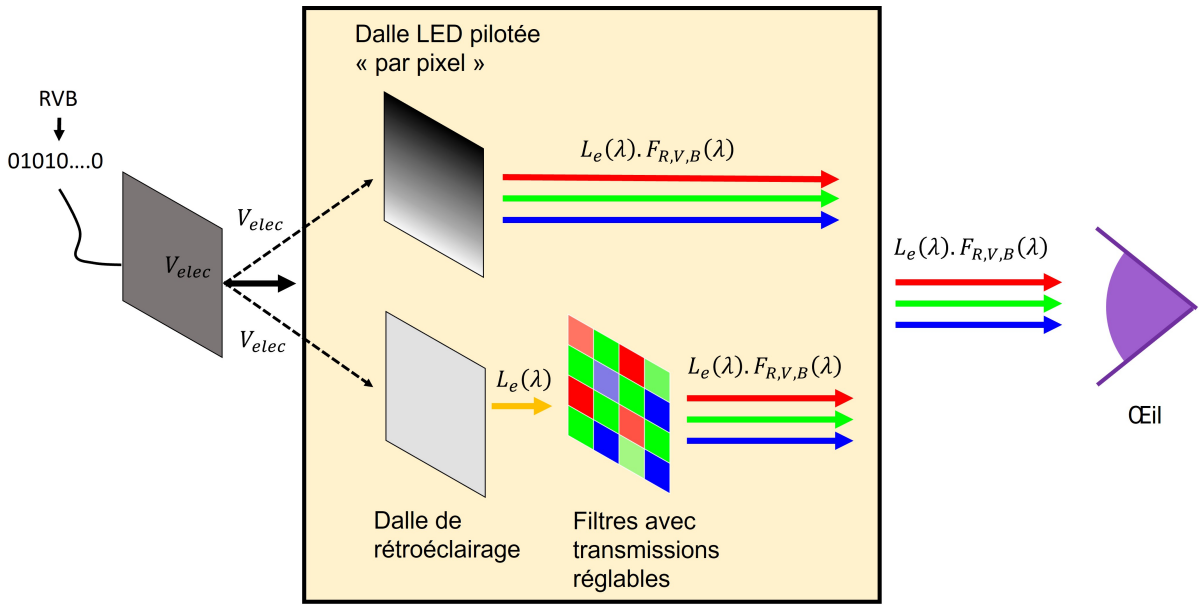


FIGURE 1.20 – Principe de fonctionnement d'un dispostif d'affichage type LCD, OLED ou miniLED

Bien qu'il existe diverses technologies permettant de bâtir un dispositif d'affichage, ils présentent des points communs tels que les espaces colorimétriques d'entrée et de sortie qui ont été unifiés grâce aux profils de l'ICC ITU-R (2015). L'unification de l'ICC permet notamment de garantir une bonne communication entre l'acquisition et la restitution d'une scène lumineuse en passant par un espace colorimétrique commun, généralement sRGB ou Adobe-RGB.

1.4.2 Etalonnage colorimétrique d'un dispositif d'affichage

Comme pour les caméras RVB, il est possible de réaliser l'étalonnage colorimétrique d'un dispositif d'affichage afin de passer par un espace colorimétrique de transition (*e.g.* l'espace CIE-XYZ 2°). Pour ce faire, des acquisitions colorimétriques pour différents niveaux de consignes RVB sont réalisées en mesurant directement ce qui est affiché.

Ensuite, une relation $\tilde{T} : (X, Y, Z) \mapsto \tilde{T}(X, Y, Z) = (\tilde{R}, \tilde{V}, \tilde{B})$ est déterminée, permettant ainsi d'identifier la consigne à fournir $(\tilde{R}, \tilde{V}, \tilde{B})$ pour une obtenir une valeur (X, Y, Z) donnée, qui est souvent égale à la valeur issue de l'étalonnage colorimétrique d'une caméra. Ainsi, il est possible dans un cas idéal de garantir l'acquisition et la restitution d'une couleur $[C]$ d'une scène lumineuse sur un dispositif d'affichage en renseignant la consigne $(\tilde{R}, \tilde{V}, \tilde{B})$ obtenue par :

$$(\tilde{R}, \tilde{V}, \tilde{B}) = \tilde{T}(T(R_{APN}, V_{APN}, B_{APN})) \tag{1.34}$$

où : T correspond à une transformation issue d'un étalonnage colorimétrique de l'appareil photographique numérique ; $(R_{APN}, V_{APN}, B_{APN})$ correspond aux coordonnées RVB de la couleur $[C]$ observées dans l'espace colorimétrique de la caméra ; $T(R_{APN}, V_{APN}, B_{APN}) = (X, Y, Z)$ correspond aux coordonnées XYZ de la couleur $[C]$ projetée dans l'espace colorimétrique CIE-XYZ (2°).

Pour afficher une scène urbaine nocturne, il est intéressant d'étudier les dispositifs d'affichage en fonction de leurs capacités à reproduire des conditions lumineuses similaires à la réalité. La sous-section 1.2.1 présente des caractéristiques portant sur les dynamiques de reproduction et les contrastes auxquels il faut être vigilant lors de la reproduction de scènes urbaines nocturnes. La Table 1.5 regroupe l'ensemble des comparaisons pour des dispositifs d'affichage couramment utilisés. Pour afficher des gammes de dynamiques élevées (pouvant atteindre 10^7 cd/m^2 dans la réalité), il est nécessaire de disposer d'une dalle lumineuse qui permet d'atteindre, ou a minima de se rapprocher du maximum. Les écrans standards présentent des pics lumineux de l'ordre de 100 cd/m^2, ce qui est grandement éloigné du maximum d'une scène réelle. Cependant, des écrans dit HDR (*High dynamic range*) ont été développés dans l'objectif de fournir une plus grande dynamique de luminance (de l'ordre de 1000 cd/m^2, encodés entre 10 et 16 bits par pixel) comparés aux écrans standards dit LDR (*Low dynamic range*) qui sont encodés sur 8 bits par pixel. En ce qui concerne les forts contrastes présents sur site, les écrans avec une technologie OLED (ou mini LED) présentent l'avantage de pouvoir éteindre localement une source lumineuse sur une portion de l'image, ce qui augmente grandement le contraste intra-image.

Technologie utilisée	LCD	OLED	miniLED	HDR
Dynamique de luminance	Faible	Modéré	Modéré	Bonne
Contraste lumineux	Faible	Bon	Bon	Bon
Espaces colorimétriques	sRGB ou Adobe-RGB	sRGB ou Adobe-RGB	sRGB ou Adobe-RGB	sRGB ou Adobe-RGB

TABLE 1.5 – Récapitulatif des différences entre les technologies des dispositifs d'affichage couramment utilisés

Dans une grande majorité de cas, il n'est pas possible de disposer de dalles lumineuses proposant à la fois des dynamiques de luminance et des contrastes lumineux identiques à ceux présents dans des scènes réelles. En effet, les scènes réelles présentent à la fois des contrastes marqués et des dynamiques de luminance plus élevées que celle des dispositifs d'affichage disponibles actuellement. Ainsi, des outils de compression de la dynamique des images RVB HDR issues du processus d'acquisition sont mis en place de façon à préserver des caractéristiques de la perception visuelle (*e.g.* Mikamo et al., 2014 ; Reinhard et al., 2002 ; Wanat and Mantiuk, 2014) sur les images affichées

sur le dispositif d'affichage. Il s'agit d'algorithme de mise en correspondance tonale (*tone-mapping operator - TMO*).

1.4.3 Algorithme de mise en correspondance tonale

Un algorithme de mise en correspondance tonale ($(R,V,B) \mapsto TMO(R,V,B) = R\tilde{V}B_{TMO}$) vise à modifier la consigne issue d'une image (généralement HDR) RVB de façon à préserver des caractéristiques de la perception visuelle d'une image malgré les limitations techniques du dispositif d'affichage. L'algorithme le plus naïf consiste à utiliser une transformation linéaire de façon à avoir :

$$\begin{cases} TMO(R,V,B) = R\tilde{V}B_{TMO} = (k.R, k.V, k.B) \\ k = \dfrac{2^N - 1}{argmax(RVB_{scene})} \end{cases} \tag{1.35}$$

où : $argmax(RVB_{scene})$ correspond à la valeur de la capture / consigne R, V ou B qui est la plus élevée que l'utilisateur souhaite reproduire.

On distingue les algorithmes de mise en correspondance tonale locaux et globaux. Pour les algorithmes qui utilisent un traitement global (*e.g.* Mikamo et al., 2014), un traitement uniforme est appliqué à l'ensemble des pixels de l'image. Les algorithmes locaux, quant à eux, prennent en compte les pixels voisins (e.g Reinhard et al., 2002 ; Wanat and Mantiuk, 2014).

Dans les algorithmes de mise en correspondance tonale les plus utilisés, Reinhard et al. (2002) sert de référence lors des comparaisons entre algorithmes de mise en correspondance tonale (*e.g.* Cerda-Company et al., 2018 ; Ledda et al., 2005 ; Yoshida et al., 2005).

L'algorithme de Reinhard et al. (2002) peut se décomposer en une partie globale et une partie locale (voir Annexe 7.3). La partie globale de l'algorithme de Reinhard et al. (2002) vise à modifier la carte de luminance de l'image de façon à fixer la valeur seuil au-delà de laquelle un pixel RVB de l'image devra apparaître blanc (paramètre libre L_{white}), et applique un facteur de mise à l'échelle (paramètre libre a, aussi appelé *key-value*). La partie locale de l'algorithme utilise une différence de flous gaussiens sur la carte de luminance en introduisant un paramètre libre d'accentuation des contrastes locaux ϕ. La Figure 1.21 regroupe plusieurs rendus obtenus en utilisant l'algorithme de Reinhard et al. (2002) en faisant varier les paramètres a, L_{white} et ϕ. Les paramètres libres sont généralement pris égaux aux paramètres recommandés dans Reinhard et al. (2002) soit $a = 0.18$, $L_{white} = L_{max}$ (maximum de luminance de la scène) et $\phi = 8$. En complément, l'étude de Reinhard (2002b) propose une méthode objective permettant de déterminer les paramètres a et L_{white}.

Des algorithmes de mise en correspondance tonale plus récents ont été proposés afin de prendre en compte la vision mésopique (*e.g.* Kirk and O'Brien, 2011 ; Mikamo et al., 2014 ; Rezagholizadeh, 2016 ; Wanat and Mantiuk, 2014). Ces algorithmes se décomposent en deux étapes. La première, à l'instar de Reinhard et al. (2002), vise à appliquer une compression sur les luminances. La seconde étape, quant à elle, applique un modèle d'apparence colorée prenant en compte la modification de la perception des couleurs en vision mésopique (*e.g.* Cao et al., 2008 ; Shin et al., 2004).

En particulier, l'algorithme de mise en correspondance tonale de Kirk and O'Brien (2011) introduit le modèle d'apparence colorée issu des travaux de Cao et al. (2008) pour prendre en compte la vision mésopique. En s'appuyant sur les travaux de Kirk and O'Brien (2011), de nombreux autres algorithmes prenant en compte la vision mésopique ont été proposés, que ce soit en intégrant le modèle de Cao et al. (2008) (*e.g.* Akhavan, 2017 ; Rezagholizadeh, 2016 ; Wanat and Mantiuk, 2014), le modèle de Shin et al. (2004) (*e.g.* Akhavan, 2017 ; Rezagholizadeh, 2016) ou d'autres modèles (*e.g.* Mikamo et al., 2014).



(a) Image initiale



(b) $a = 0.18$, $L_{white} = L_{max}$ et $\phi = 8$



(c) $a = 0.09$, $L_{white} = L_{max}$ et $\phi = 8$



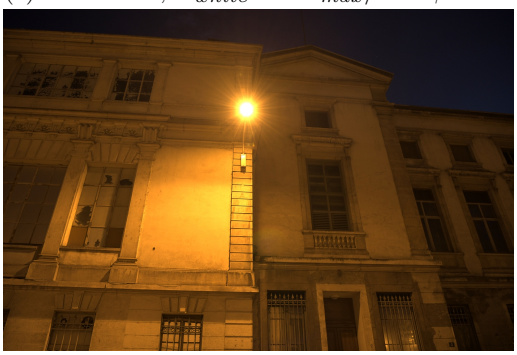
(d) $a = 0.36$, $L_{white} = L_{max}$ et $\phi = 8$



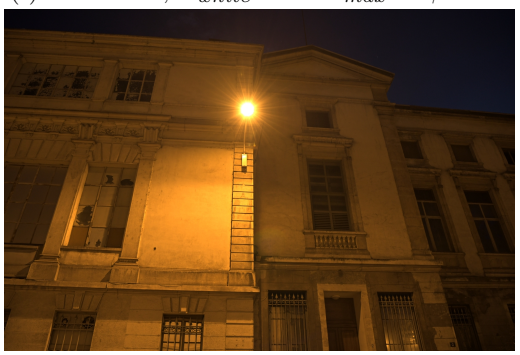
(e) $a = 0.18$, $L_{white} = L_{max}/2$ et $\phi = 8$



(f) $a = 0.18$, $L_{white} = 2.L_{max}$ et $\phi = 8$



(g) $a = 0.18$, $L_{white} = L_{max}$ et $\phi = 4$



(h) $a = 0.18$, $L_{white} = L_{max}$ et $\phi = 16$

FIGURE 1.21 – Illustration de l'algorithme de Reinhard et al. (2002)

Bien que certains de ces algorithmes aient été implantés dans des applications de restitution d'images obtenues à partir d'une caméra (*e.g.* Akhavan, 2017 ; Rezagholizadeh, 2016), à notre connaissance, aucun travail n'a encore démontré que l'utilisation d'un algorithme de mise en correspondance tonale intégrant la vision mésopique permet d'améliorer la restitution des informations selon les ressentis subjectifs. Les algorithmes de mise en correspondance tonale sont souvent comparés afin de déterminer lequel génère l'image qui semble la plus naturelle ou qui ressemble le plus à la réalité (*e.g.* Akhavan, 2017 ; Rezagholizadeh, 2016). Lors des comparaisons entre les algorithmes, les participants observent généralement les images dans une salle dans le noir (*e.g.* Wanat and Mantiuk, 2014). Cependant, des études mettent en avant que le fond lumineux devant lequel les images sont affichées introduit des variations dans la sélection des algorithmes par les participants (comparaisons par paires sur des critères de préférence) (*e.g.* Devlin et al., 2006 ; Mantiuk et al., 2008).

1.5 Évaluation et validation d'ambiances lumineuses en environnement virtuel

La section 1.5.1 décrit le principe de l'évaluation d'ambiances lumineuses en environnement virtuel tel que défini dans la thèse. La section 1.5.2 présente les conclusions des travaux menés pour valider le recueil d'évaluation subjective de la qualité d'ambiances lumineuses intérieures en environnement virtuel.

1.5.1 Évaluation d'ambiances lumineuses en environnement virtuel

Évaluer une ambiance lumineuse en environnement virtuel consiste à la présenter sous forme d'image ou vidéo sur un dispositif d'affichage. On le distingue dans cette thèse de la réalité virtuelle pour laquelle l'usager est en interaction en temps réel avec l'environnement virtuel (*e.g.* se déplacer dans la scène). Des reproductions de scènes réelles ou des simulations sont générées pour être affichées et évaluées sur un dispositif d'affichage, on parle alors de stimuli. Un stimulus peut être obtenu de plusieurs façons, suivant le dispositif d'affichage et les algorithmes d'acquisition et restitution (mise en correspondance tonale) ou les algorithmes de simulation de la scène (via des logiciels de modélisation tels que Unity ou Unreal Engine) employés (voir Figure 1.22).

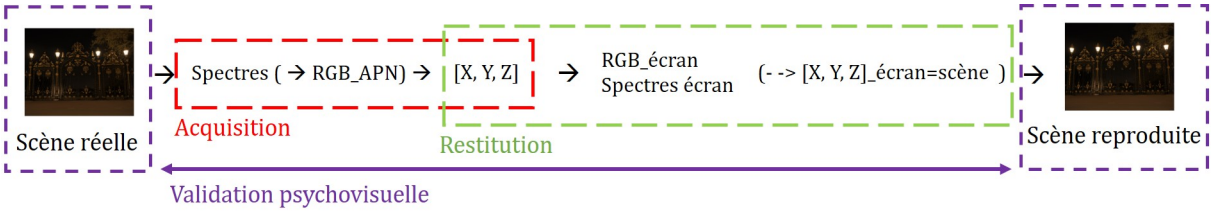


FIGURE 1.22 – Principe général d'acquisition via une caméra numérique et restitution via un dispositif d'affichage avec une validation psychovisuelle

Les études psychovisuelles en environnement virtuel se déroulent généralement dans un lieu différent de l'environnement réel (s'il est reproduit). Ces différences contextuelles peuvent être de nature météorologique (*e.g.* température différente entre la salle d'évaluation et sur site) ou sociale (*e.g.* contexte de laboratoire sans passant ni bruit ambiant). La Figure 1.23 illustre les différences qu'il y a entre l'évaluation d'une ambiance lumineuse en environnements réel et virtuel.

Lors de la création de stimuli provenant d'une scène réelle, il y a plusieurs choix qui s'ouvrent à nous. En premier, il y a les méthodes d'acquisitions et restitutions, ainsi que le mode de restitution dynamique ou statique (*i.e.* vidéo ou photographie). En second, il y a le dispositif d'affichage (*e.g.* écran LDR ou HDR / LCD, OLED ou miniLED ; casque de réalité virtuelle). Finalement, il y a les conditions lumineuses ambiantes (*e.g.* évaluation dans le noir ou avec un fond lumineux uniforme). Chaque dispositif d'affichage présente des avantages et inconvénients pratiques et techniques, qui sont explicités dans la Table 1.6.

Dans l'objectif d'avoir un dispositif d'affichage qui permet une reproduction la plus fidèle du point de vue des caractéristiques physiques des scènes urbaines nocturnes, il est nécessaire de prendre en compte la gamme de reproduction des luminances, les contrastes reproductibles et la finesse de reproduction dans les niveaux lumineux sombres. Pour la reproduction des luminances, l'usage d'écran avec une technologie HDR est à privilégier. Pour les contrastes, l'usage d'écrans avec une technologie OLED ou miniLED ou un casque de réalité virtuelle avec technologie OLED garantit des niveaux de contrastes qui se rapprochent au mieux des contrastes qui sont observables dans la réalité. La quantification dans les niveaux lumineux sombres dépend d'une part du caractère HDR ou non du dispositif d'affichage et d'autre part de l'usage de technologie OLED ou miniLED. D'un point de vue colorimétrique (reproduction des couleurs), il est bon de noter que les gamuts colorés standards (*e.g.* espace sRGB et Adobe-RGB) sont généralement disponibles pour l'ensemble des types de dispositif d'affichage, seule la quantification du gamut change en fonction de l'usage ou non du mode HDR. Le mode HDR garantissant une plus grande finesse dans la restitution du gamut coloré. Ainsi, en combinant l'ensemble des critères, le meilleur (resp. le pire) dispositif d'affichage est un téléviseur OLED avec prise en charge d'un mode HDR (resp. téléviseur LCD sans prise en charge d'un mode HDR) pour la restitution physique de scènes urbaines nocturnes. D'un point de vue immersif, le casque de réalité virtuelle offre le champ visuel le plus large et la meilleure immersion.

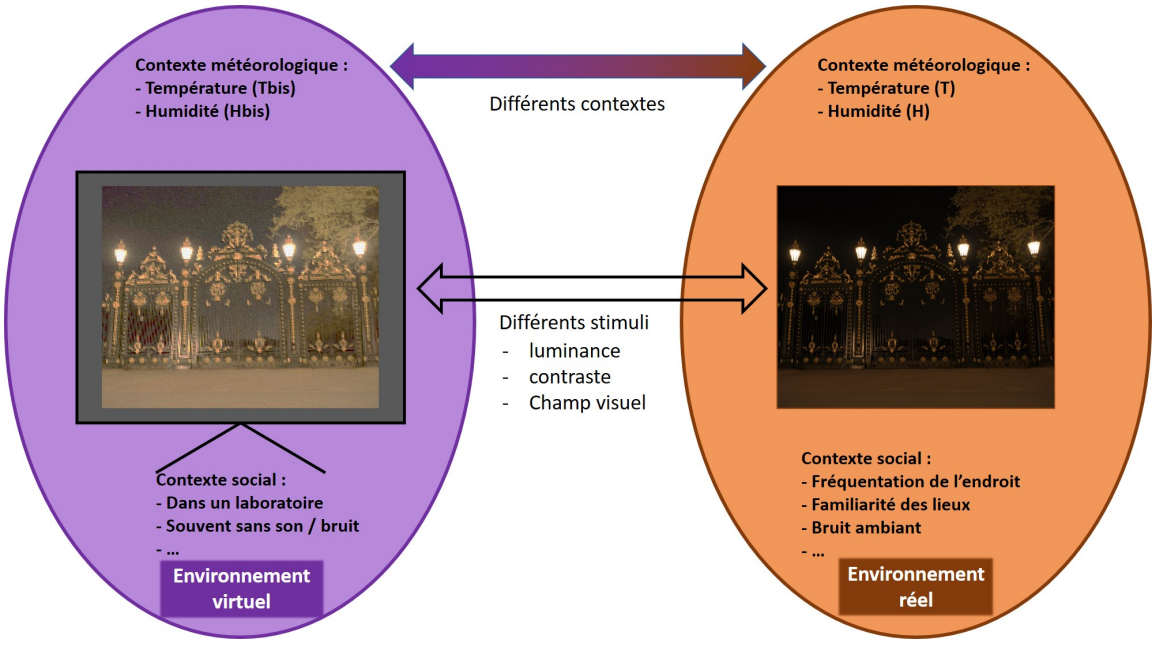


FIGURE 1.23 – Illustration des principales différences entre les évaluations d'ambiances lumineuses en environnement réel et virtuel

Dispositif d'affichage	Écran LCD	Écran OLED	Écran miniLED	Casque de réalité virtuelle
Reproduction physique (luminance et contraste)	LDR : Mauvaise HDR : Correct	LDR : Correct HDR : Excellente	LDR : Correct HDR : Excellente	Correct (suivant la technologie)
Résolution	Bonne	Bonne	Bonne	Mauvaise
Immersion	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Bonne

TABLE 1.6 – Récapitulatif des différences entres les technologies de dispositif d'affichage couramment utilisées

1.5.2 Validation de l'utilisation d'environnement virtuel pour l'évaluation d'ambiances lumineuses

Afin de réaliser des comparaisons entre les évaluations issues de l'environnement virtuel avec celles issues de l'environnement réel à des fins de validation, il est nécessaire de réaliser l'acquisition des données dans les deux environnements. Les études ayant déjà réalisé des comparaisons et validations entre évaluations en environnements virtuel et réel sont détaillées dans cette section en fonction des critères de qualité de l'éclairage (voir sous-section 1.2.2.2) et des environnements virtuels utilisés. Les Tables 1.7 à 1.12 synthétisent l'état de l'art par critères de qualité de l'éclairage. L'Annexe 7.4 regroupe l'ensemble des conclusions de l'état de l'art.

Avant tout il est bon de noter qu'il n'y a que très peu de travaux qui traitent de la validation de l'utilisation d'environnement virtuel pour l'évaluation d'ambiances lumineuses dans le contexte de scènes urbaines nocturnes (*e.g.* Bishop and Rohrmann, 2003), la plupart des travaux sont réalisés pour des scènes d'éclairage intérieur diurne en éclairage naturel ou artificiel.

Dans les études visant à déterminer s'il est possible d'utiliser des évaluations en environnement virtuel à la place d'évaluation en environnement réel (sur site), différentes technologies sont étudiées. Il y a, d'une part, les modes de restitution qui sont « statiques / fixes », lorsque le participant observe une image fixe (*e.g.* Cauwerts, 2013 ; Chen et al., 2019 ; Higuera-Trujillo et al., 2017 ; Newsham et al., 2010). D'autre part, les modes de restitution « immersifs » dont l'environnement virtuel vise à reproduire au maximum des sentiments d'appartenance à l'environnement virtuel, favorisant l'immersion avec parfois une interaction limitée (e.g. image 360° dans un casque de RV ; technologie type QTVR - QuickTime VR d'Apple) avec le dispositif (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Atié, 2024 ; Cauwerts, 2013 ; Chamilothori et al., 2019 ; Chen et al., 2019 ; Higuera-Trujillo et al., 2017 ; Rockcastle et al., 2021) ou via des « vidéos » (*e.g.* Bishop and Rohrmann, 2003 ; Chen et al., 2019). Les technologies type QTVR affichent des images panoramiques sur des écrans standards afin d'être à mi-chemin entre un dispositif d'affichage standard et un casque de réalité virtuelle. En effet, ce genre de technologie (QTVR) permet d'avoir des informations à 360° en affichant une partie d'une image panoramique pour une consigne angulaire fournie par l'utilisateur. Couplés à ces modes de restitution, les stimuli peuvent être issus de photographies (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Cauwerts, 2013 ; Chen et al., 2019 ; Newsham et al., 2010 ; Rockcastle et al., 2021) ou de simulations numériques (*e.g.* Bishop and Rohrmann, 2003 ; Chamilothori et al., 2019 ; Higuera-Trujillo et al., 2017). Il est bon de noter que généralement lorsqu'un casque de réalité virtuelle est utilisé pour évaluer une scène réelle, une image à 360° est projetée sur une sphère ce qui permet de simuler à

moindre coût un environnement 3D. Enfin, dans la revue de littérature de Scorpio et al. (2023) les auteurs mettent en avant que l'usage de casque de réalité virtuelle a déjà été utilisé dans des études antérieures et via divers critères de qualité de l'éclairage, sans validation préalable.

Pour les scènes existantes, les stimuli peuvent être créés en utilisant diverses chaînes d'acquisition / restitution. En effet, il y a des travaux qui utilisent des protocoles d'acquisition via des images HDR étalonnées par des mesures physiques, généralement via une luminance de référence mesurée dans la scène réelle (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Atié et al., 2022 ; Chamilothori et al., 2019 ; Cauwerts, 2013) et d'autres optent pour des protocoles non reproductibles ou qui sont dépendants de la technologie d'acquisition employée (*e.g.* Chen et al., 2019). Il en est de même pour la restitution, certains travaux utilisent des algorithmes de mise en correspondance tonale, comme l'algorithme de PCOND disponible dans le logiciel Radiance (Ward, 2002) ou l'algorithme de Reinhard et al. (2002) (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Rockcastle et al., 2021), tandis que d'autres travaux utilisent des algorithmes « boîtes noires » intégrés dans des logiciels de smartphone (*e.g* Chen et al., 2019). Concernant le support physique, certains travaux utilisent des écrans LDR (*e.g.* Cauwerts, 2013) et HDR (*e.g.* Cauwerts, 2013 ; Newsham et al., 2010) ou des casques de réalité virtuelle (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Atié, 2024 ; Chamilothori et al., 2019 ; Rockcastle et al., 2021). Finalement, la littérature scientifique a validé l'usage de la chaîne d'acquisition / restitution : images HDR avec usage de l'algorithme de Reinhard et al. (2002) pour des écrans HDR, pour le recueil de jugements subjectifs portant sur la qualité de scènes diurnes, principalement d'intérieur.

Le fond lumineux ambiant, comme mis en évidence dans les travaux de Devlin et al. (2006) et Mantiuk et al. (2008), peut influencer les jugements subjectifs en environnement virtuel. Certains travaux affichent les stimuli en utilisant un fond lumineux ambiant uniforme (*e.g.* Newsham et al., 2010), d'autres se placent dans le noir quasi-complet (*e.g.* Wanat and Mantiuk, 2014), mais la majorité des travaux qui utilisent des environnements virtuels affiche les stimuli dans le noir.

Finalement, lors du recueil des évaluations subjectives, certains travaux utilisent un même panel, il s'agit d'un plan intra-sujets (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Newsham et al., 2010) tandis que d'autres comparent les évaluations recueillies auprès de deux panels différents, il s'agit d'un plan inter-sujets (*e.g.* Higuera-Trujillo et al., 2017 ; Rockcastle et al., 2021).

Pour le critère relatif à la perception de l'ambiance lumineuse, des études démontrent qu'il est possible d'affirmer que les évaluations issues de l'environnement virtuel sont identiques à celles en réel pour les items relatifs à la restitution des couleurs lorsque des images HDR sont compressées via l'algorithme de Reinhard et al. (2002) (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Cauwerts, 2013) ou utilisant d'autres algorithmes TMO (Drago et al., 2003 ; Mantiuk et al., 2008) dans un casque de réalité virtuelle (Atié et al., 2023). Au contraire Chen et al. (2019) dont la chaîne d'acquisition / restitution n'est pas contrôlée ne retrouvent pas ce résultat. En effet, les auteurs ont utilisé des images capturées à l'aide d'une caméra qui n'a, a priori, pas été étalonnée (caméra de téléphone portable). De plus, dans les travaux de Cauwerts (2013) l'usage de stimuli QTVR a été étudié. Il en ressort qu'aucune différence significative n'est observée entre les évaluations issues de l'environnement réel et celui virtuel.

En revanche, il n'y a pas de consensus pour l'évaluation de la luminosité perçue. En effet, des études affirment que les environnements virtuels garantissent une bonne reproduction des luminosités perçues lors de la restitution d'images HDR avec l'algorithme de Reinhard et al. (2002) (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Cauwerts, 2013), tandis que d'autres affirment le contraire (*e.g.* Newsham et al., 2010). De plus, dans l'étude de Rockcastle et al. (2021) (restitution d'images HDR en utilisant l'algorithme TMO PCOND) les auteurs trouvent des différences entre les évaluations réalisées sur site et celles réalisées en environnement virtuel (casque RV). En ce qui concerne les tâches relatives

aux performances visuelles, dans les travaux d'Abd-Alhamid et al. (2019) et de Rockcastle et al. (2021), il a été démontré que l'usage de casque de réalité virtuelle introduit des différences significatives entre les performances en environnement réel et virtuel. Ces différences sont généralement expliquées par la résolution limitée des appareils (en pixels par pouce), trop faible pour garantir un niveau de netteté des éléments présents dans la scène (*e.g.* lors de tâches de lecture).

De par leur construction, les écrans HDR semblent pouvoir restituer des sensations d'inconfort liées à l'éblouissement (pic de luminance plus élevé dans des dispositifs HDR que LDR), ce qui est confirmé dans les études de Newsham et al. (2010) et Cauwerts (2013). Il n'y a cependant pas de consensus sur l'usage des dispositifs LDR. En effet, certaines études démontrent que les dispositifs LDR ne garantissent pas une évaluation similaire d'inconfort dû à l'éblouissement (*e.g.* Chen et al., 2019 ; Rockcastle et al., 2021), tandis que d'autres affirment le contraire (*e.g.* Bishop and Rohrmann, 2003 ; Cauwerts, 2013 ; Stamps, 1990 ,2010). En particulier dans l'étude de Rockcastle et al. (2021), les auteurs n'ont trouvé des différences significatives entre les évaluations en environnement réel et virtuel (casque RV) que pour la scène avec des sources lumineuses faibles (plafonniers faiblement lumineux) ou ayant de forts contrastes (lampe de bureau allumée dans une salle sombre). Cependant, il est bon de noter que dans ces travaux les personnes constituant le panel de participants ayant évalué l'environnement réel n'étaient pas ou peu éblouis.

Pour l'évaluation des impressions subjectives, il semble qu'utiliser les environnements virtuels soit suffisant. En effet, les études de Bishop and Rohrmann (2003), Cauwerts (2013), Chamilothori et al. (2019), Rockcastle et al. (2021) et Stamps (e.g. 1990, 2010) s'accordent pour affirmer qu'il est possible d'utiliser un environnement virtuel afin d'évaluer le confort d'une ambiance lumineuse et l'impression subjective de l'espace évalué, à la place d'évaluations sur site.

Finalement, en ce qui concerne le sentiment de sécurité, il y n'a pas d'étude à notre connaissance qui traite de ce critère lors des validations de l'usage des environnements virtuels.

En synthèse, dans le contexte de scènes photopiques (principalement des bureaux), l'usage d'environnements virtuels a été validé pour les critères portant sur l'éblouissement d'inconfort pour les écrans HDR uniquement, le confort et l'impression subjective de l'espace éclairé (*e.g.* complexité, directivité des sources lumineuses - Atié et al., 2023 ; Cauwerts, 2013). A contrario, il n'y a pas de consensus sur les critères relatifs à la perception des ambiances lumineuses (luminosité, uniformité) et sur les tâches de performances visuelles (*e.g.* détection d'objet). En outre la littérature scientifique détaillée dans cette section ne permet pas d'affirmer qu'il est possible d'utiliser les environnements virtuels pour les items relatifs à l'éblouissement hors écrans HDR et le caractère clos des lieux (perception de l'espace). Finalement, il n'y a pas de travaux qui ont cherché à valider l'usage d'environnements virtuels pour le critère sentiment de sécurité, bien que certaines études sur des scènes urbaines nocturnes menées en environnement virtuel (*e.g.* Hao et al., 2022) aient été publiées. D'après les conclusions de la littérature (*e.g.* Cauwerts, 2013), l'immersion est à privilégier pour des critères de confort et d'impression de l'espace éclairé tandis que la fidélité physique est essentielle pour les critères de perception d'ambiance lumineuse.

Finalement, presque l'ensemble des études visant à déterminer s'il est possible d'évaluer la qualité des installations d'éclairage via l'usage d'environnements virtuels sont réalisées en utilisant des scènes photopiques. Cependant, dans le contexte de scènes urbaines nocturnes, l'usage de la vision mésopique peut introduire des changements sur les jugements subjectifs comparé à l'évaluation de scènes en conditions photopiques.

Une majorité de travaux qui mettent en place une chaîne d'acquisition / restitution contrôlée utilise l'algorithme de Reinhard et al. (2002) alors que dans le contexte de scènes nocturnes d'autres algorithmes prenant en compte la vision mésopique garantissent de meilleurs reproductions que des algorithmes photopiques sur des critères tels que la fidélité de reproduction.

Critère de qualité	**Perception de l'ambiance lumineuse**
Écran LDR	Cauwerts (2013) : Luminosité perçue ; Uniformité perçue ; Contraste perçu ; Température de couleur perçue Chen et al. (2019) : Luminosité perçue Newsham et al. (2010) lors de comparaisons avec un écran HDR : Luminosité perçue ; Uniformité perçue
Écran HDR	Cauwerts (2013) : Luminosité perçue ; Uniformité perçue Newsham et al. (2010) : Luminosité perçue ; Uniformité perçue
Casque RV - projection de photos (image à 360°)	Abd-Alhamid et al. (2019) : Luminosité perçue ; Uniformité perçue ; Température de couleur perçue ; Contraste perçu Chen et al. (2019) : Luminosité perçue Atié et al. (2023) : Contraste perçu
Casque RV - environnement simulé	
Type QTVR	Cauwerts (2013) : Luminosité perçue ; Uniformité perçue ; Contraste perçu ; Température de couleur perçue
Vidéo	Chen et al. (2019) : Luminosité perçue
Conclusion	Il n'y a pas de consensus dans la littérature. Il est possible d'utiliser les environnements virtuels pour le recueil des températures de couleurs perçues.

TABLE 1.7 – Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Perception de l'ambiance lumineuse ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure

Critère de qualité	**Performance visuelle**
Écran LDR	
Écran HDR	
Casque RV - projection de photos (image à 360°)	Abd-Alhamid et al. (2019) : Test de Stroop revisité Rockcastle et al. (2021) : Test de Landolt
Casque RV - environnement simulé	
Type QTVR	
Vidéo	
Conclusion	Les résultats dépendent de la tâche de performance visuelle et de l'écran utilisé (résolution, gamme de luminance et gamut coloré).

TABLE 1.8 – Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de performances visuelles. En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure

Critère de qualité	**Inconfort dû à l'éblouissement**
Écran LDR	Newsham et al. (2010)
Écran HDR	Cauwerts (2013) Newsham et al. (2010)
Casque RV - projection de photos (image à 360°)	Cauwerts (2013) Rockcastle et al. (2021) : pour une scène avec de forts contrastes ou une scène avec des niveaux lumineux sombres
Casque RV - environnement simulé	
Type QTVR	
Vidéo	
Conclusion	Avant tout, il est bon de noter que dans la majorité des stimuli, les participants n'ont pas (ou quasiment pas) ressentis de l'inconfort dû à l'éblouissement. Pour les écrans HDR, il n'y a pas de consensus mais cela semble fonctionner partiellement. Pour une scène à forts contrastes (sombre + LEDs éblouissantes) (resp. scène sombre), l'inconfort est jugé moindre (resp. supérieur) en environnement virtuel qu'en réel.

TABLE 1.9 – Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Inconfort dû à l'éblouissement ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure

Critère de qualité	Confort et satisfaction générale
Écran LDR	Cauwerts (2013) Chen et al. (2019) Newsham et al. (2010) lors de comparaisons avec un écran HDR Stamps (1990)
Écran HDR	Cauwerts (2013) Newsham et al. (2010)
Casque RV - projection de photos (image à 360°)	Abd-Alhamid et al. (2019) Chen et al. (2019) Rockcastle et al. (2021)
Casque RV - environnement simulé	Chamilothori et al. (2019)
Type QTVR	Cauwerts (2013)
Vidéo	Bishop and Rohrmann (2003) Chen et al. (2019) Stamps (2010)
Conclusion	Il est possible de recueillir les jugements subjectifs via l'usage d'environnement virtuel.

TABLE 1.10 – Synthèse de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Confort et satisfaction générale ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure

Critère de qualité	Sentiment de sécurité
Écran LDR	
Écran HDR	
Casque RV - projection de photos (image à 360°)	
Casque RV - environnement simulé	
Type QTVR	
Vidéo	
Conclusion	Il n'y a que peu de travaux, ce qui ne permet pas d'en tirer une conclusion sur l'usage d'environnement virtuel pour le recueil de jugements subjectifs.

TABLE 1.11 – Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Sentiment de sécurité ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure

Critère de qualité	Impression de l'espace éclairé
Écran LDR	Cauwerts (2013) Higuera-Trujillo et al. (2017) Stamps (1990)
Écran HDR	Cauwerts (2013)
Casque RV - projection de photos (image à 360°)	Abd-Alhamid et al. (2019) Atié (2024) Higuera-Trujillo et al. (2017)
Casque RV - environnement simulé	Chamilothori et al. (2019) Higuera-Trujillo et al. (2017)
Type QTVR	Cauwerts (2013)
Vidéo	Bishop and Rohrmann (2003) Stamps (2010)
Conclusion	Il est possible d'utiliser les environnements virtuels pour évaluer la complexité de la scène et la directivités des sources. Néanmoins, le caractère « enfermé » des lieux n'est pas retranscrit identiquement entre environnements réel et virtuel.

TABLE 1.12 – Synthèse des conclusions de l'état de l'art sur l'utilisation d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs sur le critère « Impression de l'espace éclairé ». En vert (resp. rouge) : validé (resp. invalidé) dans la littérature ; en noir : impossibilité de conclure

1.6 Conclusion de l'état de l'art

Les scènes urbaines nocturnes, en comparaison à la plupart des scènes diurnes / photopiques, font intervenir de forts contrastes avec des niveaux lumineux à la fois sombres (inférieurs à 3 cd/m^2) et élevés (supérieur à 10000 cd/m^2). Les niveaux lumineux sombres présents dans les scènes urbaines nocturnes peuvent être dans le domaine mésopique (inférieurs à 3 cd/m^2), voire dans certains cas dans le domaine scotopique (inférieurs à 0.01 cd/m^2). La vision mésopique utilise l'ensemble des cellules photoréceptrices de l'œil (cônes et bâtonnets), là où en vision photopique il n'y a que les cônes qui interviennent dans le système visuel. De ces différences de fonctionnement de l'œil, résultent des différences de perceptions colorées (*e.g.* l'effet Purkinje). Les contrastes élevés, en présence de sources très lumineuses, peuvent aussi induire de l'éblouissement. Ainsi, l'étude de scènes urbaines nocturnes introduit une multitude de verrous scientifiques qui leur sont propres.

L'acquisition de données photométriques et radiométriques de scènes urbaines nocturnes via une caméra RVB peut se faire de deux façons, via des étalonnages colorimétriques (voir section 1.3.2) ou via des reconstructions spectrales (voir section 1.3.3). Les étalonnages colorimétriques visent à faire correspondre des coordonnées colorimétriques (*e.g.* espace CIE-XYZ (2°) ou LMSR) avec les valeurs RVB issues d'une caméra. L'état de l'art dressé en section 1.3.2 met en avant que l'usage des étalonnages colorimétriques permet de fournir des estimations fidèles ($\Delta E^*_{00} < 5$) dans le cas de scènes diurnes et utilisant des espaces colorimétriques photopiques (*e.g.* CIE-XYZ (2°)). Néanmoins, plusieurs questions relatives au contexte d'étude (scènes urbaines nocturnes) restent en suspens : est-ce que les méthodes d'étalonnage colorimétrique sont adaptées à des scènes comportant une grande dynamique de luminance ? des niveaux mésopiques ? plusieurs illuminants et types de

matériaux ? ; est-il possible d'étendre ces méthodes en utilisant des espaces colorimétriques prenant en compte l'implication des bâtonnets dans le système visuel (*e.g.* espace LMSR) ?

Une autre façon d'acquérir des données colorimétriques consiste à passer par l'acquisition de données spectrales, pour ensuite en déduire des coordonnées colorimétriques (ou d'autres indicateurs). Pour ce faire, il est possible de réaliser des reconstructions spectrales qui, à partir des données RVB d'une caméra, visent à estimer l'ensemble des luminances spectriques incidentes au niveau de chaque pixel de la caméra. Généralement, ces méthodes s'appuient sur des techniques d'enrichissement des données RVB via la capture d'images au travers de plusieurs filtres colorés positionnés devant l'objectif de la caméra. L'état de l'art dressé en section 1.3.3 permet de mettre en avant qu'une majorité des travaux relève de la preuve de concept, ou n'ont été étudiés quantitativement que dans des cas particuliers (*e.g.* estimations de luminances spectriques de peaux). Ainsi, il est possible de soulever divers verrous scientifiques, qu'ils soient relatifs :

— au contexte d'étude (scènes urbaines nocturnes) : est-ce que les méthodes de reconstruction spectrale garantissent une fidélité suffisante lors de l'acquisition de scènes urbaines nocturnes ;
— à la robustesse au bruit des méthodes : est-ce que les reproductions obtenues à partir de données réelles comportant du bruit sont suffisamment fidèles ?
— au mode opératoire : combien de triplets RVB sont nécessaires afin d'obtenir des reproductions spectrales suffisamment fidèles ?

Ces verrous sont abordés dans la partie I de la thèse.

Le recueil de jugements subjectifs sur la qualité de l'éclairage en utilisant des environnements virtuels (*e.g.* écran), a déjà été étudié dans la littérature scientifique mais pour la majorité des cas, sur des scènes diurnes. L'état de l'art réalisé en section 1.5.2 met en avant que l'usage d'environnements virtuels pour le recueil de jugements subjectifs est dépendant à la fois de la chaîne d'acquisition / restitution et du critère de qualité de l'éclairage. Utiliser une chaîne d'acquisition / restitution avec des acquisitions HDR et l'algorithme de Reinhard et al. (2002) semble le plus adapté pour recueillir des jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage de scènes diurnes. En ce qui concerne le dispositif d'affichage à utiliser, deux tendances se dégagent de l'état de l'art, la première consiste à garantir une reproduction / restitution la plus fidèle possible d'un point de vue physique ce qui est bénéfique pour des critères plus bas niveau tels que la perception de l'ambiance lumineuse. La seconde tendance consiste à favoriser l'immersion du participant en utilisant des supports tels que des casques de réalité virtuelle, ce qui contribue à restituer une fidélité perceptive pour des critères plus haut niveau tels que le confort ou la satisfaction globale. Pour d'autres critères propres à la qualité de l'éclairage en environnement nocturne pour les piétons (voir section 1.2.2.2) tels que le sentiment de sécurité, aucune validation n'a encore été menée.

En complément au choix du dispositif d'affichage, les algorithmes de restitution utilisés dans la littérature scientifique, dans l'objectif d'obtenir le recueil de jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage en environnement virtuel, sont conçus pour afficher des scènes photopiques. Néanmoins, des algorithmes prenant en compte la vision mésopique ont été proposés dans la littérature scientifique (voir section 1.4), mais n'ont été validés que pour des critères relatifs au réalisme des scènes affichées. Ainsi, des interrogations existent concernant le recueil de jugements subjectifs de scènes urbaines nocturnes via des environnements virtuels pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage. Premièrement, est-il valide de réaliser de tels recueils de jugements subjectifs en environnements virtuels ? Si oui, quelles chaînes d'acquisition / restitution et quel dispositif d'affichage utiliser en fonction des critères de qualité de l'éclairage ? Quel degré de fidélité de reproduction physique est requise, selon le critère de qualité considéré ? Utiliser un algorithme prenant en compte la vision mésopique a-t-il un intérêt dans le recueil de jugements subjectifs pour évaluer la qualité des installations d'éclairage urbaines nocturnes ? Est-ce que les conclusions restent valides quelles que soient

les conditions lumineuses ambiantes dans lesquelles les stimuli sont présentés en environnement virtuel ? Ces verrous sont abordés dans la partie II de la thèse.

En résumé, dans la suite du manuscrit, nous cherchons à résoudre les verrous scientifiques suivants :

1. Quelles méthodes d'étalonnage colorimétrique utiliser pour des scènes composées d'un seul type de source lumineuse et présentant une grande gamme de dynamique, pouvant couvrir la vision mésopique ? (Partie I - Chapitre 2)
2. Quelles méthodes d'étalonnage colorimétrique utiliser pour des scènes comportant des sources lumineuses de caractéristiques spectrales différentes ? (Partie I - Chapitre 2)
3. Quelles méthodes utiliser pour effectuer des reconstructions spectrales de scènes urbaines nocturnes, et comment les configurer ? (Partie I - Chapitre 3)
4. Quelles méthodes utiliser pour le recueil de jugements subjectifs portant sur la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel ? (Partie II)

Première partie

Développement et validation de méthodes pour l'acquisition de données photométriques et radiométriques de scènes urbaines nocturnes

Compte tenu de notre contexte d'étude (scènes urbaines nocturnes), dans l'objectif de valider et mettre en place des méthodes facilement déployables, l'état de l'art a mis en évidence que réaliser des acquisitions via une caméra RVB peut s'avérer utile. En effet, les acquisitions RVB permettent de fournir :

— des données utiles pour estimer des données photométriques et radiométriques qui peuvent alimenter des modèles de perception visuelle (performance, gêne, confort, préférence) pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage des scènes urbaines nocturnes, via des indicateurs déjà existants (*e.g.* l'éblouissement via l'UGR) ;
— des images qui pourront, après traitement, être affichées dans des dispositifs d'affichage (*e.g.* téléviseur) permettant le recueil de jugements subjectifs des scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel (voir Partie II) ; ces derniers pourraient aussi être exploités dans le développement de nouveaux modèles de perception visuelle.

D'après l'état de l'art, l'usage d'images RVB permettant l'obtention de données photométriques et radiométriques peut s'appuyer sur deux outils. Le premier consiste à convertir l'image RVB en une image contenant des données colorimétriques ; il s'agit de l'étalonnage colorimétrique. Le second consiste à reconstruire les luminances spectriques incidentes à la caméra à partir d'observations RVB : il s'agit de la reconstruction spectrale. Ces deux outils font intervenir des protocoles d'acquisition différents, l'un nécessitant la connaissance de données colorimétriques de référence, le second de transmittances spectrales liées à l'appareil de prise de vue.

Considérant les limites de l'état de l'art et de notre contexte d'étude (scènes urbaines nocturnes) les objectifs suivants sont abordés dans cette partie :

1. Fournir une base de données (triplets RVB et données colorimétriques associées) comprenant des niveaux lumineux photopiques et mésopiques ;
2. Fournir une base de données synthétiques (triplets RVB et luminances spectriques associées) comprenant des niveaux lumineux photopiques et mésopiques ;
3. Étudier les outils d'étalonnage colorimétrique pour des scènes présentant des caractéristiques urbaines nocturnes (grande dynamique de luminance, niveaux lumineux photopiques et mésopiques, et comportant plusieurs types de sources lumineuses) ;
4. Étudier les outils de reconstruction spectrale pour des scènes présentant des caractéristiques urbaines nocturnes.

Le chapitre 2 vise à présenter et exploiter une base de données (triplets RVB et données colorimétriques associées) constituée de triplets RVB et de leurs coordonnées colorimétriques associées dans les espaces CIE-XYZ (2°) et/ou LMSR. Les outils d'étalonnage colorimétrique proposés dans l'état de l'art sont évalués dans le contexte de scènes urbaines nocturnes (voir section 2.3). De plus, nous proposons d'étendre ces outils afin de permettre des étalonnages colorimétriques entre les espaces RVB de la caméra (3D) et l'espace LMSR (4D). Ces outils étendus (étalonnages 3D vers 4D) sont comparés avec ceux de l'état de l'art (étalonnages 3D vers 3D) dans le contexte de scènes caractérisées par une dynamique de luminance pouvant atteindre 1200 cd/m^2, et présentant à la fois des niveaux lumineux photopiques et mésopiques (voir section 2.3). Enfin, à titre exploratoire, nous proposons une méthode d'acquisition s'appuyant sur deux triplets RVB (l'un acquis nativement par la caméra et le second obtenu via une prise de vue au travers d'un filtre coloré) que l'on compare avec les méthodes de l'état de l'art dans le contexte de scènes présentant plusieurs sources lumineuses (voir section 2.4).

Le chapitre 3 vise à présenter et exploiter une base de données (triplets RVB et luminances spectriques associées) constituée de plusieurs triplets RVB (obtenus à travers plusieurs filtres colorés) et de transmittances spectrales de filtres et des pixels RVB de la caméra. Grâce à cette base de données, les outils de reconstruction spectrale proposés dans l'état de l'art pourront être évalués dans le contexte de scènes urbaines nocturnes (voir section 1.2.1).

Chapitre 2

Étude des outils d'étalonnage colorimétrique

L'état de l'art met en avant que les outils permettant d'obtenir des données photométriques à partir d'observations d'une caméra RVB ont été proposés et évalués dans des contextes lumineux diurnes. Les scènes pour lesquelles sont étalonnées les caméras RVB comportent souvent un seul type de source (*e.g.* illuminant D65) qui induit des niveaux lumineux photopiques. Or, les scènes urbaines nocturnes peuvent comporter divers types de sources lumineuses, de caractéristiques spectrales différentes, pouvant induire des dynamiques de luminance élevées ; de plus, des zones sombres peuvent introduire des niveaux mésopiques. Par ailleurs, la capture de scènes urbaines nocturnes via des caméras RVB soulève des questions relatives aux protocoles d'acquisition. En effet les données RVB issues d'une scènes urbaines nocturnes peuvent comporter du bruit (principalement numérique) qui, lui-même, peut entraîner un impact négatif sur les méthodes d'étalonnage colorimétrique.

Ainsi, dans le contexte des scènes urbaines nocturnes, il est nécessaire de valider les outils d'étalonnage colorimétrique dans les domaines photopique et mésopique pour des scènes présentant une grande dynamique de luminance.

Après avoir explicité les objectifs, la démarche scientifique et les hypothèses testées (voir section 2.1) nous présentons une analyse préliminaire qui vise à améliorer le protocole d'acquisition de données nécessaire aux outils d'étalonnage colorimétrique (voir section 2.2). Dans la section 2.3, les outils de l'état de l'art sont adaptés de façon à ce qu'ils puissent prendre en compte l'activité des bâtonnets dans le système visuel, puis sont évalués dans le contexte de scènes urbaines nocturnes ne comportant qu'un unique type de source lumineuse. Enfin, dans la section 2.4, il s'agit de pouvoir s'appuyer sur deux triplets RVB (l'un acquis nativement par la caméra et le second obtenu via une prise de vue au travers d'un filtre coloré) ; les méthodes proposées sont évaluées dans le contexte de scènes urbaines nocturnes comportant plusieurs types de sources lumineuses. Explorer l'exploitation de plusieurs triplets RVB pour l'étalonnage colorimétrique, dans le cadre de scènes urbaines nocturnes comportant des sources de lumière présentant des caractéristiques spectrales différentes, est en effet apparu comme une piste pertinente dans le cadre de cette thèse.

2.1 Objectifs, démarche scientifique et hypothèses

2.1.1 État de l'art

Cette section vise à expliciter le fonctionnement des méthodes d'étalonnage colorimétrique proposés dans la littérature. Pour des raisons de clarté, nous avons uniformisé le texte et les équations pour décrire un étalonnage colorimétrique de l'espace RVB caméra vers CIE-XYZ (2°) (étalonnage 3D vers 3D) mais ce choix n'implique pas de perte de généralité : l'opération inverse peut également être réalisée (étalonnage colorimétrique CIE-XYZ (2°) vers RVB caméra), et il est également possible d'utiliser d'autres espaces colorimétriques (*e.g.* CIE-RGB).

Deux types de méthodes permettent de réaliser des étalonnages colorimétriques : les méthodes globales et les méthodes locales. Les premières consistent à définir un unique modèle général (M) permettant d'estimer un triplet CIE-XYZ (2°) à partir d'un point quelconque dans l'espace de définition RVB qui, dans le cas idéal, permettrait d'obtenir M(R,V,B) = (X,Y,Z). Les seconds modèles sont locaux et s'appliquent à différents sous-espaces de l'espace RVB de définition. Par exemple, il est possible de considérer deux nuages de points, l'un dans l'espace RVB, et l'autre dans l'espace CIE-XYZ (2°), et d'associer un sous-ensemble de points de l'espace RVB au sous-ensemble de points correspondant de l'espace CIE-XYZ ; différents modèles (M_l) sont alors définis en s'appuyant sur ces sous-ensembles.

2.1.1.1 Étalonnage colorimétrique - méthodes globales

Dans l'objectif d'étalonner un scanner, Gordon and Holub (1993) ont choisi d'utiliser une méthode globale qui permet d'estimer un triplet (X, Y, Z) (espace CIE-XYZ (2°)) connaissant un triplet (R, V, B) (espace colorimétrique du scanner). Généralement, le problème est présenté sous sa forme matricielle qui vise à déterminer une matrice M (de dimension 3 par 3) telle que :

$$[X, Y, Z] = M * [R, V, B] \tag{2.1}$$

Cependant, dans la majorité des cas la matrice M ne peut pas garantir l'égalité et l'équation (2.1) est reformulée en un problème du type :

$$\begin{cases} min\{\sum_{k=1}^{N} E(XYZ_r(k), XYZ_c(k))\} \\ XYZ_c(k) = M * RVB_c(k) \end{cases} \tag{2.2}$$

où : M est une matrice 3x3 ; $RVB_c(k)$ est un vecteur 3x1 dans l'espace colorimétrique RVB ; $XYZ_r(k)$ (resp. $XYZ_c(k)$) est le triplet de référence (resp. calculé par le modèle d'étalonnage) qui est associé au vecteur $RVB_c(k)$; $E(.,.)$ est une erreur, par exemple l'erreur quadratique moyenne (MSE).

Lorsque l'erreur quadratique moyenne est utilisée pour résoudre le système (2.2) on parle d'étalonnage colorimétrique par SVD (*Sigular Value Decomposition* - Décomposition en valeurs singulières). La norme ISO17321-2 (2012) recommande d'utiliser un modèle qui prend en compte une correction dans les niveaux sombres ainsi qu'un facteur qui vise à corriger le flare du système optique (diffusion parasite de la lumière dans le système optique), ce qui peut être réalisé en modifiant le système matriciel défini en équation (2.1) par :

$$[X, Y, Z] = M * [R, V, B, 1] \tag{2.3}$$

Lorsque le problème défini en équation (2.2) est résolu en utilisant la métrique MSE et l'estimation des triplets $XYZ_c(k)$ telle que définie en équation (2.3), alors l'étalonnage colorimétrique est noté pour la suite du manuscrit *SVD+*.

En s'appuyant sur l'hypothèse selon laquelle un modèle global non-linéaire peut être identifié entre les espaces colorimétriques RVB de la caméra et CIE-XYZ (2°), Haneishi et al. (1995) ont proposé d'introduire des termes polynomiaux, tel que R^2 ou des termes croisés du type RxV. Par exemple, les auteurs ont proposé d'utiliser le vecteur $\rho(R, V, B) = [R, V, B, R.V, V^2, 1]$ dans l'optimisation du système suivant :

$$\begin{cases} min\{\sum_{k=1}^{N} E(XYZ_r(k), XYZ_c(k))\} \\ XYZ_c(k) = M * \rho(R_c(k), V_c(k), B_c(k)) \end{cases} \tag{2.4}$$

où : M est une matrice 3xn ; $\rho(R_c(k), V_c(k), B_c(k))$ est un vecteur nx1.

Haneishi et al. (1995) ont conclu que la méthode utilisant des paramètres du second degré (*e.g.* R^2, R.V) aboutit à une différence colorimétrique (ΔE^*_{ab}) plus faible entre les estimations $(XYZ_c(k))_k$ et les valeurs de références $(XYZ_r(k))_k$ que lorsque le modèle s'appuie exclusivement sur des paramètres du premier ordre (ΔE^*_{ab} de 2.0 pour le second ordre contre 4.9 pour le premier ordre). Les travaux de Haneishi et al. (1995) s'appliquent à l'étalonnage d'une imprimante et il faut prendre des précautions quant à l'utilisation de ces méthodes dans un contexte d'extrapolation des données. Dans la continuité des travaux de Haneishi et al. (1995), Hong et al. (2011) ont proposé d'introduire un paramètre du troisième ordre R.V.B. Les auteurs ont observé qu'introduire les paramètres « 1 » et R.V.B réduit considérablement les différences colorimétriques comparées à une SVD (ΔE^*_{ab} de 1.07 contre 2.48).

Finalement, Varghese et al. (2014) ont optimisé le problème (2.4) en utilisant une erreur ($E(.,.)$) définie par :

$$E = \sum_{k=1}^{N} \Delta E^*_{00}(XYZ_r(k), XYZ_c(k)) + \lambda.(\frac{log(Y_r(k))}{log(Y_c(k))})^2, \qquad \lambda = 0.001 \tag{2.5}$$

Le second terme de l'équation (2.5) est décrit dans les travaux de Varghese et al. (2014) comme un paramètre de contrôle qui permet de passer d'une luminance relative fournie par l'utilisation du ΔE^*_{00} vers une luminance absolue. Après avoir obtenu une solution du système (2.4) en utilisant deux vecteurs ($\rho(R,V,B) = [R,V,B]$ et $\rho(R,V,B) = [R,V,B,1]$), les auteurs ont conclu qu'introduire le paramètre de correction « 1 » n'améliore pas les résultats. En effet, la différence colorimétrique ΔE^*_{ab} est de 2.9 sans utiliser le paramètre « 1 » contre 3.2 en l'utilisant.

2.1.1.2 Étalonnage colorimétrique - méthodes locales

Dans la littérature, les méthodes locales sont fondées sur les partitionnements simultanés des espaces d'entrée et de sortie (*e.g.* en utilisant un découpage régulier), où un triplet dans l'espace d'entrée est associé à un triplet dans l'espace de sortie. Connaissant les deux structures (entrée et sortie), un interpolateur (T) est choisi ou construit afin de garantir la transformation d'un point de l'espace d'entrée en un point de l'espace de sortie. Généralement, l'interpolateur passe par les points de référence :

$$\forall k \in \{1, ..., N\}, T(RVB_r(k)) = XYZ_r(k) \tag{2.6}$$

où : le triplet d'entrée provenant de l'espace caméra $RVB_r(k)$ est associé au triplet de sortie dans l'espace CIE-XYZ (2°) $XYZ_r(k)$.

Dans la majorité des cas, les outils d'étalonnage colorimétrique locaux visent à déterminer une pondération dans la structure de référence $(RVB_r(k), XYZ_r(k))_k$ du point à étalonner $RVBq$, ce qui se traduit par :

$$\begin{cases} Xq = f_X(Rq) + g_X(Vq) + h_X(Bq) \\ Yq = f_Y(Rq) + g_Y(Vq) + h_Y(Bq) \\ Zq = f_Z(Rq) + g_Z(Vq) + h_Z(Bq) \end{cases} \tag{2.7}$$

où : XYZq = [Xq, Yq, Zq] correspond au triplet fourni par l'étalonnage colorimétrique du triplet RVBq = [Rq, Vq, Bq] ; les fonctions $f_{X/Y/Z}$, $g_{X/Y/Z}$ et $h_{X/Y/Z}$ sont définies à partir de la structure de référence $(RVB(k))_{k\in\{1,..,N\}}$ et dont l'image de Rq/Vq/Bq par l'une des fonctions f/g/h dépend de la position du triplet RVBq = [Rq, Vq, Bq] par rapport à la structure de référence.

Un interpolateur largement utilisé est l'interpolateur tri-linéaire fondé sur les coordonnées barycentriques. Il peut se définir comme :

$$\begin{cases} RVBq = \sum_{k=1}^{N} \alpha(k).RVB(k) \\ XYZq = \sum_{k=1}^{N} \alpha(k).XYZ(k) \\ \sum_{k=1}^{N} \alpha(k) = 1 \end{cases} \tag{2.8}$$

où : $XYZq$ correspond au triplet fourni par l'étalonnage colorimétrique ; pour $k \in \{1, .., N\}$ $\alpha(k)$ correspond à une pondération du point $RVBq$ par rapport aux points de référence $(RVB(k))_k$ fournis par l'interpolation barycentrique.

Dans les travaux de Hung (1993), une imprimante est étalonnée (espace RVB vers CMY / CMYK) via une structure régulière 33x33x33 correspondant à un découpage selon 32 intervalles égaux par dimension (R, V et B) – n intervalles consécutifs nécessitant $n + 1$ bornes ; pour un triplet RVB les auteurs considèrent le cube élémentaire qui le contient, et réalisent une interpolation tri-linaire. Hung (1993) ont obtenu dans le pire des scénarios une différence colorimétrique ΔE^*_{uv} (métrique associée à l'espace colorimétrique CIE-L*u*v*) de 0.5. Un autre découpage de l'espace est proposé dans les travaux de Genetten (1993), où cette fois-ci chaque cube de la structure initiale est découpé en plusieurs tétraèdres élémentaires. Ashraf et al. (2024) ont utilisé une méthode d'étalonnage par interpolation linéaire pour un écran OLED et ont obtenu une différence colorimétrique ΔE^*_{00} de 3.18.

Une autre façon de réaliser des étalonnages colorimétriques consiste à utiliser un interpolateur non-linéaire. Menesatti et al. (2012) ont étudié l'usage d'interpolateur par spline (*3D thin-plate spline*) qui provient des travaux de Bookstein (1989). L'interpolateur par spline utilisé dans les travaux de Menesatti et al. (2012) « déforme localement » les distances en utilisant la relation suivante :

$$\begin{cases} d(r_{12}) = 2.(r_{12})^2.log(r_{12} + \epsilon) \\ r_{12} = \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + (V_1 - V_2)^2 + (B_1 - B_2)^2} \end{cases} \tag{2.9}$$

où : R_1 / V_1 / B_1 (resp. R_2 / V_2 / B_2) correspondent aux coordonnées R, V et B de l'espace colorimétrique RVB associé à un point noté « 1 » (resp. « 2 ») ; ϵ est une valeur très petite pour éviter d'obtenir un logarithme infini.

L'expression donnant l'étalonnage colorimétrique est fourni par :

$$\begin{cases} Xq = \alpha_X.Rq + \beta_X.Vq + \gamma_X.Bq + \sum_k \delta_{X,k}.d(r_{qk}) \\ Yq = \alpha_Y.Rq + \beta_Y.Vq + \gamma_Y.Bq + \sum_k \delta_{Y,k}.d(r_{qk}) \\ Zq = \alpha_Z.Rq + \beta_Z.Vq + \gamma_Z.Bq + \sum_k \delta_{Z,k}.d(r_{qk}) \end{cases} \tag{2.10}$$

où : XYZq = [Xq, Yq, Zq] correspond au résultat de l'étalonnage colorimétrique ; $d(r_{qk})$ correspond à la relation décrite en équation 2.9 entre le triplet à étalonner noté « q » et le triplet de référence

noté « k » (k ∈ 1,...,N) ; les coefficients $\alpha_{X/Y/Z}$, $\beta_{X/Y/Z}$, $\gamma_{X/Y/Z}$ et $\delta_{X/Y/Z,k}$ sont déterminés à l'avance à partir de la structure de référence.

Dans les travaux de Menesatti et al. (2012), les auteurs obtiennent une erreur quadratique moyenne de 10.39 en utilisant l'interpolateur par spline contre 16.01 en utilisant la méthode par SVD.

2.1.1.3 Étalonnage colorimétrique - plusieurs sources

À notre connaissance, les outils d'étalonnage colorimétrique ne sont pas exploités pour réaliser des étalonnages colorimétriques à partir de plusieurs triplets RVB (un triplet RVB obtenu avec la caméra native et plusieurs triplets RVB avec des filtres colorés placés devant l'objectif de la caméra). En effet, l'état de l'art à mis en avant que ce sont des outils de reconstruction spectrale qui exploitent plusieurs triplets RVB pour estimer des luminances spectriques (voir chapitre 3).

2.1.2 Objectifs

Compte tenu des objectifs de la thèse et des verrous scientifiques identifiés dans l'état de l'art, les objectifs de ce chapitre sont :

1. proposer et valider des extensions aux méthodes « 3D vers 3D » (*e.g.* espace RVB caméra vers CIE-XYZ (2°)) pour permettre des étalonnages colorimétriques « 3D vers 4D » (*e.g.* espace RVB caméra vers espace LMSR) ;
2. étudier le protocole d'acquisition du jeu de données de référence afin d'améliorer la précision des outils d'étalonnage colorimétrique pour des scènes comportant des niveaux lumineux photopiques sous un type de source lumineuse ;
3. étudier la possibilité d'utiliser des données synthétiques (obtenues par calcul) à la place de données réels (provenant de captures / mesures physiques) pour l'évaluation des outils d'étalonnage colorimétrique et pour des scènes comportant des niveaux lumineux photopiques sous un type de source lumineuse ;
4. quantifier en interpolation et extrapolation la précision des estimations colorimétriques (métrique ΔE_{00} prenant en compte la vision mésopique) dans le cas de scènes comportant des niveaux lumineux photopiques et mésopiques, sous un type de source lumineuse ;
5. proposer et valider des extensions aux méthodes « 3D vers 3D » permettre des étalonnages colorimétriques « 6D vers 3D » de la caméra (*e.g.* espace (RVB_1, RVB_2) correspondants à des observations natives et avec un filtre coloré) dans le cas de scènes photopiques comportant plusieurs sources lumineuses présentant des caractéristiques spectrales différentes.

2.1.3 Démarches et hypothèses

Deux démarches sont mises en place dans ce chapitre. La première est utilisée dans les sections 2.2 et 2.3, consiste à définir un modèle d'étalonnage colorimétrique à partir de points colorimétriques de référence qui proviennent d'une première mire colorimétrique, qui est testé à l'aide d'autres points colorimétriques provenant d'une seconde mire colorimétrique, différente de la première. Cette démarche permet de déterminer si à partir d'étalonnage provenant d'une mire de référence, il est possible de réaliser un étalonnage d'autres couleurs qui seraient présents dans la scène. La seconde

démarche utilisée dans la section 2.4 consiste à utiliser des points de référence et test provenant d'un même type de matériau. Cette démarche permet d'évaluer une méthode d'étalonnage dans le cas où les points colorés d'une unique mire sont répartis en un sous-ensemble utilisé pour la définition du modèle, et le sous-ensemble complémentaire utilisé pour son test. Ce cas est *a priori* à la fois plus favorable et moins représentatif que le premier, dans la mesure où au sein d'une mire colorimétrique donnée, les couleurs sont susceptibles d'être obtenues par combinaison linéaire de primaires, ce qui pourrait conférer une forme de ressemblance entre les couleurs de test et les couleurs utilisées pour la définition du modèle.

De plus, pour l'ensemble des expériences mises en place dans ce chapitre, plusieurs méthodes d'étalonnage colorimétrique sont utilisées pour évaluation. Ces méthodes sont donc comparées entre elles en utilisant les mêmes conditions pour la création des modèles d'étalonnage colorimétrique (mêmes points de référence) et lors des estimations (mêmes points de test).

Dans le cas de scènes éclairées par une unique source lumineuse, il est possible de formuler les hypothèses suivantes :

(H1) plus les points de référence sont proches les uns des autres, plus les méthodes d'étalonnage colorimétrique assurent une réduction des différences colorimétriques en interpolation et en extrapolation ;

(H2) réaliser un jeu de données de référence à partir d'un même échantillon de points de références éclairés à deux niveaux lumineux est bénéfique (métrique ΔE^*_{00}) dans les domaines de l'interpolation et l'extrapolation ;

(H3) puisque la majorité des outils d'étalonnage colorimétrique est fondée sur la linéarité des données RVB de la caméra, utiliser des données synthétiques pour l'évaluation fournit des résultats similaires à ceux produits lorsque des données provenant de photographies réelles sont utilisées ;

(H4) l'utilisation de l'espace LMSR (avec adaptation des outils d'étalonnage pour permettre des étalonnages de 3D vers 4D) permet de garantir de meilleurs résultats que lorsque l'on utilise l'espace CIE-XYZ (2°) ;

(H5) dans le domaine de l'interpolation, les méthodes locales (interpolation tri-linéaire ou spline) sont plus performantes que la méthode par SVD ;

(H6) l'usage de données colorimétriques acquises dans un domaine de vision (photopique ou mésopique) ne détériore pas les estimations dans l'autre domaine.

Dans le cas de scènes éclairées par plusieurs sources lumineuses présentant des caractéristiques spectrales différentes, il est possible de formuler l'hypothèse suivante :

(H7) l'utilisation de données RVB provenant de deux observations distinctes (triplets RVB observés sans et au travers un filtre coloré) permet d'améliorer les résultats d'étalonnage.

2.2 Étude sur l'amélioration des protocoles d'acquisition pour les outils d'étalonnage colorimétrique - environnements photopiques

Lors de la réalisation de l'étude portant sur l'amélioration des protocoles d'acquisition pour les outils d'étalonnage colorimétrique nous décidons de nous placer dans le domaine photopique (luminances supérieures à 3 cd/m^2). Dans ce cadre, les étalonnages colorimétriques sont réalisés

entre les espaces RVB de la caméra et l'espace CIE-XYZ (2°), ce qui permet d'utiliser les outils proposés dans l'état de l'art sans modification.

2.2.1 Matériels et méthodes

2.2.1.1 Acquisition du jeu de données

Pour l'acquisition du jeu de données exploité dans cette section, le matériel suivant a été utilisé : un spectroradiomètre JETI Specbos 1211UV-2, un appareil photographique Nikon D850 équipé avec un objectif Zeiss comportant une lentille de focale 18 mm (F/2.8), un projecteur comportant plusieurs types de LED (modèle ETC SourceFourLED de la marque Lustr+), un matériau de type Spectralon et trois palettes de patchs colorés.

Quatre sources LED ont été sélectionnées afin d'obtenir une variété de sources blanches ayant des températures de couleur froide, neutre et chaudes. Les distributions spectrales de chaque source sont représentées en Figure 2.1. Chaque source lumineuse est pilotée de façon à fournir un niveau énergétique parmi 11 (voir Table 2.1).

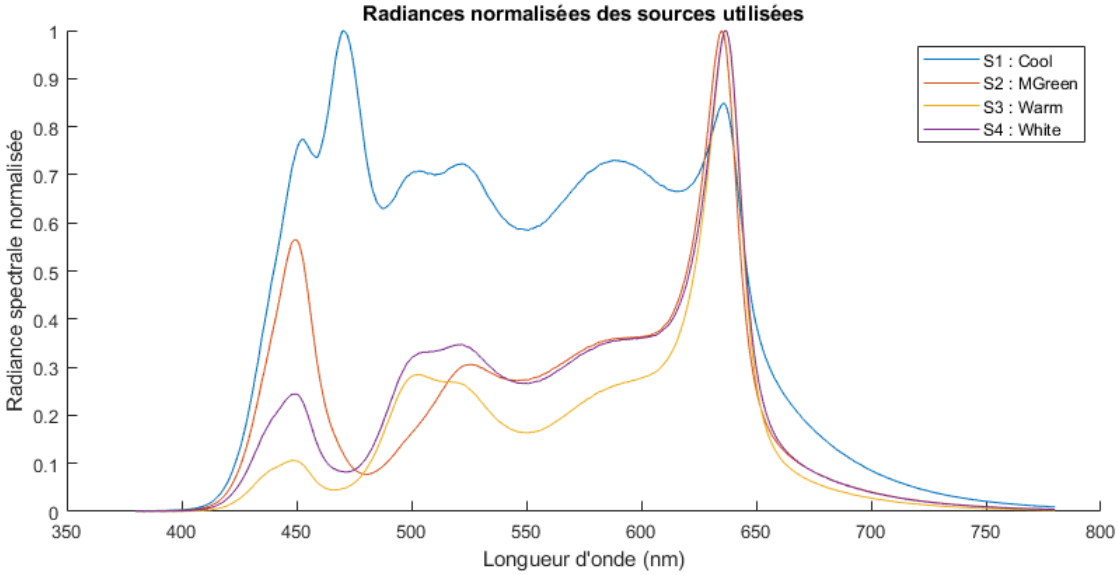
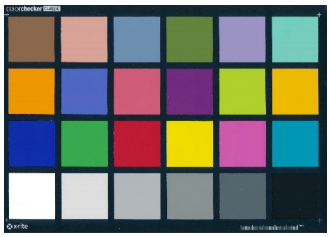


FIGURE 2.1 – Luminances spectriques normalisées des quatre sources utilisées pour les expériences sur les étalonnages colorimétriques. Mesures en réflexion sur une case blanche d'une des palettes de patchs colorés

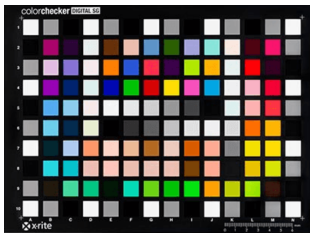
Niveau de consigne (nombre)	Luminance : patch le plus clair - sombre (cd/m^2) Source S1	Source S2	Source S3	Source S4
1	58.7 - 0.868	56.2 - 0.842	42.5 - 0.637	54.9 - 0.819
2	118 - 1.74	128 - 1.92	87.0 - 1.30	116 - 1.72
3	250 - 3.70	256 - 3.82	185 - 2.77	231 - 3.45
4	368 - 5.44	381 - 5.70	275 - 4.12	347 - 5.17
5	494 - 7.31	505 - 7.56	364 - 5.44	470 - 7.02
6	622 - 9.20	638 - 9.54	451 - 6.75	580 - 8.65
7	748 - 11.1	760 - 11.4	541 - 8.10	702 - 10.5
8	867 - 12.8	884 - 13.2	627 - 9.38	814 - 12.1
9	990 - 14.6	1010 - 15.1	718 - 10.7	924 - 13.8
10	1110 - 16.4	1120 - 16.8	799 - 11.9	1030 - 15.4
11	1230 - 18.1	1230 - 18.5	887 - 13.3	1150 - 17.1
Dynamique de luminance maximale (cd/m^2)	1229	1229	886	1149
Ratio de luminance maximal	1420	1420	1390	1400

TABLE 2.1 – Niveaux de luminance pour chaque consigne des sources LED

Les trois palettes de patchs colorés utilisées durant l'expérience sont représentées sur la Figure 2.2. Ces trois palettes ont été sélectionnées pour que d'une part, elles proposent une variété de matériaux (la palette PMC est confectionnée avec des matériaux différents de ceux des palettes CC24 et CC96), et d'autre part, pour proposer une variété de densités de couleurs dans l'espace CIE-XYZ (2°) (la palette CC96 propose une densité supérieure à celle de la palette CC24.



(a) La palette « *classic* » de la marque « calibrite Color Checker » (24 patchs) - notée CC24



(b) La palette « *digital SG* » de la marque « calibrite Color Checker » (96 patchs différents) - notée CC96



(c) La palette « *Preferred Memory Color chart* » de Luo (2024) (30 patchs) - notée PMC

FIGURE 2.2 – Illustration des palettes de patchs colorés utilisées lors des expériences sur les étalonnages colorimétriques

Le protocole d'acquisition comporte sept étapes selon une méthode similaire à celle de la norme ISO17321-2 (2012) :

1. Une source lumineuse est allumée de façon à fournir le flux lumineux le plus intense pendant une heure (comme recommandé par Sakar et al. (2018)) ;
2. Le matériau de type Spectralon et le spectroradiomètre sont placés dans la scène selon la géométrie suivante : $\theta_{in} = 45°, \phi_{in} = 0°, \theta_{out} = 0°$ et $\phi_{out} = 0°$ puis une mesure de luminance spectrique est réalisée ;

3. Le spectroradiomètre est remplacé par la caméra et une photographie HDR du matériau de type Spectralon est réalisée ;
4. Le matériau de type Spectralon est remplacé par l'une des palettes de patchs colorés, et une photographie HDR est réalisée ;
5. L'étape 4. est répétée autant de fois qu'il y a de palettes de patchs colorés ;
6. La consigne du projecteur LED est ajustée en suivant l'ordre décroissant des flux lumineux : consigne $11 \rightarrow 10 \rightarrow ... \rightarrow 1$. Les étapes 2 à 5 sont répétées pour chaque niveau de consigne ;
7. Les étapes 1 à 6 sont répétées pour chaque source lumineuse.

Pour créer les photographies HDR, neuf photographies LDR encodées sur 14 bits sont réalisées avec une ouverture géométrique et une valeur ISO constants (N = f/4.5 ; ISO = 100) ; seules les durées d'exposition varient : $\Delta t_{exp} = 1.6, 0.77, 1/2, 1/5, 1/10, 1/20, 1/40, 1/80, 1/160$ secondes. Cette configuration permet de conserver les mêmes paramètres pour l'ensemble des niveaux lumineux. Des comparaisons directes entre les photographies HDR sous les différentes sources lumineuses et pour les différents flux lumineux peuvent ainsi être réalisées. Les images étant enregistrées au format brut (RAW) il est nécessaire d'utiliser un algorithme permettant de passer d'une image encodée sur un canal en une image RVB ; pour ce faire l'algorithme de Malvar et al. (2004) est utilisé de façon à obtenir une image RVB LDR. Ensuite, l'algorithme de Reinhard et al. (2010) est utilisé pour fusionner l'ensemble des photographies LDR :

$$L_{i,j} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{nb_{LDR}} w(Z_{i,j}(k))} . \sum_{k=1}^{nb_{LDR}} \frac{Z_{i,j}(k).w(Z_{i,j}(k))}{\Delta t_k} \tag{2.11}$$

où : $L_{i,j}$ correspond à la valeur du canal rouge (resp. vert, resp. bleu) du pixel (i, j) ; $Z_{i,j}(k)$ est la valeur du canal rouge (resp. vert, resp. bleu) du pixel (i, j) de l'image LDR ayant une durée d'exposition Δt_k ; $w : a \mapsto w(a)$ correspond à une fonction de pondération qui dans notre expérience est égale à la fonction constante égale à 1 ; nb_{LDR} est le nombre de photographies LDR prises (ici $nb_{LDR} = 9$).

À ce stade, nous disposons de luminances spectriques et de quatre photographies HDR associées aux trois palettes de patchs colorés et au matériau de type Spectralon. Il est nécessaire d'appliquer une correction permettant de compenser l'effet du vignettage du système optique {caméra $\oplus$ objectif qui se manifeste par une photographie présentant un assombrissement dans les coins, ainsi que l'effet de non uniformité de la source dans le plan des mesures. Le facteur correctif multiplicatif s'exprime par :

$$Corr(i, j) = \frac{R(i, j) + V(i, j) + B(i, j)}{R_{cible} + V_{cible} + B_{cible}} \tag{2.12}$$

où : R_{cible} (resp. V_{cible}, resp. B_{cible}) correspond à la valeur moyenne du canal rouge (resp. vert, resp. bleu) de la photographie HDR dans la région du matériau de type Spectralon ocorrespondant à la mesure effectuée avec le spectroradiomètre ; $R(i, j)$ (resp. $V(i, j)$, resp. $B(i, j)$) correspond à la valeur du canal rouge (resp. vert, resp. bleu) du pixel (i, j) de la photographie HDR liée au matériau de type Spectralon.

Pour obtenir la valeur RVB corrigée de chaque patch coloré, la relation suivante est utilisée :

$$R_k = mean\{Corr(i,j).R(i,j), (i,j)_k\} \tag{2.13}$$

où : $mean\{., (i,j)_k\}$ correspond à la valeur moyenne lorsque les paramètres (i,j) varient dans la région $(i,j)_k$; $(i,j)_k$ correspond à la région de pixels où le patch indicé k est situé au sein de la photographie HDR. Des calculs similaires sont réalisés pour les canaux vert et bleu.

Finalement, une dernière étape de linéarisation de la caméra est appliquée, de façon à garantir que si la luminance double alors les valeurs R, V et B doublent également. La correction appliquée est du second ordre, de façon à approcher le minimum global défini par :

$$min\{\sum_{k \in K_{gris}} (Y(k) - (a.R_k^2 + b.R_k + c))^2, \qquad (a,b,c)\} \tag{2.14}$$

où : (a,b,c) sont les paramètres liés à la relation de linéarisation définie par $f_lin_R : R \mapsto a.R^2 + b.R + c$; $min\{x, (a,b,c)\}$ est le 3-uplet (a,b,c) pour lequel x est minimum ; R_k (resp. Y_k) correspond à la valeur R de l'espace RVB de la caméra (resp. la valeur Y de l'espace CIE-XYZ (2°)), *i.e.* la valeur de luminance) associée au patch indicé k ; K_{gris} correspond à l'ensemble des indices des patchs gris d'une source lumineuse. Des calculs similaires sont réalisés pour les canaux vert et bleu.

La linéarisation est appliquée indépendamment pour chacun des trois canaux R, V et B, et pour les quatre sources lumineuses, ce qui implique un total de 12 (3x4) fonctions de linéarisation.

Pour obtenir les luminances spectriques issues de chaque patch coloré, la relation suivante est appliquée :

$$S_k(\lambda) = Corr_k.S(\lambda).\frac{\rho_k(\lambda)}{\rho_s(\lambda)} \tag{2.15}$$

où : $Corr_k = mean\{Corr(i,j), (i,j)_k\}$; $\lambda \mapsto S(\lambda)$ correspond à la luminance spectrique mesurée sur le matériau de type Spectralon ; $\lambda \mapsto \rho_k(\lambda)$ (resp. $\lambda \mapsto \rho_s(\lambda)$) correspond à la réflectance spectrale du patch indicé k (resp. du matériau de type Spectralon) pour la configuration géométrique $\theta_{in} = 45°, \phi_{in} = 0°, \theta_{out} = 45°$ et $\phi_{out} = 0°$. La réflectance spectrale du matériau de type Spectralon est estimée par le modèle de Levesque and Dissanka (2016) tandis que les réflectances spectrales des patchs colorés ont été déterminés en amont en laboratoire.

Ensuite, connaissant la luminance spectrique de chaque patch coloré, les coordonnées colorimétriques X, Y et Z relatives à l'espace CIE-XYZ (2°) sont calculés via la relation :

$$\begin{cases} X_k = K_m. \int \bar{x}(\lambda).S_k(\lambda).d\lambda \\ \\ Y_k = K_m. \int \bar{y}(\lambda).S_k(\lambda).d\lambda \\ \\ Z_k = K_m. \int \bar{z}(\lambda).S_k(\lambda).d\lambda \end{cases} \tag{2.16}$$

où : $K_m = 683.002$ lm/W ; $\lambda \mapsto \bar{x}(\lambda)$, $\lambda \mapsto \bar{y}(\lambda)$ et $\lambda \mapsto \bar{z}(\lambda)$ sont les fonctions colorimétriques associées à l'espace CIE-XYZ (2°) qui sont représentées en section 1.1.5.

Finalement, un total de (24+96+30)x11x4 = 6600 triplets RVB ainsi que leurs correspondants dans l'espace CIE-XYZ (2°) (triplets XYZ) sont obtenus.

2.2.1.2 Construction du jeu de données synthétiques

Le jeu de données synthétiques correspond à un jeu de donnée où les composantes RVB de l'espace colorimétrique de la caméra ont été calculées à partir des courbes de transmittance spectrale associées aux filtres R, V et B : $\lambda \mapsto F_R(\lambda)$, $\lambda \mapsto F_V(\lambda)$, $\lambda \mapsto F_R(\lambda)$ et $\lambda \mapsto F_B(\lambda)$. Pour construire ce jeu de données, les valeurs des coordonnées de l'espace CIE-XYZ (2°) déterminées en section 2.2.1.1 sont utilisées, et les coordonnées RVB (espace colorimétrique de la caméra) sont calculées selon :

$$\begin{cases} R_k = \int F_R(\lambda).S_k(\lambda).d\lambda \\ V_k = \int F_V(\lambda).S_k(\lambda).d\lambda \\ B_k = \int F_B(\lambda).S_k(\lambda).d\lambda \end{cases} \tag{2.17}$$

où : $\lambda \mapsto S_k(\lambda)$ correspond à la luminance spectrique associée au patch indicé k ; $\lambda \mapsto F_R(\lambda)$ (resp. $\lambda \mapsto F_V(\lambda)$, resp. $\lambda \mapsto F_B(\lambda)$) correspond à la transmittance spectrale du filtre rouge (resp. vert, resp. bleu) de la caméra utilisée en section 2.2.1.1 qui a été déterminée en utilisant une méthode de reconstruction spectrale (voir Figure 2.3, Chapitre 3 et Annexe 7.5).

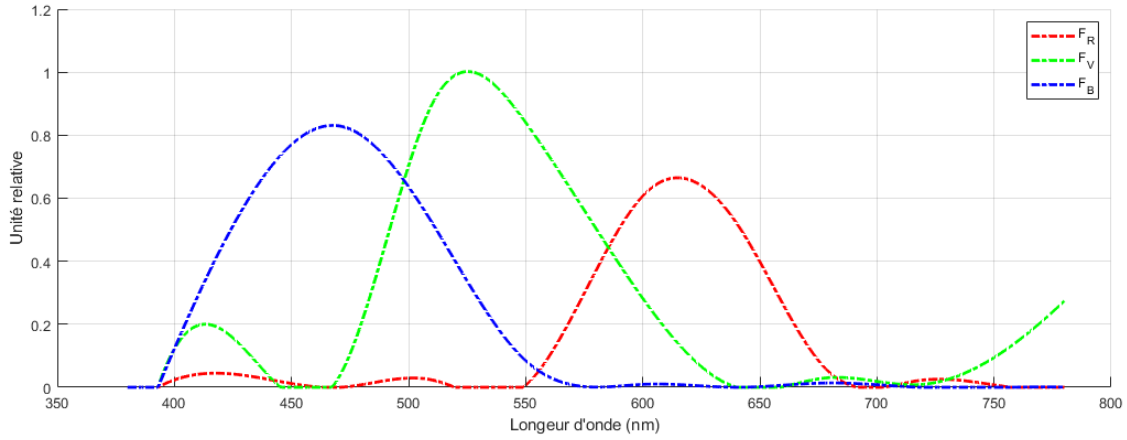


FIGURE 2.3 – Transmittances spectrales de la caméra estimées en utilisant la méthode de reconstruction spectrale par splines

2.2.1.3 Méthodes d'étalonnage colorimétrique étudiées

Dans cette étude les outils d'étalonnage colorimétrique fondés sur des modèles globaux et locaux sont étudiés. Les méthodes globales étudiées sont toutes du type SVD (problème (2.4) résolu en utilisant la RMSE) et utilisent les vecteurs ρ suivants :

- $\rho_{SVD}(R,V,B) = [R,V,B]$ - noté SVD ;
- $\rho_{SVD+}(R,V,B) = [R,V,B,1]$ - noté SVD+ ;
- $\rho_{SVD^2}(R,V,B) = [R,V,B,1,R^2,V^2,B^2,R.V,R.B,V.B]$ - noté SVD^2 ;
- $\rho_{SVD3}(R,V,B) = [R,V,B,1,R^2,V^2,B^2,R.V,R.B,V.B,R.V.B]$ - noté SVD3.

Concernant les méthodes locales, les deux principaux interpolateurs (tri-linéaire et spline) sont étudiés dans cette section. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de réaliser des extrapolations. Ainsi, pour permettre à n'importe quel triplet RVB d'une photographie de pouvoir être étalonné, la procédure suivante permet de se ramener à une situation d'extrapolation en enrichissant le jeu de données initial avec des points extrêmes :

- identifier les extrémums du canal R (resp. V, resp. B) que décrit la photographie à étalonner notés R_{min} et R_{max} (resp. V_{min}, V_{max}, resp. B_{min} et B_{max}) ;
- à partir des données de référence $((RVB)_{ref}, (XYZ)_{ref})$, construire un modèle d'étalonnage colorimétrique global $(G : [R, V, B] \mapsto [X, Y, Z])$;
- en utilisant le modèle G, réaliser l'étalonnage colorimétrique des sommets du pavé droit définis par :
  - $S1 = [R_{min}, V_{min}, B_{min}]$;
  - $S2 = [R_{max}, V_{min}, B_{min}]$;
  - $S3 = [R_{min}, V_{max}, B_{min}]$;
  - $S4 = [R_{max}, V_{max}, B_{min}]$;
  - $S5 = [R_{min}, V_{min}, B_{max}]$;
  - $S6 = [R_{max}, V_{min}, B_{max}]$;
  - $S7 = [R_{min}, V_{max}, B_{max}]$;
  - $S8 = [R_{max}, V_{max}, B_{max}]$.
- définir un jeu de données en associant le jeu de données de référence $((RVB)_{ref}, (XYZ)_{ref})$ et celui défini par le pavé droit $((RVB)_{pave}, (XYZ)_{pave})$, et construire le modèle d'étalonnage local à partir de ce nouveau jeu de données.

Pour l'étude, l'estimation les sommets du pavé droit est obtenu via la méthode par SVD. Cependant, d'autres modèles d'étalonnage colorimétrique peuvent être utilisés.

2.2.2 Résultats

L'ensemble des résultats de cette étude sont présentés en utilisant la métrique ΔE^*_{00} et en séparant les résultats provenant du domaine de l'interpolation au sein de l'enveloppe convexe du jeu de données initial, et à l'extérieur de cette enveloppe (ce qui correspond à une situation d'extrapolation, mais ramenée à une situation d'interpolation dans le cadre du jeu de données enrichi défini dans la section 2.2.1.3 ; néanmoins dans la suite de ce chapitre, nous ferons référence à cette situation par le terme « extrapolation »). La métrique ΔE^*_{00} est calculée en utilisant comme blanc de référence le patch dont la coordonnée dans l'espace CIE-XYZ (2°) a la plus grande luminance (voir dernière ligne de la Table 2.1). De plus, il est nécessaire de fixer des paramètres libres impliqués dans la définition de la métrique ΔE^*_{00} : Kh, Kl et Kc. Leurs valeurs sont prises égales à l'unité. Pour éviter les redondances, les moyennes et écarts-types sont calculés pour l'ensemble des sources lumineuses. Enfin, d'après l'étude de Mokrzycki and Tatol (2011) une différence colorimétrique ΔE^*_{00} supérieure à cinq indique que les deux couleurs sont perçues différemment ; en conséquence seuls sont présentés les résultats qui valident la condition : « la valeur moyenne de la différence colorimétrique ΔE^*_{00} est inférieure à cinq ».

2.2.2.1 Utilisation de données synthétiques à la place de données réelles

Pour les expérimentations présentées ici et dans la sous-section 2.2.2.2 le protocole suivant est appliqué :

1. sélectionner une source lumineuse ;
2. sélectionner une palette éclairée à un niveau lumineux puis déterminer un modèle d'étalonnage colorimétrique à partir de ces données colorimétriques ;
3. sélectionner une autre palette et regrouper l'ensemble des données issues de cette palette éclairée par les onze niveaux lumineux en un seul jeu de données test ;
4. estimer les grandeurs colorimétriques du jeu de données test à partir du modèle déterminé en étape 2. et conserver les résultats obtenus ;
5. répéter les étapes 2. à 4. jusqu'à avoir réaliser des étalonnages colorimétriques pour l'ensemble des données de références issues des niveaux lumineux d'une source ;
6. changer de source lumineuse et répéter les opérations 2. à 5. ;
7. appliquer les analyses statistiques sur l'ensemble des résultats (moyennes et écarts-types).

Puisque nous avons fait l'acquisition de trois palettes de patchs colorés à onze niveaux lumineux (pour une source donnée), nous avons décidé pour les expériences présentées dans les sous-sections 2.2.2.1 et d'utiliser une palette éclairée à un niveau lumineux afin de déterminer les modèles d'étalonnage colorimétrique puis pour les tests nous utilisons une autre palette éclairée sous l'ensemble des onze niveaux lumineux. Enfin, on répète l'opération dix fois afin de balayer l'ensemble des niveaux lumineux possibles lors de la création du modèle. Finalement, les moyennes et écarts-types sont calculés en confondant l'ensemble des résultats provenant des onze niveaux lumineux et des quatre sources lumineuses (N = 11x4 = 44).

Les Figures 2.4 et 2.5 représentent les valeurs moyennes et écarts-types obtenus pour les différents outils d'étalonnage colorimétrique, en interpolation et extrapolation, dans le cas où l'on utilise le jeu de données issues des acquisitions, ou le jeu de données synthétiques. Pour ce faire, la palette de patchs colorés CC24 est utilisée pour la création du modèle et la palette PMC est utilisée pour réaliser les tests.

Premièrement, dans le domaine de l'extrapolation, les méthodes SVD^2 et SVD3 induisent des différences colorimétriques ΔE^*_{00} supérieures à cinq, alors que toutes les autres méthodes (globales et locales) induisent des valeurs de ΔE^*_{00} inférieures à cinq (voir Figure 2.5).

Ensuite, les valeurs moyennes des méthodes SVD / SVD+ / SVD^2 / SVD3 / local linéaire / local spline sont similaires en interpolation, lorsque le jeu de données de référence est construit à partir de données réelles (ΔE^*_{00} moyen : 2.1 / 2.1 / 2.0 / 2.0 / 2.0 / 2.2) ou à partir des données synthétiques (ΔE^*_{00} moyen : 1.1 / 1.6 / 1.0 / 1.0 / 1.0 / 1.1). Cependant, des différences se dégagent en extrapolation entre les méthodes SVD / local linéaire / local spline (ΔE^*_{00} moyen : 3.1 / 2.9 / 3.1) et la méthode SVD+ (ΔE^*_{00} moyen : 5.0), cette observation est partagée lorsque l'on utilise le jeu de données synthétiques (ΔE^*_{00} moyen : 1.4 / 1.2 / 1.3 contre 2.6).

Indépendamment des méthodes d'étalonnage colorimétrique et du domaine d'étude (interpolation ou extrapolation) les différences colorimétriques entre les méthodes d'étalonnage réalisées à partir des données réelles sont toujours supérieures à celles provenant du jeu de données synthétiques. Ceci signifie que les résultats liés aux étalonnages colorimétriques réalisés à partir de données synthétiques sont toujours avantageux comparés à ceux réalisés à partir des données réelles.

Enfin, en extrapolation, et indépendamment du jeu de données utilisé, les méthodes locales induisent des différences colorimétriques (ΔE^*_{00} moyen jeu de données réelles // synthétiques : 3.0

// 1.3) légèrement meilleures que celle induites par la méthode par SVD (3.1 // 1.4) alors que ces dernières ont bénéficié de l'utilisation de la méthode SVD garantissant la possibilité d'étalonner des données en extrapolation.

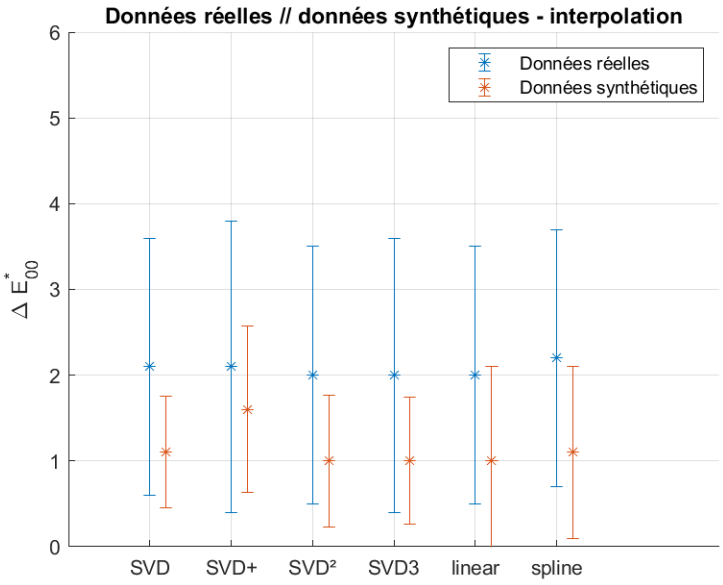


FIGURE 2.4 – Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues pour les jeux de données réelles et synthétiques - interpolation

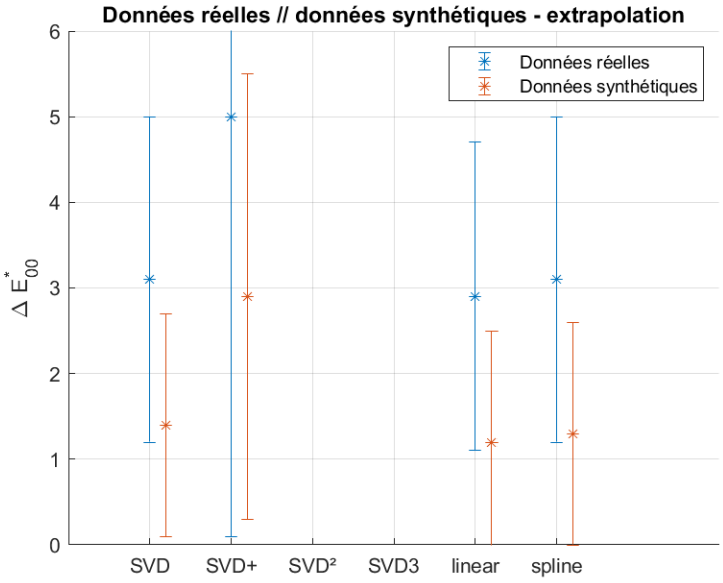


FIGURE 2.5 – Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues pour les jeux de données réelles et synthétiques - extrapolation

2.2.2.2 Acquisition d'une palette d'échantillons plus denses

Les Figures 2.6 et 2.7 présentent les valeurs moyennes et écarts-types obtenus pour les différents outils d'étalonnage colorimétrique en interpolation et extrapolation, dans le cas où l'on utilise la palette de patchs colorés CC24 ou CC96 pour définir les modèles et en utilisant la palette PMC lors des tests.

Premièrement, dans le domaine de l'extrapolation et lorsque l'on utilise la palette CC96 pour définir le modèle, les méthodes SVD^2 et SVD3 induisent des différences colorimétriques ΔE^*_{00} supérieures à cinq, à la différence de toutes les autres méthodes (voir Figure 2.7).

Indépendamment des méthodes d'étalonnage colorimétrique et du domaine d'étude (interpolation ou extrapolation), les différences colorimétriques entre les méthodes d'étalonnage réalisées en utilisant la palette CC24 sont similaires à celles observées en utilisant la palette CC96, à l'exception de la méthode SVD+ qui tire un avantage de l'usage du CC96 en extrapolation (ΔE^*_{00} moyen de 3.7 contre 5.0).

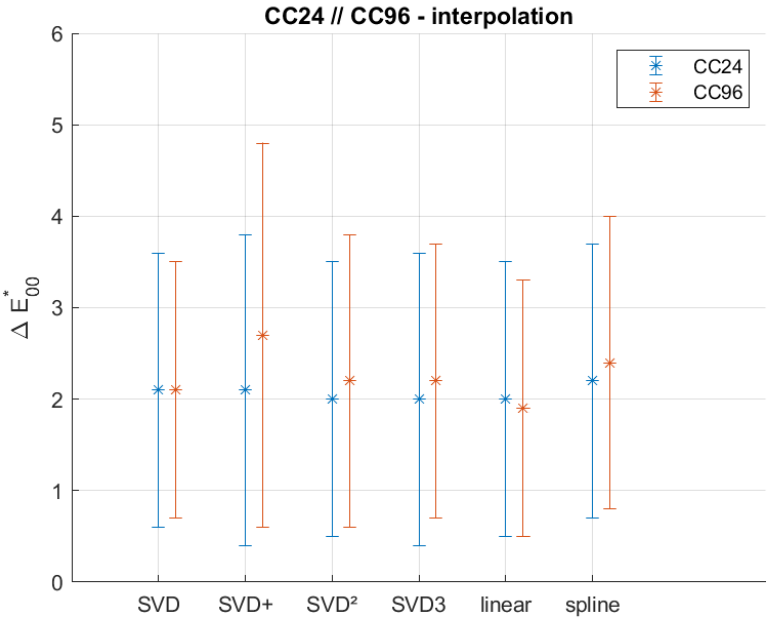


FIGURE 2.6 – Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en utilisant la palette d'échantillons CC24 et CC96 pour créer le modèle d'étalonnage colorimétrique - interpolation

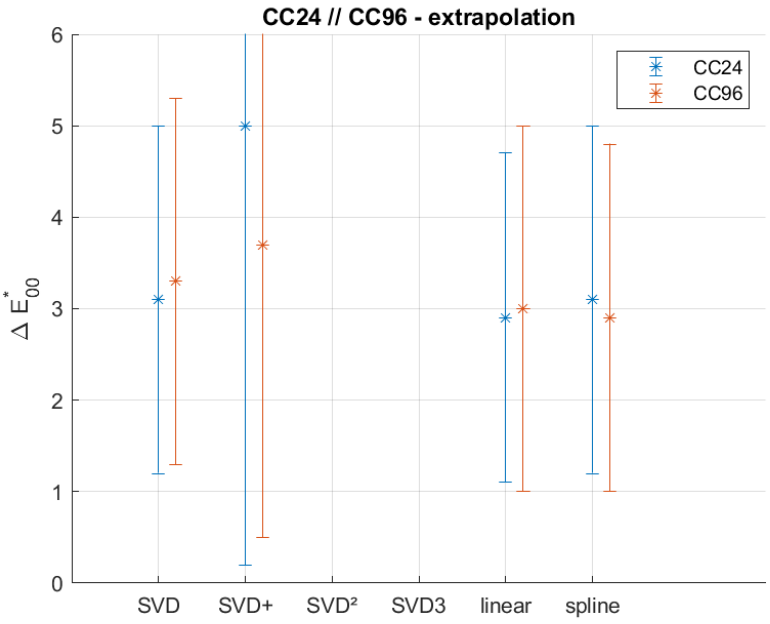


FIGURE 2.7 – Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en utilisant la palette d'échantillons CC24 et CC96 pour créer le modèle d'étalonnage colorimétrique - extrapolation

2.2.2.3 Acquisition de données à deux niveaux lumineux

Pour l'expérience présentée dans cette sous-section, le protocole suivant est appliqué :

1. sélectionner une source lumineuse ;
2. sélectionner deux niveaux lumineux parmi les onze disponibles (55 duos possibles) ;
3. isoler les données colorimétriques associées à une palette éclairée par les deux niveaux lumineux déterminés en étape précédente puis déterminer un modèle d'étalonnage colorimétrique à partir de ces données colorimétriques ;
4. sélectionner une autre palette et regrouper l'ensemble des données issues de cette palette éclairée par les onze niveaux lumineux en un seul jeu de données test ;
5. estimer les grandeurs colorimétriques du jeu de données test à partir du modèle déterminé en étape 2. et conserver les résultats obtenus ;
6. répéter les étapes 2. à 4. jusqu'à avoir réaliser des étalonnages colorimétriques pour l'ensemble des données de références issues des paires de niveaux lumineux d'une source ;
7. changer de source lumineuse et répéter les opérations 2. à 5. ;
8. appliquer les analyses statistiques sur l'ensemble des résultats (moyennes et écarts-types).

Les Figures 2.8 et 2.9 présentent les valeurs moyennes et écarts-types obtenus pour les différents outils d'étalonnage colorimétrique, en interpolation et extrapolation, dans le cas où l'on utilise la palette de patchs colorés CC24 éclairée à un unique, ou deux niveaux lumineux. Dans ce second cas, le nombre de points de référence exploités pour définir le modèle double puisque les points éclairés à chaque niveau lumineux sont regroupés. Pour ces expériences, la palette PMC est exploitée pour l'évaluation.

Premièrement, dans le domaine de l'extrapolation, lorsque l'on éclaire la palette CC24 à deux niveaux lumineux, les méthodes SVD+, SVD^2 et SVD3 induisent des différences colorimétriques ΔE^*_{00} supérieures à cinq à la différence de toutes les autres méthodes (voir Figure 2.9).

Dans le domaine de l'interpolation, les différences colorimétriques ΔE^*_{00} sont similaires entre les modèles d'étalonnage colorimétrique définis à l'aide de la palette CC24 éclairée à un ou deux niveaux lumineux (ΔE^*_{00} moyen pour la méthode SVD / SVD+ / SVD^2 / SVD3 / local linéaire / local spline : 2.1 / 2.1 / 2.0 / 2.0 / 2.0 / 2.2 contre 2.1 / 2.0 / 1.9 / 1.9 / 1.8 / 2.2). Concernant la méthode locale utilisant l'interpolateur par splines, les valeurs moyennes sont similaires entre l'usage d'une palette éclairée à un ou deux niveaux lumineux, mais l'écart-type est doublé lorsque la palette est éclairée à deux niveaux lumineux (1.5 contre 3.1).

Dans le domaine de l'extrapolation, les différences colorimétriques ΔE^*_{00} sont similaires entre les modèles d'étalonnage colorimétrique SVD / local linéaire / local spline définis à l'aide de la palette CC24 éclairée à un ou deux niveaux lumineux (ΔE^*_{00} moyen : 3.1 / 2.9 / 3.1 contre 3.2 / 2.8 / 3.1). Cependant la méthode SVD+ induit des différences colorimétriques acceptables lorsque l'on la palette est éclairé à un niveau lumineux ($\Delta E^*_{00} < 5$), ce qui n'est pas le cas (ΔE^*_{00} moyen de 6.2) lorsqu'elle est éclairée à deux niveaux lumineux distincts.

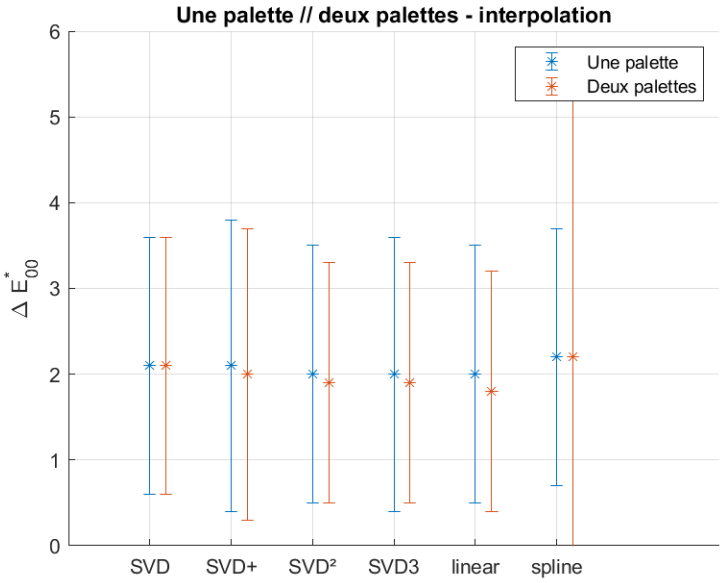


FIGURE 2.8 – Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en utilisant la palette d'échantillons CC24 éclairée à un ou deux niveaux lumineux pour créer le modèle d'étalonnage colorimétrique - interpolation

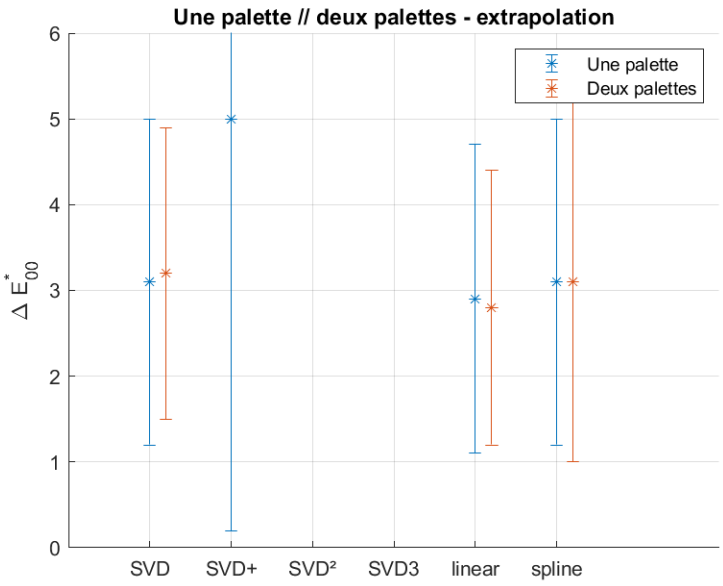


FIGURE 2.9 – Comparaisons des valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en utilisant la palette d'échantillons CC24 éclairée à un ou deux niveaux lumineux pour créer le modèle d'étalonnage colorimétrique - extrapolation

2.3 Étude pour des scènes comportant une grande dynamique de luminance - environnements photopiques et mésopiques

Compte tenu de notre contexte d'étude (scènes urbaines nocturnes), il est nécessaire d'estimer l'activité des bâtonnets afin de quantifier leur influence dans le système visuel via des modèles perceptifs (*e.g.* Cao et al., 2008 ; Shin et al., 2004). Ainsi, dans la section 2.3.1.2 des extensions aux outils d'étalonnage colorimétrique sont proposées afin de permettre l'estimation d'un quadruplet LMSR (espace des cônes et bâtonnets - 4D ; voir section 1.1.5.5) à partir d'un triplet RVB (espace de la caméra - 3D). De plus, le jeu de données qui a été acquis en section 2.2.1.1 ne permet pas de reproduire des conditions mésopiques (luminance inférieure à 3 cd/m^2 - Rea, 2000), il est ainsi complété de façon à ce qu'il inclut des niveaux lumineux mésopiques.

2.3.1 Matériels et méthodes

2.3.1.1 Acquisition de données de référence en niveau lumineux mésopique

L'enrichissement de la base de données décrite en section 2.2.1.1 est réalisé dans des conditions expérimentales similaires. Les différences sont :

— la géométrie décrite par la source et les observations (caméra RVB et spectroradiomètre) est inversée : $\theta_{in} = 0°, \phi_{in} = 0°, \theta_{out} = 45°$ et $\phi_{out} = 0°$;
— le projecteur LED est placé plus loin des palettes de patchs colorés permettant ainsi de diminuer le flux lumineux des sources, et par conséquent permet de se placer dans des conditions mésopiques ;
— les données colorimétriques sont calculées à la fois dans l'espace colorimétrique CIE-XYZ

(2°) et dans l'espace LMSR - dont les courbes de sensibilité spectrale sont représentées en section 1.1.1 Figure 1.3.

Les niveaux lumineux ainsi ajoutés au jeu de données sont indiqués dans la Table 2.2.

Niveau de consigne (nombre)	Luminance : patch le plus clair - sombre (cd/m^2) Source S1	Source S2	Source S3	Source S4
1	0.60 - 0.009	0.62 - 0.009	0.48 - 0.007	0.58 - 0.009
2	1.3 - 0.02	1.2 - 0.02	0.90 - 0.01	1.2 - 0.02
3	2.5 - 0.04	2.6 - 0.04	1.9 - 0.03	2.4 - 0.04
4	3.8 - 0.06	3.9 - 0.06	2.8 - 0.04	3.7 - 0.05
5	6.3 - 0.09	6.4 - 0.10	4.7 - 0.07	6.0 - 0.09
6	12 - 0.18	12 - 0.19	9.2 - 0.14	12 - 0.17

TABLE 2.2 – Niveaux de luminance (photopique) pour chaque consigne des sources LED ajoutés au jeu de données initial

Finalement, cette base de données est déclinée en trois jeux de données. Le premier ne prenant en compte que la vision photopique est le même que celui décrit en section 2.2.1.1, à la différence que les coordonnées LMSR ont été ajoutées. Ce jeu de données est nommé BDD_{photo}. Le second ne prend en compte que la vision mésopique et correspond aux acquisitions décrites dans la Table 2.2 pour les niveaux de consigne 1 à 4. Ce jeu de données est nommé BDD_{meso}. Le troisième regroupe les données acquises pour les domaines de visions photopique et mésopique. Ce jeu de données est nommé $BDD_{photo+meso}$.

2.3.1.2 Extension des outils d'étalonnage colorimétrique - 3D vers 4D

Les outils présentés en section 2.2.1.3 sont étendus de façon à les rendre utilisables pour l'étalonnage colorimétriques entre les espaces RVB et LMSR.

Concernant les méthodes globales, le système général (2.4) est réécrit de façon à prendre en compte quatre composantes (trois pour l'activité des cônes longs, moyens et courts, et une pour les bâtonnets) :

$$\begin{cases} min\{\sum_{k=1}^{N} E(LMSR_r(k), LMSR_c(k))\} \\ LMSR_c(k) = M * \rho(R_c(k), V_c(k), B_c(k)) \end{cases} \tag{2.18}$$

où : M est une matrice 4 x n ; $\rho(R_c(k), V_c(k), B_c(k))$ est un vecteur n x 1 ; $LMSR_r(k)$ (resp. $LMSR_c(k)$) est le quadruplet de référence (resp. calculé par le modèle d'étalonnage) qui est associé au vecteur $\rho(R_c(k), V_c(k), B_c(k))$; $E(.,.)$ est une erreur, par exemple l'erreur quadratique moyenne (MSE).

Dans cette étude le problème (2.18) est résolu en utilisant les vecteurs ρ suivant :
— $\rho_{SVD}(R, V, B) = [R, V, B]$ - noté SVD ;
— $\rho_{SVD+}(R, V, B) = [R, V, B, 1]$ - noté SVD+.

Concernant la méthode locale fondée sur les interpolations tri-linéaires, son extension implique uniquement d'appliquer la même pondération entre les espaces RVB de la caméra et l'espace LMSR,

ce qui se traduit par :

$$\begin{cases} RVBq = \sum_{k=1}^{4} \alpha_k . RVB_k \\ LMSRq = \sum_{k=1}^{4} \alpha_k . LMSR_k \\ \sum_{k=1}^{4} \alpha_k = 1 \end{cases} \tag{2.19}$$

où : $RVBq$ est le triplet RVB à étalonner dans l'espace LMSR ; $LMSRq$ correspond au quadruplet estimé par l'étalonnage colorimétrique ; RVB_k est un triplet RVB de référence auquel est associé un quadruplet de référence $LMSR_k$; les points de référence $(RVB_k)_{k\in\{1,...,4\}}$ sont sélectionnés en identifiant le tétraèdre élémentaire (découpage par la méthode de Delaunay) dans lequel se situe le point RVB_q ; $(\alpha_k)_{k\in\{1,...,4\}}$ correspond à la pondération barycentrique du point $RVBq$ par rapport aux points de référence $(RVB_k)_{k\in\{1,...,4\}}$.

Enfin, la méthode locale fondée sur les interpolations par splines est adaptée de façon à obtenir le modèle suivant :

$$\begin{cases} Lq = \alpha_L . Rq + \beta_L . Vq + \gamma_L . Bq + \sum_k \delta_{L,k} . d(r_{qk}) \\ Mq = \alpha_M . Rq + \beta_M . Vq + \gamma_M . Bq + \sum_k \delta_{M,k} . d(r_{qk}) \\ Sq = \alpha_S . Rq + \beta_S . Vq + \gamma_S . Bq + \sum_k \delta_{S,k} . d(r_{qk}) \\ Rodsq = \alpha_{Rods} . Rq + \beta_{Rods} . Vq + \gamma_{Rods} . Bq + \sum_k \delta_{Rods,k} . d(r_{qk}) \end{cases} \tag{2.20}$$

où : $LMSRq = [Lq, Mq, Sq, Rodsq]$ correspond au résultat issu de l'étalonnage colorimétrique ; $d(r_{qk})$ correspond à la relation décrite en équation 2.9 entre le triplet RVB à étalonner noté « q » et le triplet de référence noté « k » (k ∈ 1,...,N) ; les coefficients $\alpha_{L/M/S/Rods}$, $\beta_{L/M/S/Rods}$, $\gamma_{L/M/S/Rods}$ et $\delta_{L/M/S/Rods,k}$ sont déterminés à l'avance à partir de la structure de référence.

2.3.1.3 Extension de la différence colorimétrique ΔE^*_{00} pour prendre en compte la vision mésopique

Dans l'état de l'art (section 1.1.6.3), les travaux de Ashraf et al. (2022) ont mis en avant qu'il est possible de définir une extension à la métrique ΔE^*_{00} qui prend en compte la vision mésopique. Les auteurs ont conclu que la métrique qui permet de fournir des résultats les plus proches des différences perceptives consiste à intégrer le modèle de Cao et al. (2008) dans l'estimation de triplet CIE-L*a*b*, permettant ensuite d'appliquer la métrique ΔE^*_{00} entre un triplet L*a*b* de référence et un triplet équivalent photopique fourni via le modèle de Cao et al. (2008).

Contrairement à l'étude de Ashraf et al. (2022), le modèle de Cao et al. (2008) est exploité non pas en considérant les activités des cônes et des bâtonnets décrits en fonction des éclairements incidents sur la rétine (unité Trolands - Td), mais les luminances incidentes à l'œil. Le modèle est décrit en section 1.1.6.2. De plus, l'étude de Cao et al. (2008) ne fournit des valeurs pour les paramètres du modèle que pour des luminances supérieures à 0.1 cd/m^2 ; une extrapolation linéaire

permettant d'étendre les paramètres du modèle de Cao et al. (2008) au-delà de cette limite est par conséquent réalisée. Pour déterminer la valeur du triplet XYZ*, équivalent photopique qui provient du quadruplet LMSR, le protocole suivant est appliqué :

1. déterminer les valeurs des paramètres décrivant le modèle de Cao et al. (2008) (k_5 et k_6) pour la couleur à convertir ;
2. appliquer le modèle de Cao et al. (2008) de façon à convertir le quadruplet LMSR en une couleur équivalente dans le domaine photopique (LMS*) ;
3. convertir le triplet LMS* dans l'espace CIE-XYZ (2°) (XYZ) en utilisant la matrice de passage fournie par Stockman (2019) (voir équation 1.18 - section 1.1.5.5).

Finalement, pour deux couleurs LMSR_1 et LMSR_2 la différence colorimétrique (équivalente photopique) est obtenue en appliquant le protocole suivant :

1. convertir les quadruplets LMSR_1 et LMSR_2 en des triplets XYZ_1^* et XYZ_2^* équivalents photopiques ;
2. convertir le quadruplet LMSR associé au blanc de référence en un triplet XYZ* équivalent photopique ;
3. utiliser la relation de la différence colorimétrique ΔE_{00}^* sur les deux triplets XYZ_1^* et XYZ_2^*, et en utilisant le blanc de référence déterminé précédemment.

2.3.2 Résultats

Les résultats sont présentés en trois sous-sections. La sous-section 2.3.2.1 présente les différences colorimétriques moyennes (ΔE_{00}^*) obtenues par les outils d'étalonnage colorimétrique en fonction de la dynamique de luminance lorsque les données de référence et de test sont situées dans le domaine photopique (luminance supérieure à 3 cd/m^2, utilisation de BDD_{photo}). La sous-section 2.3.2.2 présente les différences colorimétriques moyennes (ΔE_{00}^* adaptée à la vision mésopique - voir sous-section 2.3.1.3) lorsque toutes les données (réféence et test) sont situées dans le domaine mésopique (luminance inférieure à 3 cd/m^2, utilisation de BDD_{meso}). La sous-section 2.3.2.3 présente les résultats lorsque les données de référence sont situées dans le domaine photopique et les données test dans le domaine mésopique (et inversement (utilisation de $BDD_{photo+meso}$)).

Les paramètres libres liés au calcul de ΔE_{00}^* (Kh, Kl et Kc) sont pris égaux à l'unité. Pour éviter les redondances, les moyennes et écarts-types sont calculés en regroupant les résultats obtenus pour chaque source lumineuse. Enfin, comme précédemment, seuls les résultats pour lesquels les ΔE_{00}^* inférieurs à cinq sont présentés (dans le cas contraire, une différence visuelle est perçue).

Les résultats en interpolation sont présentés en fonction de la dynamique de luminance que décrit la palette de patchs colorés de référence ($\Delta = max\{Y_r, r\} - min\{Y_r, r\}$). Des moyennes par tranche de dynamique de luminance sont calculées (*e.g.* entre 200 et 400 cd/m^2). Par exemple, les valeurs situées entre des dynamiques de luminance comprises entre 200 et 400 cd/m^2 doivent se lire : « pour des dynamiques de luminance comprises entre 200 et 400 cd/m^2, la méthode par SVD présente une différence colorimétrique ΔE_{00}^* moyenne de XX ».

De façon similaire, les résultats en extrapolation sont présentés par tranche. Pour ce faire, nous avons décidé d'introduire deux notions : extrapolation positive, et extrapolation négative. Une extrapolation positive (resp. négative) correspond au cas où l'extrapolation concerne une couleur dont la luminance est inférieure (resp. supérieure) à la luminance minimale (resp. maximale) de la palette de référence. En notant les luminances de la palette de référence $(Y_r)_r$, les patchs tests

indicés q pour lesquels la quantité $\delta_+(Yq) = Yq - max\{Y_r, r\}$ (resp. $\delta_-(Yq) = min\{Y_r, r\} - Yq$) est positive sont considérés en extrapolation positive (resp. négative).

Comme dans la section 2.2, trois palettes de patchs colorés avaient été caractérisées pour onze niveaux lumineux. Ainsi, le même protocole que celui présenté en sous-section 2.2.2.1 est utilisé :

1. sélectionner une source lumineuse ;
2. sélectionner une palette éclairée à un niveau lumineux puis déterminer un modèle d'étalonnage colorimétrique à partir de ces données colorimétriques ;
3. sélectionner une autre palette et regrouper l'ensemble des données issues de cette palette éclairée par les onze niveaux lumineux en un seul jeu de données test ;
4. estimer les grandeurs colorimétriques du jeu de données test à partir du modèle déterminé en étape 2. et conserver les résultats obtenus ;
5. répéter les étapes 2. à 4. jusqu'à avoir réaliser des étalonnages colorimétriques pour l'ensemble des données de références issues des niveaux lumineux d'une source ;
6. changer de source lumineuse est répéter les opérations 2. à 5. ;
7. appliquer les analyses statistiques sur l'ensemble des résultats (moyennes et écarts-types).

2.3.2.1 Étalonnages colorimétriques dans le domaine photopique

Dans cette sous-section, la métrique ΔE^*_{00} est calculée en utilisant comme blanc de référence la valeur de la case blanche présentant la luminance la plus élevée (voir dernière ligne de la Table 2.1).

Les Figures 2.10 et 2.11 présentent les différences colorimétriques moyennes et les écarts-types obtenus lorsque la palette CC24 est utilisée en référence et la palette PMC en test, pour les méthodes SVD, SVD+ et interpolation tri-linéaire.

Premièrement, en interpolation (voir Figure 2.10) indépendamment de la dynamique de luminance de la palette de référence, les méthodes induisent des différences colorimétriques acceptables ($\Delta E^*_{00} < 5$). C'est également le cas en extrapolation négative, indépendamment de la plage d'éloignement (jusqu'à -50 cd/m^2, voir Figure 2.11), sauf pour la méthode SVD+. En extrapolation positive, il n'y a que la méthode SVD+ qui permet d'induire des ΔE^*_{00} inférieurs 5, pour des patchs caractérisés par une luminance supérieure de plus de 1000 cd/m^2 à celle de la palette de référence.

En interpolation, indépendamment de la dynamique de luminance de la palette de référence, les différences colorimétriques induites par les différents outils d'étalonnage étudiés (SVD, SVD+ et interpolation tri-linéaire) sont similaires, avec une différence colorimétrique ΔE^*_{00} moyenne de 2.1. De plus, les résultats de la méthode par interpolation tri-linéaire sont toujours meilleurs que ceux des méthodes SVD et SVD+.

En extrapolation négative, les méthodes SVD et par interpolation tri-linéaire induisent des inférieurs à 5 (voir Figure 2.11). Les différences colorimétriques augmentent avec l'écart de luminance par rapport à la plage de la palette de référence. De plus, les différences colorimétriques sont toujours moins élevées pour la méthode par interpolation tri-linéaire que pour la SVD.

En extrapolation positive (voir Figure 2.11), les méthodes SVD+ et interpolation tri-linéaire garantissent des ΔE^*_{00} inférieurs à 5, sauf pour l'interpolation tri-linéaire lorsque la luminance dépasse la dynamique de la palette de référence de plus de 800 cd/m^2. On constate que les différences colorimétriques augmentent avec l'écart de luminance par rapport à la palette. De plus, la méthode SVD+ produit systématiquement des différences plus faibles que l'interpolation tri-linéaire.

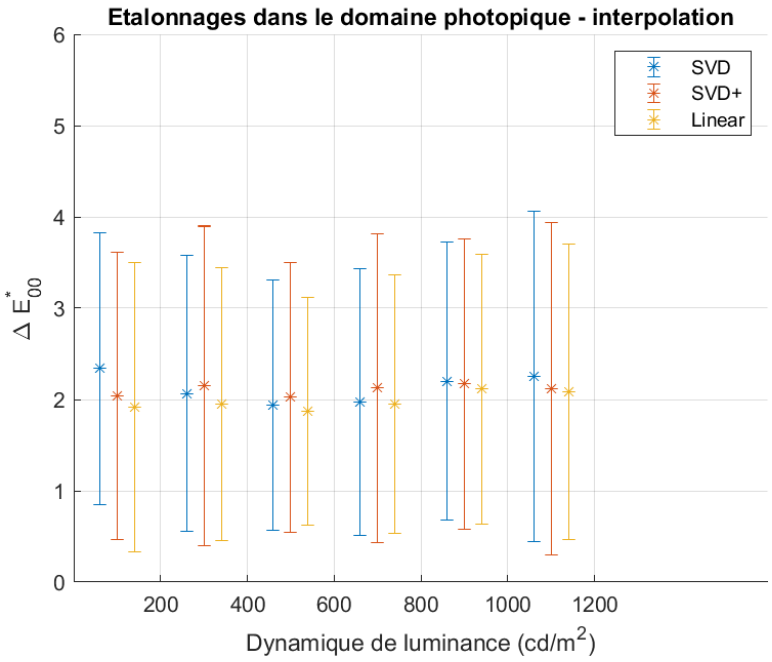


FIGURE 2.10 – Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - interpolation

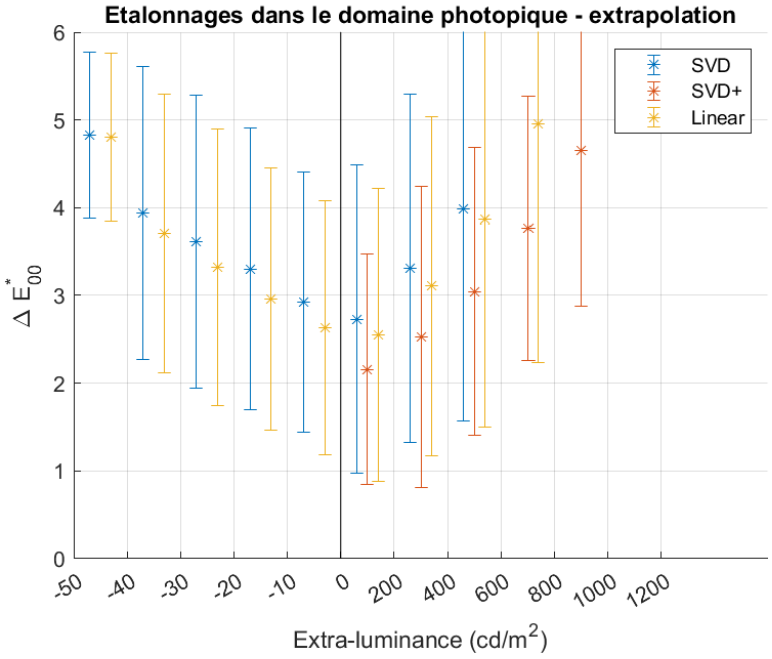


FIGURE 2.11 – Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de l'amplitude de l'extrapolation en luminance (extrapolations positive et négative)

2.3.2.2 Étalonnages colorimétriques dans le domaine mésopique

Dans cette sous-section, les étalonnages colorimétriques en vision mésopique sont réalisés selon deux approches. La première, issue de la littérature, consiste à effectuer un étalonnage de l'espace RVB de la caméra vers l'espace CIE-XYZ (2°), en calculant la métrique ΔE^*_{00} entre une couleur test C_{test} exprimée en LMSR et son équivalent photopique XYZr* dans l'espace CIE-XYZ (2°) selon le protocole de la section 2.3.1.3, puis son estimation XYZq issu de l'étalonnage colorimétrique. Les données de référence sont exprimées dans l'espace CIE-XYZ (2°) sans avoir subi l'étape d'équivalence photopique. Cela garantit que les outils de la littérature sont utilisés sans modification, et en particulier que la connaissance des couleurs dans l'espace LMSR n'est pas nécessaire.

La seconde approche consiste à réaliser l'étalonnage en s'appuyant sur l'espace LMSR ainsi que sur les extensions des outils de la littérature décrit en section 2.3.1.2 ; les différences colorimétriques étant calculées en appliquant le protocole décrit en section 2.3.1.3.

Dans cette sous-section, les métriques ΔE^*_{00} sont calculées de deux façons, qui diffèrent par le blanc de référence :

— soit pris directement comme le patch blanc présentant la luminance la plus élevée (voir dernière ligne de la Table 2.1. Ce cas est adapté à la situation d'une scène photopique contenant des zones mésopiques ne composant pas l'essentiel de la scène ;
— ou en lui appliquant un facteur de mise à l'échelle pour obtenir une luminance de 3 cd/m^2. Ce cas est adapté à une scène entièrement mésopique.

L'ensemble des Figures 2.12 à 2.16 présentent les différences colorimétriques moyennes et les écarts-types obtenus lorsque la palette CC24 est utilisée en référence et la palette PMC pour le test des modèles SVD, SVD+ et par interpolation tri-linéaire. La Figure 2.12 présente les résultats obtenus en interpolation lorsque les méthodes d'étalonnage mésopique sont utilisées, pour un blanc de référence de luminance 3 cd/m^2. Les Figures 2.13 et 2.14 (resp. 2.15 et 2.16) présentent les résultats en interpolation (resp. extrapolation) pour les méthodes d'étalonnage mésopique et photopique, avec un blanc de référence de luminance d'environ 1000 cd/m^2.

Premièrement, avec un blanc de référence de luminance 3 cd/m^2, seules les méthodes d'étalonnage mésopique en interpolation induisent des $DeltaE^*_{00}$ inférieurs à 5 (pour les modèles SVD, SVD+ et par interpolation tri-linéaire (voir Figure 2.12)). Plus la dynamique de luminance de la palette de référence est élevée, plus les différences colorimétriques sont faibles, avec une diminution de 0,91 (resp. 0,79, resp. 0,91) $DeltaE^*_{00}$ par cd/m² pour la méthode SVD (resp. SVD+, resp. interpolation tri-linéaire). La méthode d'interpolation tri-linéaire présente toutefois des différences colorimétriques moins élevées que les méthodes SVD et SVD+.

Lorsque le blanc de référence est fixé pour des niveaux lumineux photopiques, que ce soit en interpolation ou en, extrapolation les outils d'étalonnage colorimétrique de la littérature ainsi que les versions étendues vers l'espace LMSR garantissent des différences colorimétriques moins élevées mais qu'un observateur attentif pourrait percevoir ($\Delta E^*_{00} < 2$ - Mokrzycki and Tatol, 2011). Dans le domaine de l'interpolation, le passage par l'espace colorimétrique LMSR permet d'obtenir des différences colorimétriques plus faible que lorsque l'espace CIE-XYZ (2°) est utilisé : diminution de 250 / 270 / 320 % pour la méthode SVD / SVD+ / par interpolation tri-linaire (voir Figures 2.13 et 2.14). Dans le domaine de l'extrapolation, les résultats sont similaires (voir Figures 2.15 et 2.16). Lors d'extrapolations au-delà de la dynamique de luminance de la palette de référence, les différences colorimétriques augmentent, suivant une pente de 0,35 (ΔE^*_{00} par cd/m^2.

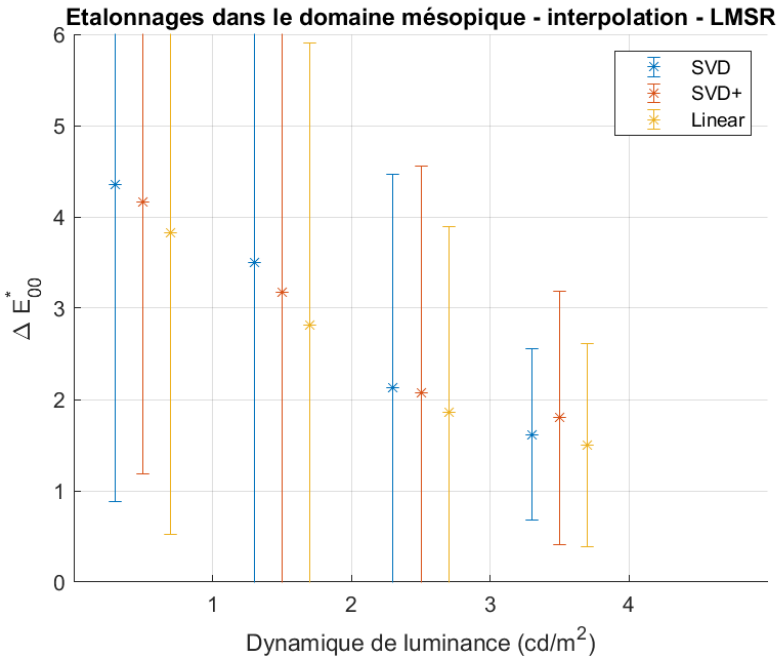


FIGURE 2.12 – Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - interpolation - étalonnages passant par l'espace LMSR pour un blanc de référence à 3 cd/m^2

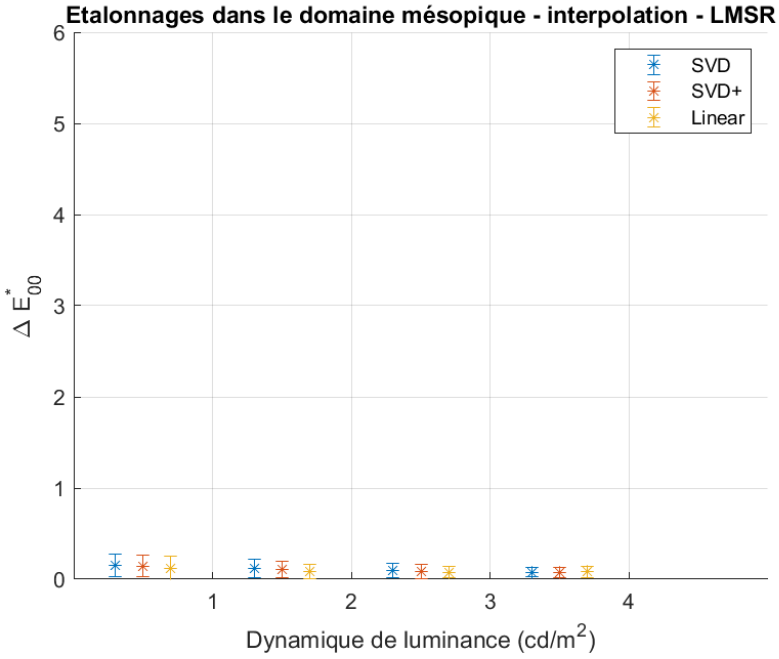


FIGURE 2.13 – Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - interpolation - étalonnages passant par l'espace LMSR pour un blanc de référence à environ 1000 cd/m^2.

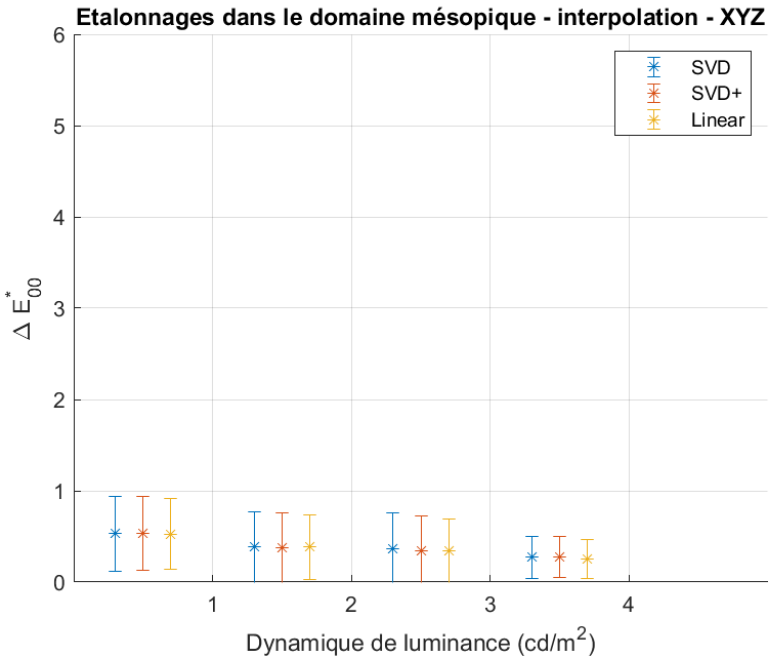


FIGURE 2.14 – Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - interpolation - étalonnages passant par l'espace CIE-XYZ (2°) pour un blanc de référence à environ 1000 cd/m^2

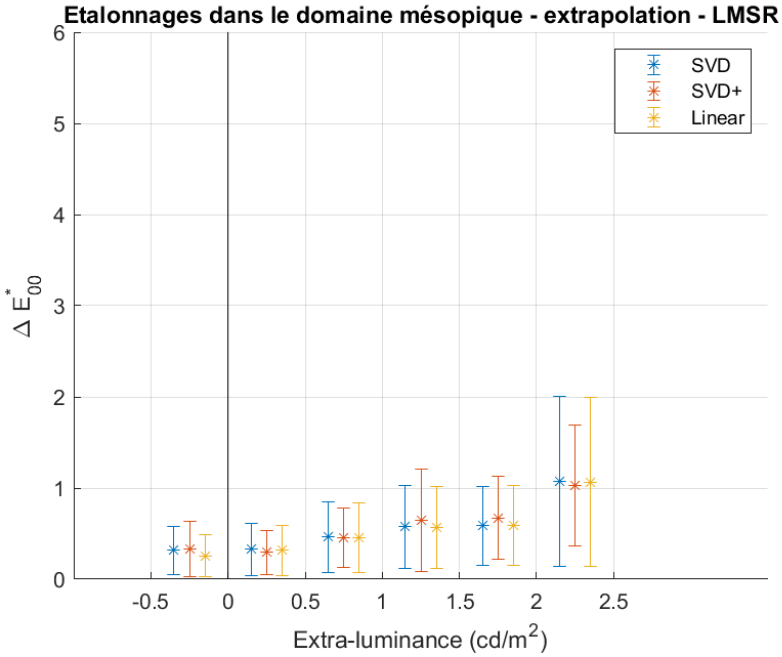


FIGURE 2.15 – Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - extrapolations négative et positive - étalonnages passant par l'espace LMSR pour un blanc de référence à environ 1000 cd/m^2

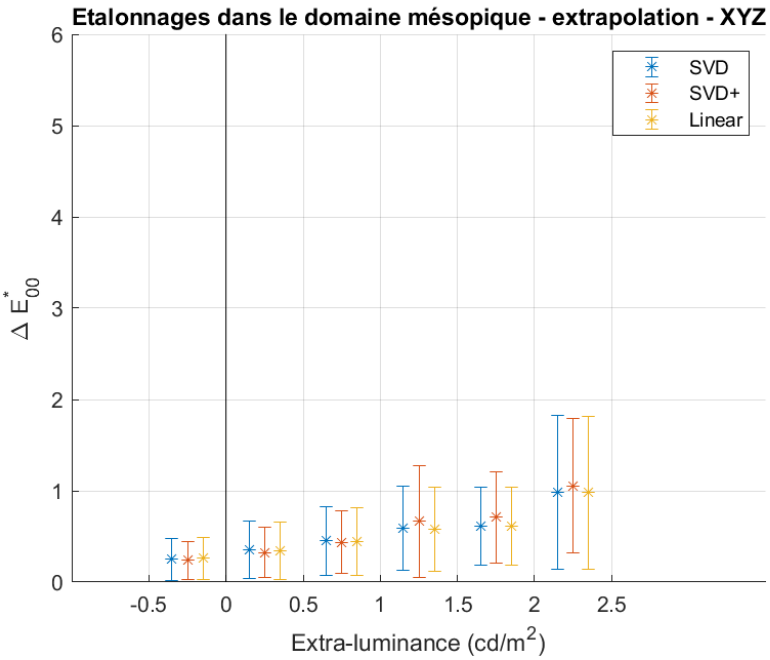


FIGURE 2.16 – Valeurs moyennes et écarts-types des différences colorimétriques ΔE^*_{00} obtenues en fonction de la dynamique de luminance de la palette de référence - extrapolations négative et positive - étalonnages passant par l'espace CIE-XYZ (2◦) pour un blanc de référence à environ 1000 cd/m^2

2.3.2.3 Étalonnages colorimétriques dans les domaines photopique et mésopique

Cette section utilise un jeu de données combinant niveaux lumineux photopiques et mésopiques ($BDD_{photo+meso}$). D'abord, les palettes photopiques servent à construire les modèles d'étalonnage, tandis que les palettes mésopiques sont utilisées pour les tests. Ensuite, l'inverse est réalisé : une palette mésopique sert de référence et les tests exploitent les palettes photopiques.

Lorsque l'on utilise une palette photopiques avec un blanc de référence fixé à environ 1000 cd/m^2, les différences colorimétriques obtenues par les méthodes SVD ou par interpolation tri-linéaire induisent des ΔE^*_{00} inférieurs à 5. Ce n'est pas le cas lorsque le niveau lumineux du blanc de référence est fixé à 3 cd/m^2.

Lorsqu'une palette mésopique est utilisée comme référence, les différences colorimétriques des couleurs photopiques induisent des ΔE^*_{00} supérieurs à 5, indépendamment du niveau lumineux du blanc de référence, de la méthode (SVD, SVD+ ou par interpolation tri-linéaire) et de l'espace utilisé (LMSR ou CIE-XYZ (2°)).

2.4 Étude pour des scènes comportant plusieurs sources de caractéristiques spectrales différentes - environnements photopiques

Cette section présente une synthèse des expériences menées lors du stage de Master 2 qui a été encadré durant la thèse, intitulé « Étalonnage colorimétrique d'images de scènes comprenant plusieurs sources » et présenté par DESSENNE Elisa le 4 septembre 2024.

Il s'agit de déterminer si réaliser des étalonnages colorimétriques via l'enrichissement de données (un triplet RVB capturé de façon native, et un second en utilisant un filtre coloré) est bénéfique dans le cas de scènes photopiques comportant des sources lumineuses de caractéristiques spectrales différentes. Pour ce faire, la section 2.4.1.1 décrit les acquisitions réalisées afin de constituer un jeu de données de référence enrichies ; la section 2.4.1.2 explicite l'adaptation des outils d'étalonnage colorimétrique de la littérature. Enfin, la section 2.4.2 présente les résultats de l'expérience.

2.4.1 Matériels et méthodes

2.4.1.1 Acquisition des jeux de données

La base de données construite dans cette étude utilise le même protocole que celui décrit en section 2.2.1.1, à l'exception d'acquisitions RVB complémentaires en positionnant successivement deux filtres colorés devant l'objectif de la caméra. Leurs transmittances spectrales sont représentées en Figure 2.17. Ainsi, trois photographies HDR sont réalisées pour chaque palette de patchs colorés (voir Figure 2.18). Les niveaux lumineux mesurés sont indiqués dans la Table 2.3. L'idée principale consiste à réaliser des étalonnages colorimétriques entre l'espace enrichi RVB_1 RVB_2 (6D) vers l'espace CIE-XYZ (2°) (3D).

Afin d'évaluer l'efficacité des méthodes proposées dans le cas de mélanges de sources lumineuses à différents niveaux lumineux, les données issues des différentes sources ont été combinées de façon synthétique. Cette démarche est appliquée dans l'espace RVB linéarisé au préalable :

$$\begin{cases} RVB_{Si(a)+Sj(b)} = RVB_{Si(a)} + RVB_{Sj(b)} \\ XYZ_{Si(a)+Sj(b)} = XYZ_{Si(a)} + XYZ_{Sj(b)} \end{cases} \tag{2.21}$$

où : $RVB_{Si(a)+Sj(b)}$ (resp. $XYZ_{Si(a)+Sj(b)}$) correspond au triplet RVB (resp. XYZ) obtenu lorsque la palette est éclairée à la fois par les sources Si et Sj pour les niveaux lumineux respectifs a et b ; $RVB_{Si(a)}$ (resp. $XYZ_{Si(a)}$) correspond au triplet RVB mesurés (resp. XYZ acquis) en utilisant la source Si à un niveau lumineux a.

Les acquisitions ont permis de construire un jeu de données comportant les triplets RVB natifs, ceux acquis en utilisant les filtres colorés « rouge » et « orange », et les données colorimétriques de l'espace CIE-XYZ (2°).

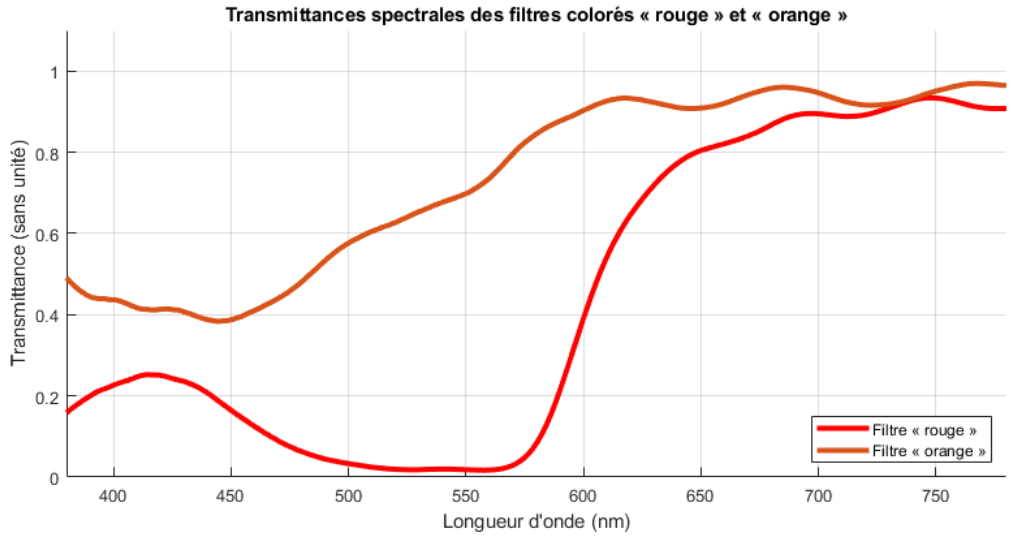


FIGURE 2.17 – Transmittances spectrales des filtres colorés utilisés lors des expériences portant sur les étalonnages 6D vers 3D. Les mesures ont été réalisées dans la configuration géométrique suivante : $\theta_{in} = 0$, $\phi_{in} = 0$, $\theta_{out} = 45$ et $\phi_{out} = 0$



(a) Deux palettes de patchs colorés capturées nativement par la caméra

(b) Deux palettes de patchs colorés capturées par la caméra devant laquelle le filtre « rouge » a été positionné

(c) Deux palettes de patchs colorés capturées par la caméra devant laquelle le filtre « orange » a été positionné

FIGURE 2.18 – Photographies de deux palettes de patchs colorés capturées nativement par la caméra, et au travers des filtres « rouge » et « orange »

Niveau de consigne (nombre)	Luminance : patch le plus clair - sombre (cd/m^2) Source S1	Source S2	Source S3
10	123 - 4.45	128 - 4.63	93.1 - 3.36
50	643 - 23.3	654 - 23.6	469 - 17.0
100	1270 - 46.1	1280 - 46.3	916 - 33.1

TABLE 2.3 – Niveaux de luminance pour chaque consigne des sources LED

2.4.1.2 Extension des outils d'étalonnage colorimétrique - 6D vers 3D

Pour les outils d'étalonnage colorimétrique globaux, le système général (2.4) est réécrit de façon à prendre en compte six composantes RVB, le premier triplet correspondant au triplet capturé nativement avec la caméra, le second à celui capturé en positionnant devant l'objectif un filtre coloré (« rouge » ou « orange ») :

$$\begin{cases} min\{\sum_{k=1}^{N} E(XYZ_r(k), XYZ_c(k))\} \\ XYZ_c(k) = M * \rho(R_{1c}(k), V_{1c}(k), B_{1c}(k), R_{2c}(k), V_{2c}(k), B_{2c}(k)) \end{cases} \tag{2.22}$$

où : M est une matrice 3 x n ; $\rho(R_{1c}(k), V_{1c}(k), B_{1c}(k), R_{2c}(k), V_{2c}(k), B_{2c}(k))$ est un vecteur n x 1 ; $XYZ_r(k)$ (resp. $XYZ_c(k)$) est le triplet de référence (resp. calculé par le modèle d'étalonnage) qui est associé au vecteur $\rho(R_{1c}(k), V_{1c}(k), B_{1c}(k), R_{2c}(k), V_{2c}(k), B_{2c}(k))$; $E(.,.)$ est une erreur, par exemple l'erreur quadratique moyenne (MSE).

Dans cette étude nous résolvons le problème (2.22) en utilisant l'erreur quadratique moyenne et en utilisant les vecteurs ρ suivant :
- $\rho_{SVD}(R_1, V_1, B_1, R_2, V_2, B_2) = [R_1, V_1, B_1, R_2, V_2, B_2]$ - noté SVD ;
- $\rho_{SVD+}(R_1, V_1, B_1, R_2, V_2, B_2) = [R_1, V_1, B_1, R_2, V_2, B_2, 1]$ - noté SVD+.

Concernant les outils locaux qui utilisent les interpolateurs tri-linéaire et splines, il est nécessaire de les adapter à la dimension de l'espace de départ (6). En effet, ces derniers s'appuient sur des calculs de distance afin d'appliquer des pondérations (voir section 2.1). Pour cette étude les travaux de Menesatti et al. (2012) sont adaptés à des espaces de départ de dimension 6 (la méthode par interpolation linéaire ne sera pas étudiée car elle nécessite d'effectuer un partitionnement de l'espace en simplexes de dimension 6, ce qui demande une quantité de mémoire élevée et induit un temps de calcul allongé, rendant la méthode peu praticable). Pour ce faire une nouvelle distance est définie :

$$\begin{cases} d(r_{qk}) = 2.(r_{qk})^2.log(r_{qk} + \epsilon) \\ r_{qk} = \sqrt{(R_1^q - R_1^k)^2 + (V_1^q - V_1^k)^2 + (B_1^q - B_1^k)^2 + (R_2^q - R_2^k)^2 + (V_2^q - V_2^k)^2 + (B_2^q - B_2^k)^2} \end{cases} \tag{2.23}$$

où : R_1^q / V_1^q / B_1^q (resp. R_2^q / V_2^q / B_2^q) correspondent aux coordonnées R, V et B de l'espace colorimétrique RVB à nu (resp. acquis en utilisant le filtre coloré « rouge » ou « orange ») associé au point noté « q » ; ϵ est une quantité très petite pour éviter un logarithme infini.

L'expression suivante permet l'estimation colorimétrique Menesatti et al. (2012) :

$$\begin{cases} Xq = \alpha_X.Rq + \beta_X.Vq + \gamma_X.Bq + \sum_k \delta_{X,k}.d(r_{qk}) \\ Yq = \alpha_Y.Rq + \beta_Y.Vq + \gamma_Y.Bq + \sum_k \delta_{Y,k}.d(r_{qk}) \\ Zq = \alpha_Z.Rq + \beta_Z.Vq + \gamma_Z.Bq + \sum_k \delta_{Z,k}.d(r_{qk}) \end{cases} \tag{2.24}$$

où : XYZq = [Xq, Yq, Zq] correspond au résultat de l'étalonnage colorimétrique ; $d(r_{qk})$ correspond à la relation 2.23 entre le six-uplet à étalonner noté « q » et celui de référence noté « k » (k $\in$ 1,...,N) ; les coefficients $\alpha_{X/Y/Z}$, $\beta_{X/Y/Z}$, $\gamma_{X/Y/Z}$ et $\delta_{X/Y/Z,k}$ sont déterminés à l'avance à partir de la structure de référence.

Finalement, l'outil d'étalonnage colorimétrique local par splines nécessite une adaptation afin de pouvoir réaliser des extrapolations. La procédure suivante est appliquée :

- identifier les extrema du canal R (resp. V, resp. B) liés à la photographie obtenue native, notés $R_{1,min}$ et $R_{1,max}$ (resp. $V_{1,min}$, $V_{1,max}$, resp. $B_{1,min}$ et $B_{1,max}$) ;
- identifier les extrema du canal R (resp. V, resp. B) liée à la photographie obtenue avec un filtre coloré, notés $R_{2,min}$ et $R_{2,max}$ (resp. $V_{2,min}$, $V_{2,max}$, resp. $B_{2,min}$ et $B_{2,max}$) ;
- à partir des données de référence $((RVB_1, RVB_2)_{ref}, (XYZ)_{ref})$ construire un modèle d'étalonnage colorimétrique global $(G : [R_1, V_1, B_1, R_2, V_2, B_2] \mapsto [X, Y, Z])$;
- en utilisant le modèle G, réaliser l'étalonnage colorimétrique de l'hyperrectangle ayant les sommets définis à partir des coordonnées :
  - $\{R_{1,min}, R_{1,max}\}$ - dimension R_1 ;
  - $\{V_{1,min}, V_{1,max}\}$ - dimension V_1 ;
  - $\{B_{1,min}, B_{1,max}\}$ - dimension B_1 ;
  - $\{R_{2,min}, R_{2,max}\}$ - dimension R_2 ;
  - $\{V_{2,min}, V_{2,max}\}$ - dimension V_2 ;
  - $\{B_{2,min}, B_{2,max}\}$ - dimension B_2.
- définir un jeu de données enrichi en ajoutant au jeu de données de référence $((RVB_1, RVB_2)_{ref}, (XYZ)_{ref})$ celui lié à l'hyperrectangle $((RVB_1, RVB_2)_{hyperrect}, (XYZ)_{hyperrect})$;
- construire le modèle d'étalonnage local à partir du jeu de données enrichi.

2.4.2 Résultats

Les résultats sont présentés suivant le domaine d'étude (interpolation ou extrapolation). Cependant il est nécessaire de définir ce qui est considéré comme extrapolation puisque l'espace considéré est de dimension 6. Dans les travaux présentés dans cette section les six-uplets dont le triplet RVB observé nativement est en extrapolation dans l'espace colorimétrique de la caméra (3D) sont considérés en extrapolation.

L'ensemble des résultats présentés dans cette section sont réalisés, pour la construction du modèle, en utilisant tous les patchs colorés d'une palette (CC24 ou PMC) à l'exception d'un ; le patch retiré étant ensuite utilisé pour le test du modèle. Cette procédure est répétée autant de fois qu'il y a de patchs colorés composant la palette. Finalement, les moyennes et écarts-types sont calculés pour l'ensemble des combinaisons des sources lumineuses et l'ensemble des patchs colorés utilisés pour les tests.

Les paramètres libres liés au calcul de ΔE^*_{00} (Kh, Kl et Kc) sont pris égaux à l'unité. Le blanc de référence est déterminé, pour une source donnée, comme le triplet XYZ associé au patch blanc le plus lumineux (voir Table 2.3 pour les valeurs des luminances). Enfin, comme précédemment, seuls les résultats pour lesquels les ΔE^*_{00} inférieurs à cinq sont présentés (dans le cas contraire, une différence visuelle est perçue).

La sous-section 2.4.2.1 présente les différences colorimétriques (ΔE^*_{00}) obtenues dans deux cas. Dans le premier, le modèle est créé à partir d'une palette éclairée successivement par deux sources, puis appliqué à un patch testé sous l'une des sources. Dans le second, le même modèle est appliqué à un patch testé sous un mélange synthétique des deux sources utilisées lors de la création.

En tant que test unitaire, des étalonnages colorimétriques ont été réalisés en créant un modèle utilisant une source, et appliqué à une autre source. Dans ce cas, seule l'utilisation du filtre « rouge » permet d'obtenir de (ΔE^*_{00}) inferieurs à 5, en interpolation uniquement (4.28 ; PMC SVD / SVDp / Splines : 3.47 / 4.72 / 3.99).

2.4.2.1 Deux sources pour créer le modèle et une des deux sources pour les tests

Les Tables 2.4 et 2.5 présentent les différences colorimétriques moyennes et les écarts-types obtenus dans les domaines de l'interpolation et de l'extrapolation par les outils SVD, SVD+ et par interpolation par splines (3D et 6D), dans le cas où deux sources sont utilisées pour créer le modèle (la palette de patchs colorés est éclairée successivement par les deux sources), et que son test utilise l'une des deux sources.

Premièrement, indépendamment de la palette de patchs colorés (CC24 ou PMC), du type de modèle, du filtre coloré et du domaine d'étalonnage (interpolation ou extrapolation), les résultats sont meilleurs lorsque deux triplets RVB (6D) sont utilisés, plutôt qu'un seul (3D).

De plus, indépendamment de la palette de patchs colorés (CC24 ou PMC), du filtre coloré et du domaine d'étalonnage (interpolation ou extrapolation), les résultats obtenus avec les interpolations par splines en 6D sont les meilleurs, avec en moyenne des différences ΔE^*_{00} de 3.08 contre 3.88 et 3.25 pour les modèles SVD 6D et SVD+ 6D.

D'un point de vue opératoire, l'utilisation du filtre coloré « rouge » induit des différences colorimétriques moins élevées comparativement au filtre coloré « orange » (2.80 // 3.80).

		Filtre « rouge »		Filtre « orange »	
Méthode		CC24	CCPMC	CC24	CCPMC
SVD	3D	X	4.52 (2.73)	X	4.52 (2.73)
	6D	2.75 (2.04)	2.55 (1.56)	3.91 (2.70)	3.92 (3.22)
SVD+	3D	X	4.68 (4.53)	X	4.68 (4.53)
	6D	3.11 (2.53)	2.96 (2.07)	4.51 (4.31)	4.45 (4.87)
Splines	3D	3.91 (2.11)	3.71 (2.29)	3.91 (2.11)	3.71 (2.29)
	6D	2.71 (1.58)	2.49 (1.72)	2.89 (1.72)	2.68 (2.17)

TABLE 2.4 – Différences colorimétriques moyennes ΔE^*_{00} (et écarts-types) pour un modèle construit utilisant les données colorimétriques provenant de deux sources lumineuses et réalisant l'étalonnage colorimétrique pour une scène éclairée par l'une des deux sources - interpolation

		Filtre « rouge »		Filtre « orange »	
Méthode		CC24	CCPMC	CC24	CCPMC
SVD	3D	X	4.85 (2.82)	X	4.85 (2.82)
	6D	3.67 (2.05)	2.70 (1.57)	X	X
SVD+	3D	X	X	X	X
	6D	4.95 (4.62)	3.32 (2.12)	X	X
Splines	3D	4.42 (3.65)	4.18 (3.75)	4.42 (3.65)	4.18 (3.75)
	6D	2.69 (2.25)	3.14 (3.44)	3.93 (3.60)	4.10 (4.15)

TABLE 2.5 – Différences colorimétriques moyennes ΔE^*_{00} (et écarts-types) pour un modèle construit utilisant les données colorimétriques provenant de deux sources lumineuses et réalisant l'étalonnage colorimétrique pour une scène éclairée par une des deux sources - extrapolation

2.4.2.2 Deux sources pour créer le modèle et un mélange des sources pour les tests

Les Tables 2.4 et 2.5 présentent les différences colorimétriques moyennes et les écarts-types obtenus dans les domaines de l'interpolation et l'extrapolation par les modèles SVD, SVD+ et par interpolation par splines (3D et 6D) dans le cas où deux sources sont utilisées pour créer le modèle (la palette de patchs colorés est éclairée successivement par les deux sources), et que son test utilise un mélange (synthétique) des deux sources.

Premièrement, indépendamment de la palette de patchs colorés (CC24 ou PMC), du type de modèle (SVD, SVD+ ou interpolation par splines), du filtre coloré et du domaine d'étalonnage (interpolation ou extrapolation), les outils utilisant deux triplets RVB (6D) induisent des différences colorimétriques moins élevés que ceux n'utilisant qu'un triplet (3D).

De plus, en interpolation, indépendamment de la palette de patchs colorés (CC24 ou PMC) et du filtre coloré, les étalonnages colorimétriques réalisés en 6D induisent des différences colorimétriques similaires, avec en moyenne des différences ΔE^*_{00} pour les méthodes SVD 6D / SVD+ 6D / splines 6D de 2.35 / 2.42 / 2.39. Cependant, dans le domaine de l'extrapolation, les outils de type SVD 6D et SVD+ 6D induisent de plus faibles différences colorimétriques que l'outil par interpolation par splines, avec en moyenne des différences ΔE^*_{00} pour les méthodes SVD 6D / SVD+ 6D de 2.17 / 2.28 et 3.08 pour l'interpolation par splines.

Finalement, d'un point de vue opératoire, l'utilisation du filtre coloré « rouge » induit des différences colorimétriques moins élevées comparativement à l'utilisation du filtre coloré « orange » (2.26 // 2.63).

Méthode		Filtre « rouge »		Filtre « orange »	
		CC24	CCPMC	CC24	CCPMC
SVD	3D	3.07 (1.56)	2.86 (1.82)	3.07 (1.56)	2.86 (1.82)
	6D	2.21 (1.27)	2.02 (1.77)	2.78 (1.94)	2.37 (1.41)
SVD+	3D	2.85 (1.37)	2.38 (1.39)	2.85 (1.37)	2.38 (1.39)
	6D	2.31 (1.20)	2.09 (1.29)	2.89 (1.85)	2.38 (1.40)
Splines	3D	2.70 (1.60)	2.23 (1.38)	2.70 (1.60)	2.20 (1.41)
	6D	2.48 (1.49)	2.37 (1.36)	2.36 (1.50)	2.34 (1.61)

TABLE 2.6 – Différences colorimétriques moyennes ΔE^*_{00} (et écarts-types) pour un modèle construit utilisant les données colorimétriques provenant de deux sources lumineuses et réalisant l'étalonnage colorimétrique pour une scène éclairée par un mélange des deux sources - interpolation

Méthode		Filtre « rouge »		Filtre « orange »	
		CC24	CCPMC	CC24	CCPMC
SVD	3D	3.04 (1.52)	2.55 (1.56)	3.04 (1.52)	2.55 (1.56)
	6D	1.94 (1.23)	1.77 (0.99)	2.57 (2.29)	2.4 (1.7)
SVD+	3D	3.16 (1.63)	2.72 (1.51)	3.17 (1.62)	2.72 (1.51)
	6D	1.98 (1.16)	1.93 (1.04)	2.68 (2.14)	2.53 (1.64)
Splines	3D	3.54 (2.44)	3.59 (2.23)	3.54 (2.44)	3.49 (2.18)
	6D	3.32 (2.17)	2.74 (1.69)	3.26 (2.00)	2.99 (1.88)

TABLE 2.7 – Différences colorimétriques moyennes ΔE^*_{00} (et écarts-types) pour un modèle construit utilisant les données colorimétriques provenant de deux sources lumineuses et réalisant l'étalonnage colorimétrique pour une scène éclairée par un mélange des deux sources - extrapolation

2.5 Discussion

2.5.1 Contributions

2.5.1.1 Expérience sur l'amélioration des protocoles d'acquisition des étalonnages colorimétriques - conditions photopiques

Dans cette expérience, deux bases de données ont été construites. La première est composée de triplets RVB acquis à l'aide d'une caméra numérique et de triplets provenant de l'espace CIE-XYZ (2°). La seconde substitue aux triplets RVB mesurés, des triplets synthétiques, simulés numériquement à partir des caractéristiques spectrales des sources, des matériaux, et de la caméra numérique. Ces bases de données contiennent des informations colorimétriques provenant de trois palettes de patchs colorés éclairées par quatre sources LED pilotées selon 11 niveaux lumineux photopiques.

Durant l'expérience, des comparaisons (au sens de la métrique ΔE^*_{00}) ont été effectuées entre les outils de l'état de l'art (outils globaux : SVD, SVD+, SVD^2 et SVD3 ; outils locaux : par interpolations tri-linéaires ou splines) dans une variété de scénarios, en fonction :

1. de la nature des données (données réelles ou synthétiques) ;
2. du nombre de patchs colorés de la palette (palette de 24 ou 96 patchs colorés) ;
3. de l'usage de données provenant d'une palette éclairée à un contre deux niveaux lumineux.

Les points saillants identifiées sont les suivants :

1. utiliser des données synthétiques n'est pas envisageable, car les résultats induits sont alors significativement meilleurs que ceux obtenus avec des données réelles ;
2. utiliser une palette disposant d'un plus grand nombre de patchs colorés ne permet pas d'améliorer les résultats ;
3. utiliser des données issues d'une palette de patchs colorés éclairée à deux niveaux lumineux élargit le domaine d'interpolation, ce qui réduit les différences colorimétriques à l'intérieur et à proximité de ce domaine.

2.5.1.2 Expérience sur les étalonnages colorimétriques dans le contexte de scènes urbaines nocturnes - une source

Dans cette expérience une base de données a été construite. Elle contient des informations colorimétriques (espaces RVB de la caméra, CIE-XYZ (2°) et LMSR (cônes et bâtonnets)) provenant de deux palettes de patchs colorés éclairées par quatre sources LED pilotées selon 11 (resp. 6) niveaux lumineux photopiques (resp. mésopiques). Afin de prendre en compte la vision mésopique, les outils de l'état de l'art ont été adaptés pour permettre des étalonnages colorimétriques de l'espace 3D RVB vers l'espace 4D LMSR.

Les outils SVD, SVD+ et par interpolations tri-linéaires (état de l'art et adaptations 3D vers 4D) ont été comparés dans plusieurs scénarios, en fonction :

1. du domaine d'étude (interpolation ou extrapolation) ;
2. des niveaux lumineux en jeu (niveaux photopiques ou mésopiques) ;
3. de l'usage de l'espace CIE-XYZ (2°) ou LMSR (pour les niveaux mésopiques exclusivement) ;
4. de l'usage de données provenant du domaine photopique pour réaliser l'étalonnage de scènes mésopiques, et inversement.

Dans le domaine photopique, les comparaisons ont été réalisées en utilisant la métrique ΔE^*_{00}. Dans le domaines mésopique, la métrique ΔE^*_{00} a été adaptée en implantant les travaux de Ashraf et al. (2022) qui s'appuient sur le modèle de Cao et al. (2008).

Il en ressort que :

— les méthodes et modèles permettant d'obtenir les meilleurs résultats diffèrent selon les niveaux lumineux considérés ;

— pour les niveaux lumineux photopiques, il s'agit d'utiliser les méthodes de la littérature, de l'espace RVB vers l'espace CIE-XYZ (2°)). Les méthodes (SVD, SVD+ et par interpolation tri-linéaire) présentent des comportements similaires dans le domaine de l'interpolation. En extrapolation vers les niveaux lumineux plus sombres, la méthode SVD est à privilégier ; vers les niveaux lumineux plus clairs, il s'agit de la méthode SVD+. De plus, l'utilisation de la méthode par SVD lors de l'enrichissement des données pour les méthodes locales est intéressant dans les niveaux lumineux sombre ;

— pour les niveaux lumineux mésopiques, les méthodes d'étalonnage colorimétriques étendues, de l'espace colorimétrique RVB vers l'espace LMSR, sont à privilégier. En interpolation, aucune méthode ne se distingue ; les résultats sont néanmoins dégradés pour les niveaux lumineux peu élevés, suggérant la présence de bruit dans les données.

2.5.1.3 Expérience sur les étalonnages colorimétriques dans le contexte de scènes photopiques multi-sources

Dans cette expérience, la base de données construite comporte des triplets RVB provenant d'une acquisition native à l'aide de la caméra, et d'acquisitions effectuées en positionnant un filtre coloré (« rouge » puis « orange ») devant l'objectif, ainsi que les triplets CIE-XYZ (2°) associés. Deux palettes de patchs colorés éclairées par trois sources LED pilotées selon 11 niveaux lumineux photopiques, ainsi que des données provenant d'éclairages mixtes (estimées par simulation) ont été utilisées. Dans l'objectif de réduire l'impact du métamérisme lors de scènes composées de plusieurs sources, les outils de l'état de l'art ont été adaptés pour permettre des étalonnages colorimétriques de l'espace 6D (RVB_{natif}, RVB_{filtre}) vers l'espace 3D CIE-XYZ (2°)).

Les outils SVD, SVD+ et par interpolation par splines (état de l'art et adaptations 6D vers 3D) ont été comparés (métrique ΔE^*_{00}) dans plusieurs scénarios, en fonction :

1. du domaine d'étude (interpolation ou extrapolation) ;
2. de l'usage d'outil 3D vers 3D ou 6D vers 3D ;
3. du filtre coloré utilisé lors de l'enrichissement de données (« rouge » ou « orange ») ;
4. du caractère multi-source de la scène.

Les résultats suggèrent que cette approche peut présenter un intérêt par rapport aux méthodes s'appuyant sur un unique triplet RVB.

2.5.2 Limites et perspectives

Les expériences menées présentent des limites. Tout d'abord, les acquisitions ont été effectuées selon une seule chaîne (une caméra numérique RVB et un protocole de traitement de données). Or, il pourrait être intéressant de réaliser des expériences similaires en utilisant différentes caméras RVB et en modifiant le protocole d'acquisition. Cette démarche pourrait consolider les résultats en analysant la sensibilité des méthodes au changement de paramètres. Par exemple, d'autres sources lumineuses présentes dans les scènes urbaines nocturnes (halogènes, sodium basse / haute pression, etc.), ainsi que des matériaux représentatifs (béton, bitume, ciment, etc.) pourraient être considérés. Enfin, le choix du filtre coloré utilisé dans la dernière expérience peut avoir un impact sur les résultats et pourrait être optimisé.

Des limites liées à l'analyse des résultats sont aussi à relever. Premièrement, lors des comparaisons entre les outils d'étalonnage colorimétrique dans le domaine mésopique, deux blancs de référence ont été sélectionnés de manière arbitraire pour le calcul des différences colorimétriques (niveaux lumineux d'environ 3 cd/m^2 et 1000 cd/m^2). Ce choix pourrait être affiné puisqu'il est possible de définir le niveau lumineux du blanc de référence de plusieurs façons. Par exemple, la luminance d'adaptation de l'œil, dont il existe des modèles d'estimation dans le contexte de scènes urbaines nocturnes (*e.g.* Uchida et al., 2016), pourrait être envisagée. De plus, les étalonnages colorimétriques dans le domaine mésopique ont été réalisés en utilisant les espaces CIE-XYZ (2◦) ou LMSR (cônes et bâtonnets) mais il pourrait également être envisageable de réaliser des étalonnages colorimétriques en utilisant l'espace XYZ équivalent photopique déterminé à partir de l'espace LMSR. Cependant, il est bon de rappeler que les outils d'étalonnage colorimétrique sont fondés à partir de l'hypothèse forte qui stipule qu'il existe une linéarité énergétique entre les espaces en jeu qui ne serait plus validée dès lors que l'espace XYZ équivalent photopique serait utilisé. Enfin, pour gérer les cas d'extrapolation, les données initiales ont été enrichies en utilisant la méthode par SVD pour définir un hypervolume englobant, cependant d'autres méthodes (e.g. SVD+) sont envisageables. Leur comparaison systématique pourrait apporter des conclusions robustes.

Lors de l'expérience portant sur les scènes comportant plusieurs sources lumineuses de caractéristiques spectrales différentes, les données utilisées pour construire les modèles d'étalonnage colorimétrique et pour leur test proviennent des mêmes palettes de patchs colorés. Il s'agit d'un contexte favorable. Il serait intéressant d'étudier - à l'instar des autres expériences réalisées - de quelle manière évoluent les résultats lorsque le test des modèles exploite une palette différente de celle utilisée pour sa construction.

2.6 Conclusion

Pour les études menées dans ce chapitre, des bases de données (triplets RVB et données colorimétriques associées) comprenant des niveaux lumineux photopiques et mésopiques ont été construites.

Plusieurs expériences ont alors été menées afin d'évaluer des outils d'étalonnage colorimétrique issus de l'état de l'art, et adaptés dans le cadre des différents contextes de notre étude. Une première expérience a été réalisée afin d'étudier la possibilité d'améliorer les protocoles d'acquisition lors des étalonnages colorimétriques. Une seconde expérience a été centrée sur la nature du domaine lumineux, photopique ou mésopique. Finalement, une dernière expérience a exploré la pertinence d'utiliser des données enrichies (un triplet RVB observé nativement et un second au travers d'un filtre coloré) dans le contexte d'une scène comportant plusieurs sources lumineuses, de caractéristiques spectrales différentes.

Finalement, la Table 2.8 fournit un récapitulatif des résultats présentés dans ce chapitre en fonction des hypothèses soulevées en section 2.1.

Description de l'hypothèse	Validation	Remarque
(H1) plus les points de référence sont proches les uns des autres, plus les méthodes d'étalonnage colorimétrique assurent une réduction des différences colorimétriques en interpolation et en extrapolation	Invalidée	Domaine d'étude : photopique
(H2) réaliser un jeu de données de référence à partir d'un même échantillon de points de références éclairés à deux niveaux lumineux est bénéfique (métrique ΔE^*_{00}) dans les domaines de l'interpolation et l'extrapolation	Validée	Domaine d'étude : photopique ; le gain reste minime par rapport à la lourdeur du protocole d'acquisition
(H3) puisque la majorité des outils d'étalonnage colorimétrique est fondée sur la linéarité des données RVB de la caméra, utiliser des données synthétiques pour l'évaluation fournit des résultats similaires à ceux produits lorsque des données provenant de photographies réelles sont utilisées	Invalidée	Domaine d'étude : photopique ; les étalonnages à partir de données synthétiques fournissent des différences colorimétriques plus faibles que lors de l'usage de données réelles
(H4) l'utilisation de l'espace LMSR (avec adaptation des outils d'étalonnage pour permettre des étalonnages de 3D vers 4D) permet de garantir de meilleurs résultats que lorsque l'on utilise l'espace CIE-XYZ (2°)	Validée	Domaine d'étude : photopique et mésopique ; pour le domaine photopique l'usage de l'espace LMSR n'améliore pas les résultats
(H5) dans le domaine de l'interpolation, les méthodes locales (interpolation tri-linéaire ou spline) sont plus performantes que la méthode par SVD	Invalidée	Domaine d'étude : photopique et mésopique
(H6) l'usage de données colorimétriques acquises dans un domaine de vision (photopique ou mésopique) ne détériore pas les estimations dans l'autre domaine	Invalidée	Que ce soit en utilisant des données issues du domaine photopique afin de réaliser des estimations dans le domaine mésopique (ou inversement), les différences colorimétriques ne sont pas acceptables
(H7) l'utilisation de données RVB provenant de deux observations distinctes (triplets RVB observés sans et au travers un filtre coloré) permet d'améliorer les résultats d'étalonnage	Validée	Domaine d'étude : photopique

TABLE 2.8 – Récapitulatif des hypothèses testés et de leurs validités - étalonnages colorimétriques

Chapitre 3

Étude des outils de reconstruction spectrale

Dans ce travail, deux façons d'obtenir des grandeurs photométriques et/ou radiométriques ont été identifiées. Premièrement, il est possible d'estimer des grandeurs photométriques via des étalonnages colorimétriques (voir Chapitre 2) qui présentent l'avantage de s'appuyer généralement sur une seule observation RVB. Cependant, ces méthodes présentent des limites lorsqu'une scène est éclairée simultanément par plusieurs sources lumineuses aux caractéristiques spectrales différentes, notamment en raison du phénomène de métamérisme. Une autre classe d'approches vise à estimer les luminances spectriques incidentes à la caméra, à partir de l'observation de plusieurs triplets RVB via, notamment, l'usage de filtres colorés positionnés devant l'objectif ; l'intégration de ces luminances spectriques, en tenant compte des fonctions de sensibilité spectrale, permet ensuite d'obtenir des grandeurs photométriques ou des indicateurs relatifs à la qualité de l'éclairage (*e.g.* UGR). Ce chapitre analyse ces approches, dites de reconstruction spectrale, en les appliquant au contexte spécifique de notre étude, à savoir les scènes urbaines nocturnes.

3.1 Objectifs, démarche scientifique et hypothèses

3.1.1 État de l'art

Cette section décrit des travaux liés aux méthodes de reconstruction spectrale, visant l'estimation de diverses grandeurs spectrales (e.g. transmittance spectrale d'un filtre $V(\lambda)$, réflectances spectrales de peaux, luminances spectriques). Pour faciliter la lecture, et sans perte de généralité, l'ensemble des méthodes seront présentées en considérant l'estimation de densités spectrales (notion générique) à partir d'observations RVB provenant d'une caméra numérique.

L'état de l'art propose deux catégories d'outils de reconstruction spectrale. La première vise à construire un modèle général à partir de données collectées en amont (voir sous-section 3.1.1.1). La seconde catégorie d'approches cherche à déterminer une densité spectrale qui, bien qu'éventuellement différente de la grandeur réelle, est métamère, c'est-à-dire que son intégration, en tenant compte des transmittances spectrales de la caméra et des filtres utilisés, produit des couleurs visuellement similaires à celles observées : ces approches s'appuient sur la résolution d'un problème inverse (voir sous-section 3.1.1.2). La sous-section 3.1.1.3 décrit les métriques couramment employées dans la littérature pour évaluer la fidélité des reconstructions spectrales. Enfin, un synoptique des approches de la littérature est fourni dans la Table 3.1 en fin de section.

3.1.1.1 Les outils utilisant des données déterminées en amont

La première catégorie d'outils s'appuie sur la connaissance d'une base de données permettant de relier la quantité spectrale que l'on souhaite estimer $((\lambda \mapsto L_e(k,\lambda))_{k\in\{1,...,N\}})$ à une ou plusieurs observations connues $((RVB(k))_{k\in\{1,...,N\}})$. L'objectif de ce type d'approche est d'identifier une relation (notée T) qui garantit, dans le cas idéal :

$$T(RVB(k)) = L_e(k,.), \qquad k \in \{1,...,N\} \tag{3.1}$$

où : $L_e(k,.)$ correspond à la luminance spectrique $\lambda \mapsto L_e(k,\lambda)$.

Les méthodes de reconstruction qui utilisent des données de références peuvent se scinder en deux sous-catégories. La première vise à déterminer un modèle matriciel M tel que, pour un vecteur décrivant l'ensemble des observations RVB (V_{RVB}), la luminance spectrique associée (L_e) puisse être estimée par :

$$L_e = M.V_{RVB} \tag{3.2}$$

La seconde sous-catégorie consiste à construire une interpolation entre les données de référence issues des observations $(V_{RVB}(k))_{k\in\{1,...,N\}}$ et les luminances spectriques associées $(\lambda \mapsto L_e(k,\lambda))_{k\in\{1,...,N\}}$. Usuellement l'interpolateur T est construit de façon à garantir :

$$T(V_{RVB}(k)) = L_e(k,.), \qquad k \in \{1,...,N\} \tag{3.3}$$

Les modèles matriciels peuvent être déterminés de plusieurs façons ; parmi les plus répandues, la méthode par pseudo-inverse consiste à calculer une matrice pseudo-inverse associée au système :

$$\begin{bmatrix} L_{e,ref}(1,\lambda(1)) & ... & L_{e,ref}(1,\lambda(p)) \\ ... & ... & ... \\ L_{e,ref}(N,\lambda(1)) & ... & L_{e,ref}(N,\lambda(p)) \end{bmatrix} = M. \begin{bmatrix} V_{ref}(1,1) & ... & V_{ref}(1,n) \\ ... & ... & ... \\ V_{ref}(N,1) & ... & V_{ref}(N,n) \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

où : $(V_{ref}(k))_{k\in\{1,...,N\}}$ correspond aux observations de référence dont les luminances spectriques $(\lambda \mapsto L_{e,ref}(k,\lambda))_{k\in\{1,...,N\}}$ sont connues ; $(\lambda(i))_{i\in\{1,...,p\}}$ décrit la plage de longueurs d'onde considéré ; $V_{ref}(k,j)$ correspond à la composante j associée à l'observation k.

Ainsi, en utilisant une matrice pseudo-inverse (notée $.^+$) il est possible de déterminer la matrice M par :

$$M = \begin{bmatrix} L_{e,ref}(1,\lambda(1)) & ... & L_{e,ref}(1,\lambda(p)) \\ ... & ... & ... \\ L_{e,ref}(N,\lambda(1)) & ... & L_{e,ref}(N,\lambda(p)) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_{ref}(1,1) & ... & V_{ref}(1,n) \\ ... & ... & ... \\ V_{ref}(N,1) & ... & V_{ref}(N,n) \end{bmatrix}^+ \tag{3.5}$$

Utiliser l'opérateur pseudo-inverse permet d'estimer un modèle qui minimise les différences quadratiques (au sens de la norme euclidienne) entre les luminances spectriques associées aux données de référence et celles reconstruites à partir du modèle matriciel. Cependant, il est possible de définir d'autre modèles matriciels en fonction de l'erreur que l'on souhaite minimiser. D'autres méthodes permettant la détermination de modèles matriciels sont listés dans les travaux de Shrestha et al. (2011).

Les méthodes visant à construire interpolation entre les données de départ ($(V_{RVB}(k))_{k\in\{1,...,N\}}$) et celles d'arrivée ($(\lambda \mapsto L_e(k,\lambda))_{k\in\{1,...,N\}}$) peuvent être construites de plusieurs façons. Par exemple, Wen et al. (2022b) utilisent l'interpolateur linéaire, construit à partir d'une pondération barycentrique dans l'espace de départ (V_{RVB}), également appliquée dans l'espace d'arrivée (L). Une autre façon de construire un interpolateur consiste à entrainer un réseau de neurones (*e.g.* Stiebel et al., 2018 ; Shrestha et al., 2011).

Finalement, il est possible d'adapter ces méthodes (matricielles ou par interpolation) en considérant des éléments de régularisation. Par exemple, dans l'étude présentée par Parmar et al. (2012), les auteurs ont décidé d'effectuer un changement de base en ne conservant que les vecteurs principaux afin de réduire les variations (bruit) susceptibles de provoquer des divergences lors de la création du modèle.

3.1.1.2 Les outils pour résoudre le problème inverse

La deuxième catégorie d'outils vise à résoudre le problème inverse induit par la reconstruction spectrale. Dans le cas d'un matériau caractérisé par sa réflectance spectrale $\lambda \mapsto \rho(\lambda)$, éclairé par une source de distribution spectrale $\lambda \mapsto Source(\lambda)$, et observé via le canal R d'une caméra RVB de transmittance spectrale $\lambda \mapsto F_R(\lambda)$, le problème inverse est formalisé par :

$$\begin{cases} argmin\{E((R(k))_{k\in\{1,...,N\}}, (\tilde{R}(k))_{k\in\{1,...,N\}}), \qquad L_e\} \\ \tilde{R}(k) = \int F_R(\lambda).\rho(\lambda).Source(\lambda).d\lambda \\ L_e(\lambda) = \rho(\lambda).Source(\lambda), \qquad \forall\lambda \end{cases} \tag{3.6}$$

où : $R(k)$ (resp. $\tilde{R}(k)$) correspond à une observation réelle (resp. estimée par calcul) du canal R issue d'une caméra RVB ; $\lambda \mapsto L_e(\lambda)$ est la luminance spectrique que l'on souhaite déterminer. Note : il est possible de définir de façon similaire un problème inverse incluant d'autres observations, par exemple les canaux vert et rouge de la caméra RVB, ainsi que des observations RVB obtenues à travers des filtres colorés ; le système d'équation devient alors :

$$\begin{cases} argmin\{\sum_{i=0}^{N} E((R^i(k))_{k\in\{1,...,N\}}, (\tilde{R^i}(k))_{k\in\{1,...,N\}}), \qquad L_e\} \\ \tilde{R^i}(k) = \int f_i(\lambda).F_R(\lambda).\rho(\lambda).Source(\lambda).d\lambda \\ L_e(\lambda) = \rho(\lambda).Source(\lambda), \qquad \forall\lambda \end{cases} \tag{3.7}$$

où : $\lambda \mapsto f_0(\lambda)$ correspond à la fonction constante égale à l'unité, ce qui permet de conserver l'observation native de la caméra ; $\lambda \mapsto f_i(\lambda)$ ($i \in \{1, ..., N\}$) correspond à la transmittance spectrale du filtre coloré indicé i.

Il existe un grand nombre de méthodes de reconstruction spectrale destinées à apporter une solution au problème inverse. La Table 3.1 en référence plusieurs. Dans ce travail, la méthode par splines sera exploitée, et est explicitée en sous-section 3.2.1.2.

3.1.1.3 Métriques utilisées dans les reconstructions spectrales

Les deux catégories d'outils de reconstruction spectrale ne nécessitent pas les mêmes données. En effet, la première catégorie requiert la connaissance d'une base de données reliant les observations RVB $((RVB(k))_{k\in\{1,...,N\}})$ à des luminances spectriques de référence $((\lambda \mapsto L_e(k,\lambda))_{k\in\{1,...,N\}})$. Pour la résolution du système inverse, il est nécessaire de connaître l'ensemble des caractérisations spectrales du système d'observation, c'est-à-dire les transmittances spectrales $\lambda \mapsto F_R(\lambda)$, $\lambda \mapsto F_V(\lambda)$ et $\lambda \mapsto F_B(\lambda)$ ainsi que les éventuelles transmittances spectrales des filtres colorés utilisés afin d'enrichir les observations $((\lambda \mapsto f_k(\lambda))_{k\in\{1,...,N\}})$.

Dans le contexte d'estimation de la luminance spectrique, l'état de l'art s'accorde sur l'utilisation de trois types de métriques pour évaluer les performances. Une première métrique vise à déterminer si la forme spectrale des luminances spectriques de référence et estimées sont similaires à un facteur multiplicatif prêt : on la note GFC pour *goodness of fit coefficient*. Le GFC varie entre 0 (spectres différents) et 1 (spectres identiques). Le calcul du GFC est réalisé via :

$$\begin{cases} GFC = \dfrac{A}{B.C} \\ A = \displaystyle\int L_{e,rec}(\lambda).L_{e,ref}(\lambda).d\lambda \\ B = (\displaystyle\int (L_{e,rec}(\lambda))^2.d\lambda)^{1/2} \\ C = (\displaystyle\int (L_{e,ref}(\lambda))^2.d\lambda)^{1/2} \end{cases} \tag{3.8}$$

où : $L_{e,ref}$ correspond à la luminance spectrique de référence que l'on souhaite estimer ; $L_{e,rec}$ est la luminance spectrique estimée lors de la reconstruction spectrale.

La deuxième métrique a pour objectif de déterminer si l'intégralité de la luminance spectrique estimée correspond à la luminance spectrique de référence, via soit le calcul de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), soit de l'erreur relative.

Enfin, une dernière métrique visant à déterminer si la reconstruction spectrale est fidèle d'un point de vue perceptif est souvent considérée. Généralement les métriques utilisées sont celles définies par la CIE : ΔE_{ab} et ΔE^*_{00}.

Méthode	Domaine de résolution	Nature des données	Nombre d'observations	Résultats GFC (%)	RMSE (%)	ΔE^*_{00}	Référence
Matrice - pseudo-inverse	400 à 700 nm (pas de 5 nm)	synthétiques	3 12	98.98 99.65	7.03 3.69	$\Delta E^*_{ab} = 1.54$ $\Delta E^*_{ab} = 0.15$	Valero et al. (2007)
Matrice - pseudo-inverse +régularisation	400 à 700 nm (pas de 10 nm)	réelles	24	X	X	X	Parmar et al. (2012)
Maloney (1992)	X	synthétiques avec bruit (2 %)	6	X	1.18	$\Delta E^*_{ab} = 0.40$	Shrestha et al. (2011)
Imai and Berns (1999)					1.14	$\Delta E^*_{ab} = 0.41$	
Morovic and Haneishi (2006)					1.16	$\Delta E^*_{ab} = 0.39$	
Réseau de neurones		réelles			3.74	$\Delta E^*_{ab} = 6.43$	
Interpolation - linéaire	400 à 700 nm (pas de 10 nm)	synthétiques	4	99.89	X	0.39	Wen et al. (2022b)
Interpolation - ACP*				99.85		0.45	
Problème inverse - splines	400 à 700 nm	réelles	33	X	X	X	Kirk and O'Brien (2011)
Problème inverse - statistiques de Bayes	380 à 780 nm	réelles	810	X	X	X	Martinsons and Hlayhel (2022)

TABLE 3.1 – Synthèse des résultats de la littérature portant sur l'utilisation des outils de reconstruction spectrale. * : Analyse en composantes principales

3.1.2 Objectifs

Compte tenu des objectifs de la thèse et des verrous scientifiques identifiés dans l'état de l'art, les objectifs de ce chapitre sont :

1. proposer et valider une méthode de reconstruction spectrale permettant d'obtenir des reconstructions suffisamment fidèles dans le contexte de scènes urbaines nocturnes ;
2. proposer et valider une méthode de reconstruction spectrale dont le temps de calcul est compatible avec une mise en œuvre opérationnelle ;
3. étudier la sensibilité d'une méthode de reconstruction spectrale en fonction du nombre de triplets RVB utilisés et de la qualité des données (rapport signal sur bruit).

3.1.3 Démarches et hypothèses

Dans le contexte de scènes urbaines nocturnes, une base de données contenant à la fois des données spectrales et des observations RVB n'est, à notre connaissance, pas encore disponible en libre accès. Comme le suggère l'état de l'art, l'outil de reconstruction par splines (dont l'objectif consiste à résoudre le problème inverse) semble adapté, mais n'a pas encore été validé dans le contexte de scènes urbaines nocturnes. Utiliser une méthode visant à résoudre le problème inverse permet une plus grande flexibilité / indépendance vis-à-vis d'un hypothétique jeu de données de référence. L'outil utilisant des splines présente l'avantage d'intégrer une régularisation, le rendant moins sensible au bruit que d'autres approches (*e.g.* méthode matricielle par pseudo-inverse). Ainsi, des comparaisons seront réalisées entre les luminances spectriques estimées par cet outil et les luminances spectriques de référence.

Les travaux présentés dans ce chapitre reposent sur de données synthétiques (c'est-à-dire provenant de calcul et non d'observations réelles). Un bruit a été ajouté afin de mieux reproduire les conditions d'un cas réel, où les observations RVB contiennent naturellement du bruit. Les observations RVB sont issues par un enrichissement utilisant des filtres colorés, ce qui permet d'obtenir 3x(N+1) observations RVB lorsque N filtres sont utilisés.

Les hypothèses suivantes sont testées dans la suite de ce chapitre :

(H1) moins le rapport signal sur bruit est élevé dans les observations RVB, plus il est nécessaire d'appliquer un niveau de régularisation élevé, afin de conserver le niveau similaire de fidélité de reconstruction (indicateurs GFC, RMSE et ΔE^*_{00}) ;

(H2) indépendamment du niveau de régularisation appliquée et du rapport signal sur bruit, plus le nombre de filtres colorés augmente, meilleure est la fidélité de la reconstruction spectrale.

Implicitement, l'étude de ces hypothèses permettra de tirer des conclusions sur l'impact du domaine lumineux considéré pour la reconstruction spectrale, qu'il soit photopique ou mésopique. Ce dernier est susceptible de présenter un rapport signal sur bruit moins élevé, sauf à augmenter le temps d'intégration de la caméra, ce qui allonge la durée de l'acquisition.

3.2 Méthode de reconstruction par splines : proposition d'une formulation matricielle et étude de sensibilité

L'objectif de cette section est double : *i*) proposer une formulation matricielle d'une méthode de reconstruction spectrale par splines, dans l'objectif de réduire son temps de calcul tout en garantissant l'identification du minimum global du problème inverse, afin de rendre la méthode utilisable en contexte opérationnel ; et *ii*) effectuer une étude de sensibilité de ses paramètres afin d'étudier leur influence sur la fidélité de reconstruction vis-à-vis des indicateurs GFC, RMSE et ΔE^*_{00}. La sous-section 3.2.1 décrit la création des jeux de données qui seront utilisés en sous-section 3.2.2 afin de mener l'étude de sensibilité. La sous-section 3.2.1.3 présente la formulation matricielle proposée.

3.2.1 Matériels et méthodes

3.2.1.1 Création des jeux de données

Des luminances spectriques provenant de la réflexion d'un matériau éclairé par une source ont été mesurées via un spectroradiomètre (modèle JETI Specbos 1211UV-2), comme illustré sur la Figure 3.1. Ensuite, des données RVB enrichies (observations par la caméra, nativement et au travers de N filtres colorés positionnés devant l'objectif) sont obtenues par calcul, en s'appuyant sur les transmittances spectrales qui caractérisent les filtres de la caméra RVB (notés respectivement $\lambda \mapsto F_R(\lambda)$, $\lambda \mapsto F_V(\lambda)$ et $\lambda \mapsto F_B(\lambda)$) et les transmittances spectrales des filtres colorés (notés $(\lambda \mapsto F(k,\lambda))_{k\in\{1,\dots,N\}}$).

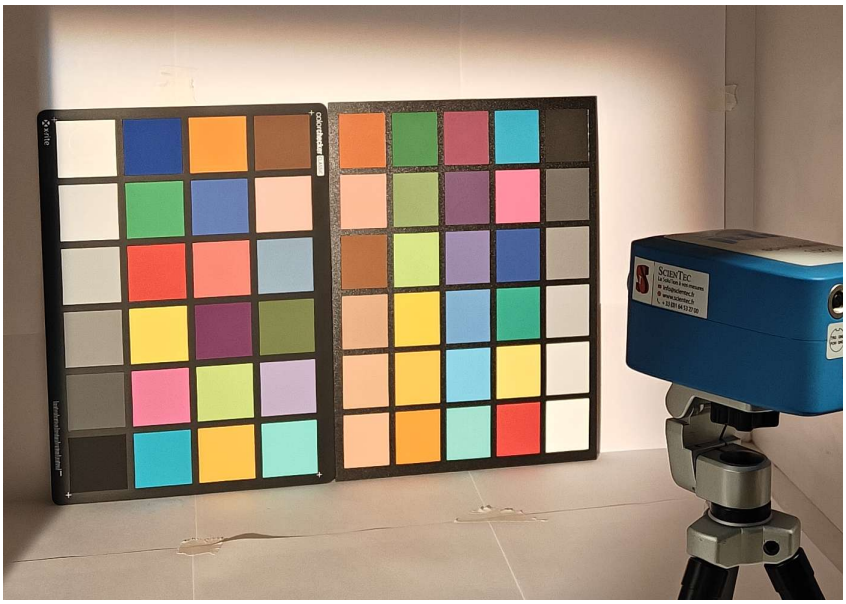


FIGURE 3.1 – Photographie du montage mis en place afin de réaliser les acquisitions spectrales (luminances spectriques) des matériaux éclairés par une ou deux sources lumineuses

Deux palettes d'échantillons colorés (CC24 et PMC, présentées sur la Figure 2.2 du chapitre 2) ont été éclairées par trois sources lumineuses (allumées alternativement puis simultanément), dont les distributions spectrales sont représentées en Figure 3.2. Afin de garantir des niveaux lumineux photopiques et mésopiques, les consignes électriques des sources lumineuses sont fixées à deux niveaux lumineux, l'un pour garantir des niveaux lumineux photopiques et le second pour garantir des niveaux mésopiques. L'ensemble des niveaux lumineux mesurés sur le patch blanc de la palette CC24 sont fournis dans la Table 3.2.

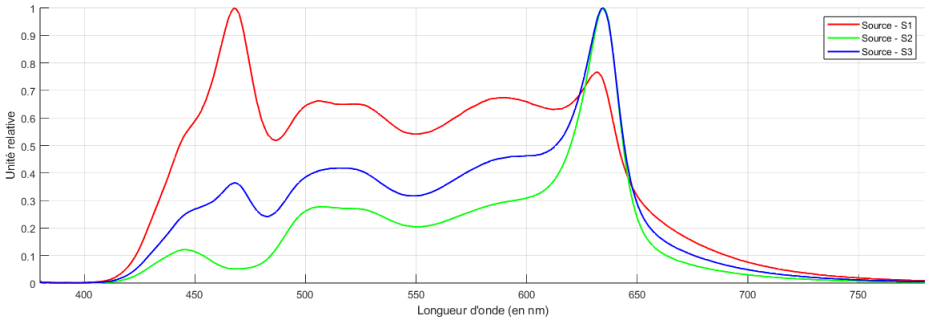


FIGURE 3.2 – Distributions spectrales des sources utilisées lors de l'étude utilisant l'outil de reconstruction spectrale par splines. La mesure a été réalisée en réflexion sur le patch blanc de la palette CC24

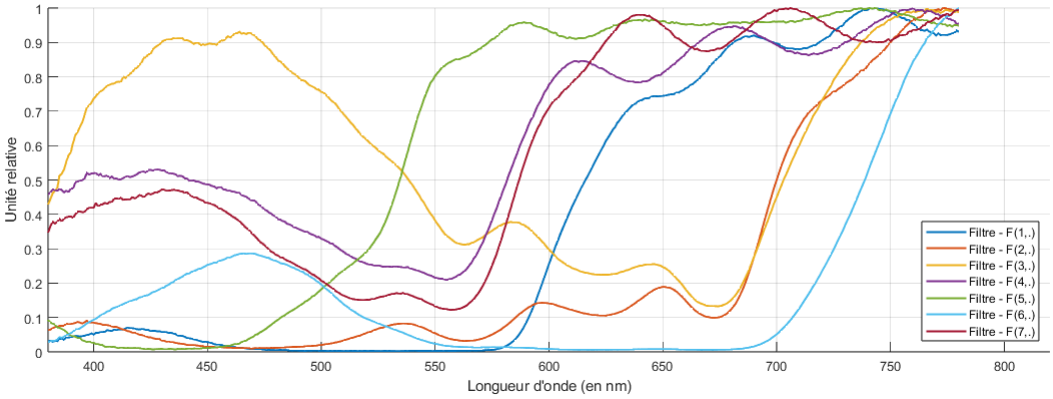
Domaine	Niveau lumineux (en cd/m^2) des sources		
	S1	S2	S3
Photopique	172	165	347
Mésopique	1.65	1.37	3.35

TABLE 3.2 – Niveaux lumineux mesurés sur le patch blanc de la palette CC24 éclairé par les sources lumineuses utilisées lors de l'étude sur les reconstructions spectrales

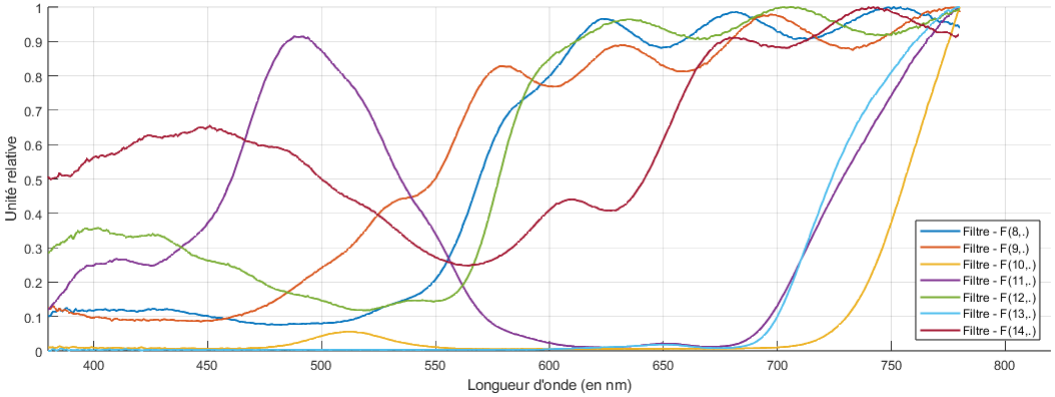
Les transmittances spectrales des filtres de la caméra RVB (F_R, F_V et F_B) ont été estimées à partir d'un outil de reconstruction spectrale par splines avec une échelle de résolution de 13 nm à partir de 5120 observations RVB dont le minimum global est estimé par la fonction « lsqcurvfit » de Matlab. Ces transmittances spectrales ont été comparés à des estimations obtenues à l'aide d'un monochromateur (voir Annexe 7.5). Les transmittances spectrales des filtres colorés ont été déterminés dans la position géométrique $\theta_{in} = 0°$, $\phi_{in} = 0°$, $\theta_{out} = 45°$ et $\phi_{out} = 0°$, selon le protocole suivant :

1. allumer la source lumineuse (type illuminant A) pendant une heure, comme recommandé par Sakar et al. (2018) ;
2. placer le spectroradiomètre et un matériau de type spectralon dans la configuration géométrique $\theta_{in} = 0°$, $\phi_{in} = 0°$, $\theta_{out} = 45°$ et $\phi_{out} = 0°$, puis effectuer une acquisition de la luminance spectrique (notée $\lambda \mapsto L_{e,0}(\lambda)$) ;
3. placer le filtre coloré indicé k au-dessus du matériau de type spectralon, et effectuer une acquisition de la luminance spectrique (notée $\lambda \mapsto L_{e,k}(\lambda)$) ;
4. répéter l'étape 3 autant de fois qu'il y a de filtres colorés à caractériser (ici $N = 21$) ;

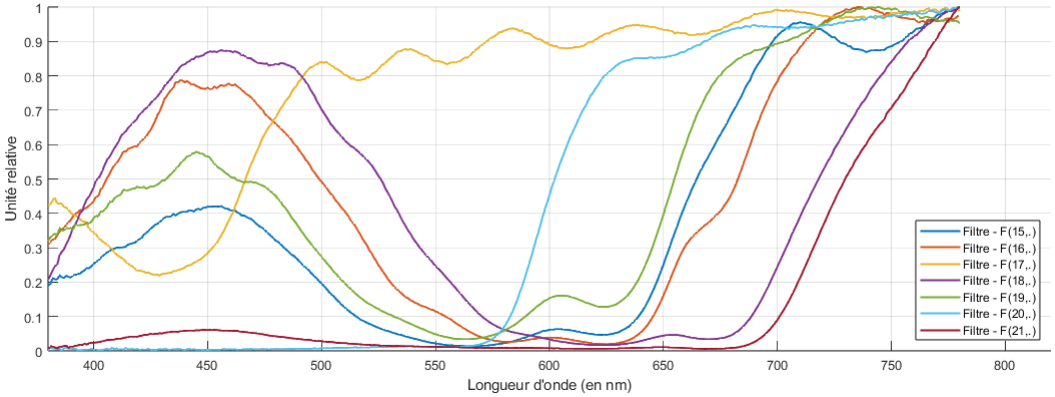
5. déterminer par calcul les transmittances spectrales des filtres colorés (notées $\lambda \mapsto F(k,\lambda)$) en utilisant la relation : $F(k,\lambda) = L_{e,k}(\lambda)/L_{e,0}(\lambda)$. Les transmittances spectrales normalisées obtenues sont représentées en Figure 3.3.



(a) Filtres 1 à 7



(b) Filtres 8 à 14



(c) Filtres 15 à 21

FIGURE 3.3 – Transmittances spectrales des filtres colorés utilisés lors de l'étude sur la méthode de reconstruction spectrale par splines

À partir des données spectrales (luminances spectriques, transmittances spectrales des filtres de la caméra et des filtres colorés), il est possible d'estimer par calcul des observations RVB synthétiques, sans bruit, en utilisant les relations :

$$\begin{cases} R^{0\%}_{0,i,j} = \int L_e(i,j,\lambda).F_R(\lambda).d\lambda \\ R^{0\%}_{k,i,j} = \int L_e(i,j,\lambda).F_R(\lambda).F(k,\lambda).d\lambda \end{cases} \tag{3.9}$$

où : $R^{0\%}_{0,i,j}$ (resp. $R^{0\%}_{k,i,j}$) correspond à l'observation native (resp. au travers du filtre coloré numéro k), sans bruit, du canal rouge de la caméra du matériau indicé j, qui est éclairé par la source numéro i ; $\lambda \mapsto L_e(i,j,\lambda)$ correspond à la distribution spectrale de la luminance spectrique obtenue par réflexion du matériau j éclairé par la source i. Des calculs similaires peuvent être réalisés pour les canaux vert et bleu de la caméra en remplaçant F_R par F_V et F_B.

À partir des données $(RVB^{0\%}_{0,i,j})_{i,j}$ et $(RVB^{0\%}_{k,i,j})_{k,i,j}$ des jeux de données intégrant un bruit uniforme d'amplitude « crête à crête » de 1 %, 3 %, 5 % et 10 % sont construits en utilisant les relations :

$$\begin{cases} R^{q\%}_{0,i,j} = R^{0\%}_{0,i,j}.U(q\%) \\ R^{q\%}_{k,i,j} = R^{0\%}_{k,i,j}.U(q\%) \end{cases} \tag{3.10}$$

où : $U(q\%)$ signifie un tirage uniforme entre $1-(q/200)$ et $1+(q/200)$ garantissant un bruit d'amplitude « crête à crête » de q%.

Les bruits numériques qui sont ajoutés dans les données présentent des amplitudes crêtes à crêtes de 1 %, 3 %, 5 % et 10 %. Ces valeurs proviennent d'études statistiques sur les caméras, qui restent à affiner. Ces valeurs sont destinées à tester les méthodes de reconstruction spectrale dans des conditions défavorables, notamment en ce qui concerne la distribution uniforme. En effet, les distributions observées sur des caméras correspondent généralement à des distributions gaussiennes centrées en 0, dont le maximum de densité est à 0 %.

En tout, cinq jeux de données correspondant à q = 0, 1, 3, 5 et 10 % de bruit uniforme dans les observations RVB sont construits. Connaissant les luminances spectriques des matériaux éclairés par les sources lumineuses, il est possible d'obtenir par calcul les données provenant des espaces CIE-XYZ (2°) et LMSR (voir section 1.1.5 du chapitre 1) qui sont nécessaires dans le calcul des différences colorimétriques ΔE^*_{00} photopiques et adaptées à la vision mésopique (voir section 1.1.6.3 du chapitre 1).

3.2.1.2 Description de la méthode de reconstruction par splines

La méthode de reconstruction par splines proposée utilise les polynômes cubiques de Hermite (voir la Figure 3.5 pour un exemple). Entre deux nœuds (λ_1 et λ_2) tels que $\lambda_1 < \lambda_2$) le lissage par la spline de Hermite d'un spectre S (dérivable) s'obtient sur l'intervalle $[\lambda_1;\lambda_2]$ via :

$$\begin{cases} p(t) = h_{00}(t).S(\lambda_1) + h_{10}(t).\dfrac{dS}{d\lambda}(\lambda_1) + h_{01}(t).S(\lambda_2) + h_{11}(t).\dfrac{dS}{d\lambda}(\lambda_2) \\ t = \dfrac{\lambda-\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1}, \qquad \lambda \in [\lambda_1;\lambda_2] \end{cases} \tag{3.11}$$

où : h_{00}, h_{10}, h_{01} et h_{11} sont les polynômes de Hermit de degrés 3 définis sur le segment [0 ;1], représentés en Figure 3.4, dont les expressions sont :

$$\begin{cases} h_{00}(t) = 2.t^3 - 3.t^2 + 1 & t \in [0;1] \\ h_{10}(t) = t^3 - 2.t^2 + t & t \in [0;1] \\ h_{01}(t) = -2.t^3 + 3.t^2 & t \in [0;1] \\ h_{11}(t) = t^3 - t^2 & t \in [0;1] \end{cases} \tag{3.12}$$

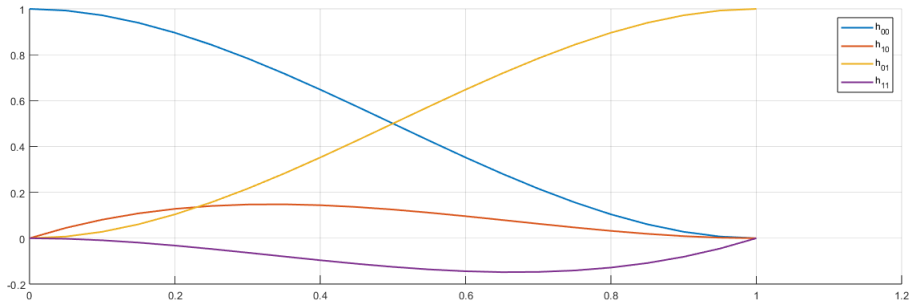


FIGURE 3.4 – Polynômes de Hermite de degré 3 représentés sur le segment [0 ; 1]

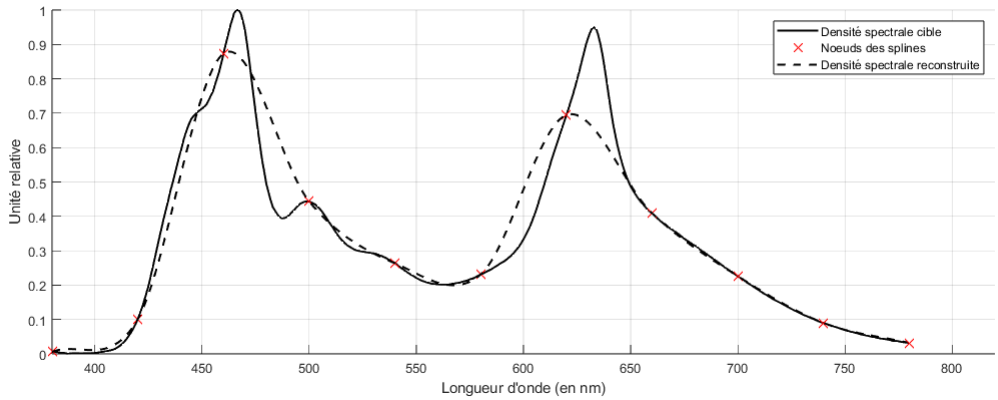


FIGURE 3.5 – Exemple d'estimation par splines cubiques de Hermite utilisant une répartition régulière des nœuds

La méthode de reconstruction par splines proposée vise à déterminer, pour 3x(N+1) observations RVB liées à une luminance spectrique incidente à la caméra (notée $\lambda \mapsto L_e(\lambda)$), une luminance spectrique métamère (par rapport aux observations RVB), décrite par une spline cubique de Hermite entre deux nœuds λ_h et λ_{h+1} tels que $\lambda_h < \lambda_{h+1}$. Les nœuds sont équi-répartis sur le segment [380 ; 780 - pas + 1] nm, où « pas » correspond au pas de résolution des splines (c'est-à-dire la longueur du segment $[\lambda_h; \lambda_{h+1}]$). Le problème inverse considéré vise à déterminer une luminance spectrique $L_{e,rec}$ telle que :

$$\begin{cases} argmin\{E((RVB_{ref}(n))_{n\in\{1,\dots,3.(N+1)\}}, (RVB_{rec}(n))_{n\in\{1,\dots,3.(N+1)\}}), L_{e,rec}\} \\ E((RVB_{ref}(n)), (RVB_{rec}(n))) = \sum_{n=1}^{3.(N+1)} (RVB_{ref}(n) - RVB_{rec}(n))^2 \\ L_{e,rec} = splines((\lambda_h)_{h\in\{1,\dots,H\}}) \end{cases} \tag{3.13}$$

où : $splines((\lambda_h)_{h\in\{1,\dots,H\}})$ correspond à la courbe définie par les splines cubiques de Hermite successives entre les valeurs λ_h et λ_{h+1} où des zéros ont été ajoutés sur le segment [780 - pas + 2 ; 780] nm ; $(RVB_{ref}(n))_{n\in\{1,\dots,3.(N+1)\}}$ (resp. $(RVB_{rec}(n))_{n\in\{1,\dots,3.(N+1)\}}$) correspond aux observations de référence (resp. reconstruites). Pour la résolution du problème inverse, les transmittances spectrales des filtres de la caméra et des filtres colorés doivent être connus.

D'après des résultats préliminaires, il apparaît que les reconstructions spectrales aux bords, dans les intervalles [380 ; 420] nm et [720 ; 780] nm, sont très oscillantes (voir Figure 3.6). Or, ce comportement oscillatoire ne correspond pas aux spectres de référence ; il est par conséquent proposé de fixer les valeurs des nœuds de $L_{e,rec}$ compris dans ces intervalles à zéro. De plus, il est nécessaire d'obtenir des densités spectrales dont les valeurs sont positives ; une étape finale consiste à remplacer les éventuelles valeurs négatives obtenues (suite à la résolution du problème inverse) par des valeurs nulles.

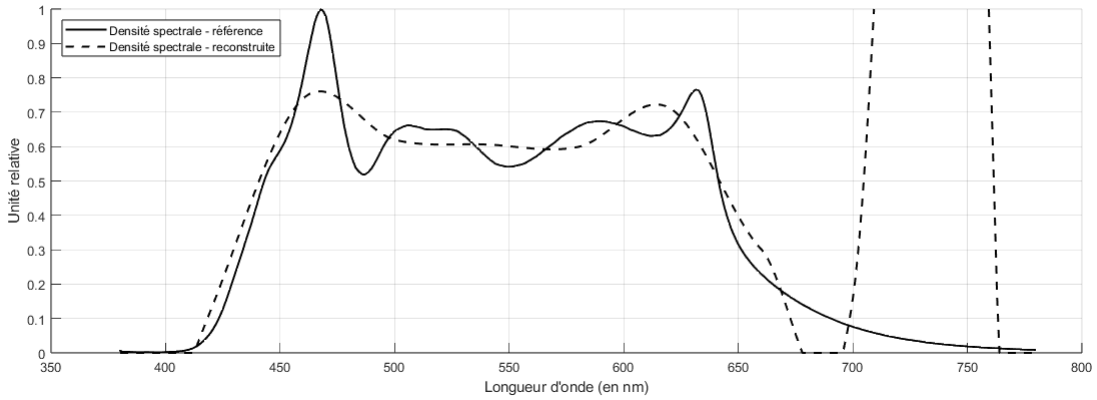


FIGURE 3.6 – Exemple d'oscillations observées au niveau des extrémités de l'intervalle de définition lors des reconstructions (avant traitement)

3.2.1.3 Optimisation en temps de calcul de la méthode de reconstruction par splines

Cette section vise à proposer et valider une méthode de résolution du problème inverse défini en équation (3.13) en un temps de calcul réduit. En effet, bien que des outils numériques permettent la résolution de problèmes inverses (*e.g.* fonction Matlab « lsqcurvefit », « globalSearch » ou « particleswarm »), ces outils présentent deux défauts majeurs. Le premier est que ces méthodes reposent sur des algorithmes stochastiques visant à identifier un minimum global, mais elles ne garantissent pas d'atteindre effectivement ce minimum. Le second défaut est lié au grand nombre d'itérations nécessaires afin de s'approcher du minimum, ce qui augmente le temps de calcul nécessaire à la résolution du problème. Afin de dépasser ces défauts, nous proposons une méthode de résolution déterministe du problème (3.13) qui s'appuie sur la propriété mathématique *(P)* des pseudo-inverses :

(P) : pour un système du type $A.x = B$, la pseudo inverse de A, notée A^+, permet de fournir une estimation de x (notée x_{rec}) telle que :

$$\begin{cases} x_{rec} = A^+.B \\ B_{rec} = A.x_{rec} \\ argmin\{E(B, A.x), x\} = E(B, B_{rec}) \\ E(B, B_{rec}) = \sum_i (b(i) - b_{rec}(i))^2 \end{cases} \tag{3.14}$$

En observant le système (3.13) et la propriété *(P)*, des similitudes dans la résolution du problème inverse selon la métrique RMSE sont mises en évidence . Nous proposons de reformuler le problème (3.13) sous forme matricielle :

$$\begin{cases} A.\bar{\lambda} = RVB \\ \bar{\lambda} = [\lambda_{h=1}, ..., \lambda_{h=H}] \end{cases} \tag{3.15}$$

où : $\bar{\lambda}$ est un vecteur composé de l'ensemble des nœuds des splines qui modélisent la luminance spectrique reconstruite ; RVB est un vecteur composé de l'ensemble des observations RVB.

La matrice A est exprimée sous la forme $A = V_{spectrale}.M_{Hermite}$, où $M_{Hermite}$ permet le calcul des splines connaissant le vecteur $\bar{\lambda}$ (*i.e.* $M.\bar{\lambda}$ correspond à la luminance spectrique modélisée par les splines définies par les nœuds $\bar{\lambda}$), et $V_{spectrales}$ est liée aux observations où chaque ligne correspond à un vecteur du type $[F_R(\lambda_1).F(k, \lambda_1), ..., F_R(\lambda_N).F(k, \lambda_N)]$. Par exemple, pour une solution entre 380 et 780 nm par pas de 1 nm, N = 401. Ainsi, puisque les transmittances spectrales $\lambda \mapsto F_{RVB}(\lambda)$ et $\lambda \mapsto F(k, \lambda)$ sont connues, le problème revient à construire la matrice $M_{Hermite}$. L'Annexe 7.6 fournie un code Matlab permettant la création de la $M_{Hermite}$ pour un pas donné.

Mise en forme matricielle

La matrice $M_{Hermite}$ est construite de telle sorte que $M_{Hermite}.\bar{\lambda}$ soit un spectre défini sur l'intervalle [380 ; 780 - pas + 1] nm par pas de 1 nm. La construction proposée de cette matrice se décompose en deux étapes. La première étape définit quatre matrices $H00$, $H01$, $H10$ et $H11$ qui décrivent les polynômes de Hermite en fonction de la précision de reconstruction. La seconde étape détermine des estimations des valeurs $(\frac{dS}{d\lambda}(\lambda_h))_{h\in\{1,...,H\}}$ et $(\frac{dS}{d\lambda}(\lambda_{h+1}))_{h\in\{1,...,H\}}$ sous la forme de matrices nommées dS_0 et dS_1.

Les matrices $H00$, $H01$, $H10$ et $H11$ sont définies par :

$$H00_{[(H-1).pas,H]} = \begin{bmatrix} h00(t_0) & ... & h00(t_{H-1}) \\ ... & ... & ... \\ h00(t_0) & ... & h00(t_{H-1}) \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

$$H01_{[(H-1).pas,H]} = \begin{bmatrix} h01(t_0) & ... & h01(t_{H-1}) \\ ... & ... & ... \\ h01(t_0) & ... & h01(t_{H-1}) \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

$$H10_{[(H-1).pas,(H-1).pas]} = diag(\begin{bmatrix} h10(t_0) & ... & h10(t_{H-1}) \\ ... & ... & ... \\ h10(t_0) & ... & h10(t_{H-1}) \end{bmatrix}, ..., \begin{bmatrix} h10(t_0) & ... & h10(t_{H-1}) \\ ... & ... & ... \\ h10(t_0) & ... & h10(t_{H-1}) \end{bmatrix}) \tag{3.18}$$

$$H11_{[(H-1).pas,(H-1).pas]} = diag(\begin{bmatrix} h11(t_0) & ... & h11(t_{H-1}) \\ ... & ... & ... \\ h11(t_0) & ... & h11(t_{H-1}) \end{bmatrix}, ..., \begin{bmatrix} h11(t_0) & ... & h11(t_{H-1}) \\ ... & ... & ... \\ h11(t_0) & ... & h11(t_{H-1}) \end{bmatrix}) \quad (3.19)$$

où : $diag(A_1, .., A_N)$ correspond à la matrice diagonale par bloc décrite par les blocs A_1, ..., A_N ; $t_i = i/H$, $\forall i \in \{0, ..., H-1\}$.

Les matrices liées aux dérivées sont définies selon l'approximation numérique du point médian :

$$\frac{dS}{d\lambda}(\lambda_i) \approx \frac{S(\lambda_{i+1}) - S(\lambda_{i-1})}{2.(\lambda_{i+1} - \lambda_i)}, \qquad i \in \{2, ..., H-1\} \quad (3.20)$$

Les dérivées en λ_1 et λ_H sont estimées à partir des dérivées numériques à gauche et droite :

$$\begin{cases} \frac{dS}{d\lambda}(\lambda_1) \approx \frac{S(\lambda_2) - S(\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} \\ \frac{dS}{d\lambda}(\lambda_H) \approx \frac{S(\lambda_H) - S(\lambda_{H-1})}{\lambda_H - \lambda_{H-1}} \end{cases} \quad (3.21)$$

Les matrices correspondantes sont :

$$dS_{0,[H-1]} = \begin{bmatrix} -2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ ... & & & & & & & ... \\ 0 & ... & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} /(2.pas) \quad (3.22)$$

$$dS_{1,[H-1]} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & ... & 0 \\ ... & & & & & & & ... \\ 0 & ... & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} /(2.pas) \quad (3.23)$$

où : pas correspond au pas constant utilisé lors des reconstructions par splines, typiquement $pas = \lambda_2 - \lambda_1$; Pour obtenir les matrices finales dS_0 et dS_1 chaque ligne est dupliquée (H-1) fois.

Finalement, la matrice $M_{Hermite}$ s'exprime par :

$$M_{Hermite} = H_{00} + H_{01} + H_{10}.dS_0 + H_{11}.dS_1 \quad (3.24)$$

Comparaison en temps de calcul

Afin de quantifier les gains en temps de calcul en utilisant la méthode proposée, des problèmes inverses ont été résolus à partir de données générées aléatoirement (valeurs tirées uniformément entre 0 et 1, tant pour les observations RVB que pour les transmittances spectrales associées aux filtres de la caméra et aux filtres colorés).

D'une part la méthode proposée a été exploitée ; d'autre part, la fonction Matlab « lsqcurvefit » a été utilisée. Les durées de résolution des deux méthodes ont été quantifiées dans des conditions identiques. Les comparaisons ont été réalisées pour 1000 reconstructions spectrales. Concernant le matériel informatique utilisé, Matlab était configuré pour effectuer les calculs sur un unique cœur CPU, de type Intel Core i5-12600K (12ème génération).

Les Tables 3.3 et 3.4 fournissent les temps de calculs théoriques pour une image en haute définition composée de 1920x1080 pixels, en fonction des méthodes de résolutions employées (fonction Matlab « lsqcurvefit » ou méthode matricielle), pour divers pas spectraux (5, 10, 20, 30 et 40 nm), et en faisant varier le nombre de filtres colorés utilisés lors de l'enrichissement des observations RVB (1, 5, 10, 15 et 20 filtres colorés).

D'après la Table 3.3, lorsque la fonction matlab d'optimisation « lsqcurvefit » est utilisée, le temps de calcul nécessaire pour effectuer la reconstruction spectrale d'une image en haute définition (c'est-à-dire la reconstruction spectrale de chacun de ses 1920x1080 = 2 073 600 pixels) augmente avec le nombre de filtres colorés, et lorsque le pas spectral (en nm) diminue. Ce n'est pas le cas pour la méthode matricielle proposée , qui, en moyenne, présente des temps de calcul 3200 fois plus courts.

	Echelle de résolution (nm)				
Filtres	5	10	20	30	40
1	4 360	1 840	1 150	940	860
5	4 460	2 050	1 190	1 150	1 120
10	4 610	2 090	1 260	1 150	1 120
15	4 790	1 660	1 300	1 190	1 120
20	4 860	1 840	1 300	1 190	1 150

TABLE 3.3 – Temps de calcul théorique (en secondes) nécessaire pour réaliser la reconstruction spectrale d'une image 1920x1080 - via la fonction Matlab « lsqcurvefit »

	Echelle de résolution (nm)				
Filtres	5	10	20	30	40
1	0.32	0.28	0.28	0.28	0.27
5	0.30	0.13	0.29	0.29	0.28
10	0.39	0.16	0.27	0.34	0.28
15	0.36	0.17	0.28	0.31	0.27
20	0.30	0.23	0.29	0.26	0.29

TABLE 3.4 – Temps de calcul théorique (en secondes) nécessaire pour réaliser la reconstruction spectrale d'une image 1920x1080 - via la méthode matricielle proposée

3.2.2 Résultats

Les résultats sont fournis en utilisant d'une part le jeu de données sans bruit (voir sous-section 3.2.2.1), et d'autre part les jeux de données affectés d'un bruit uniforme crête à crête de 1 %, 3 %, 5 % et 10 % (voir sous-section 3.2.2.2). Les pas spectraux pour la résolution sont fixés à 5 nm, 10 nm, 20 nm, 30 nm et 40 nm (5 pas), et le nombre de filtres sélectionnés, en plus des données RVB natives de la caméra, vaut 1, 5, 10, 15 ou 20. Enfin, puisque le choix du nombre de filtres peut être grand (352 716 choix pour 10 filtres parmi 21), 100 tirages aléatoires sont réalisés pour 5, 10 ou 15 filtres, tandis qu'un unique test est réalisé pour les configurations comportant 1 filtre ou 20 filtres. En tout 100 + 100 + 100 + 21 + 21 = 342 tests sont réalisés. Un total de 54 matériaux (patchs colorés) éclairés par 6 sources lumineuses (54x6 = 324 matériaux éclairés) sont utilisés comme cas d'étude pour la reconstruction spectrale. Ainsi, un total de 324 x 342 x 5 = 554 040 reconstructions spectrales sont effectuées pour chaque niveau de bruit, soit au total 550 800 x 5 = 2 770 200 reconstructions spectrales.

Des seuils d'acceptabilité sont fixés en fonction des indicateurs étudiés. Pour l'indicateur GFC, le seuil est fixé à 90 % ce qui signifie qu'une reconstruction qui présente un GFC inférieur à 90 % n'est pas considérée suffisamment fidèle (voir Figure 3.7 pour des exemples). Pour l'indicateur RMSE, le seuil est fixé à 5 %, ce qui signifie qu'au-dessus de 5 % les reconstructions sont considérées insuffisamment fidèles. Enfin, comme pour les études sur les étalonnages colorimétriques (voir chapitre 2), les différences colorimétriques supérieures à 5 sont considérées comme insuffisamment fidèles car il est possible de percevoir des différences colorées, d'après Mokrzycki and Tatol (2011). Deux différences colorimétriques sont calculées en fonction du domaine de vision (photopique ou mésopique). Pour la différence colorimétrique ΔE^*_{00} définie par la CIE dans le domaine photopique, le blanc de référence choisi est le matériau blanc (éclairé par la source en cours d'évaluation) de la palette de 24 patchs colorés, ce qui garantit un niveau lumineux du blanc de référence proche de celui des autres patchs colorés. Pour la différence colorimétrique ΔE^*_{00} modifiée pour prendre en compte la vision mésopique (Ashraf et al., 2022), le blanc de référence est le même que celui pris pour le ΔE^*_{00} en vision photopique, à l'exception d'un facteur de mise à l'échelle, appliqué pour garantir un niveau de 3 cd/m^2.

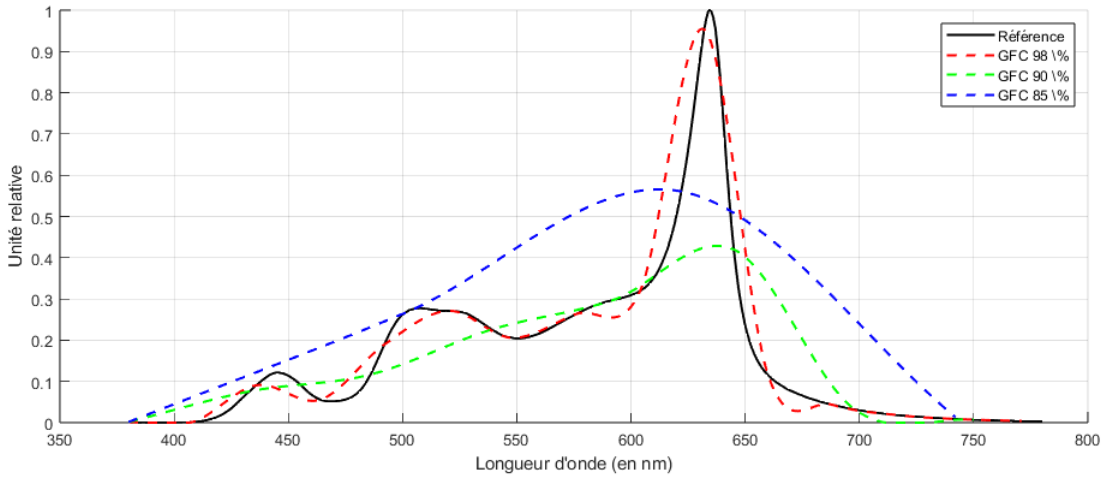


FIGURE 3.7 – Exemples de reconstructions spectrales présentant des GFC de 85 %, 90 % et 98 %

3.2.2.1 Données synthétiques - sans bruit

Les Figures 3.8, 3.9 et 3.10 regroupent les résultats obtenus pour les indicateurs GFC, RMSE et ΔE^*_{00} lors des reconstructions réalisées sur des données synthétiques sans bruit. La Figure 3.11 fournit des exemples de reconstructions spectrales obtenues pour des configurations représentatives.

D'après la Figure 3.8, indépendamment du nombre de filtres colorés utilisés, les reconstructions avec un pas d'échantillonnage peu élevé (5 nm ou 10 nm) sont les plus fidèles. En moyenne, la valeur de GFC est de 98.1 % (resp. 95.8 %) pour un pas d'échantillonnage de 5 nm (resp. 10 nm), alors que pour un échantillonnage de 20 nm (resp. 30 nm, resp. 40 nm), les valeurs de GFC sont de 95.4 % (resp. 94.8, resp. 94.5 %). Pour des pas d'échantillonnage de 5 nm ou 10 nm, augmenter le nombre de filtres est bénéfique vis-à-vis de l'indicateur GFC. En effet, avec un pas d'échantillonnage de 5 nm, un GFC moyen de 99.9 % est observé lorsque 20 filtres sont utilisés contre 99.9 %, 99.8 %, 99.0 % et 91.6 % lors de l'utilisation de 15, 10, 5 et 1 filtre. Les meilleures reconstructions vis-à-vis de l'indicateur GFC sont obtenues pour la configuration {20 filtres $\oplus$ 5 nm} (GFC moyen de 99.9 %). Enfin, utiliser un unique filtre coloré en plus des observations natives de la caméra permet des reconstructions présentant un GFC supérieur à 90 %. Concernant l'indicateur RMSE, sa valeur moyenne est inférieure à 0.5 % quelle que soit la configuration (voir Figure 3.9), suggérant des reconstructions spectrales satisfaisantes.

D'après la Figure 3.10, une tendance claire se dessine pour l'indicateur ΔE^*_{00} dans les domaines photopique et mésopique. D'une part, indépendamment du pas d'échantillonnage, plus le nombre de filtres augmente, meilleure est la valeur moyenne de l'indicateur (ΔE^*_{00} moyen dans le domaine photopique // mésopique de 0.25 // 0.11 pour 20 filtres contre 1.09 // 0.87 pour 5 filtres avec un pas d'échantillonnage de 5 nm). D'autre part, indépendamment du nombre de filtres colorés utilisés lors des reconstructions, plus le pas d'échantillonnage est faible, meilleure est la valeur moyenne de l'indicateur (ΔE^*_{00} moyen dans le domaine photopique // mésopique de 0.25 // 0.11 pour un pas d'échantillonnage de 5 nm contre 1.00 // 1.00 pour 20 nm, lorsque 20 filtres sont utilisés). Les meilleures reconstructions spectrales, vis-à-vis de l'indicateur ΔE^*_{00}, sont obtenues pour la configuration {20 filtres $\oplus$ 5 nm} (ΔE^*_{00} moyens de 0.25 et 0.11 dans les domaines photopique et mésopique). Enfin, utiliser au moins 5 filtres colorés permet d'obtenir des reconstructions spectrales présentant des différences colorimétriques ΔE^*_{00} inférieures à 5.

Lorsque les trois indicateurs (GFC, RMSE et ΔE^*_{00}) sont considérés simultanément, les configurations {5 filtres $\oplus$ 5 nm} et {5 filtres $\oplus$ 10 nm} permettent d'obtenir une reconstruction spectrale qui respecte les seuils fixés. De plus, la configuration {20 filtres $\oplus$ 5 nm} fournit les meilleures reconstructions.

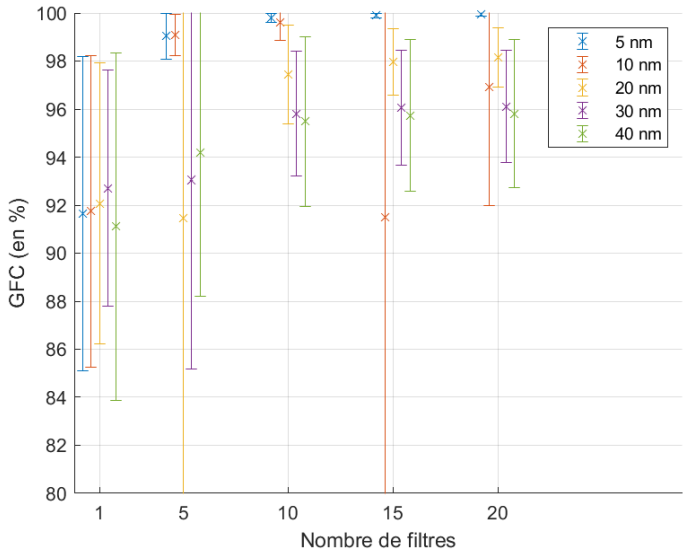


FIGURE 3.8 – Résultats de l'indicateur GFC (en %) pour les données synthétiques sans bruit

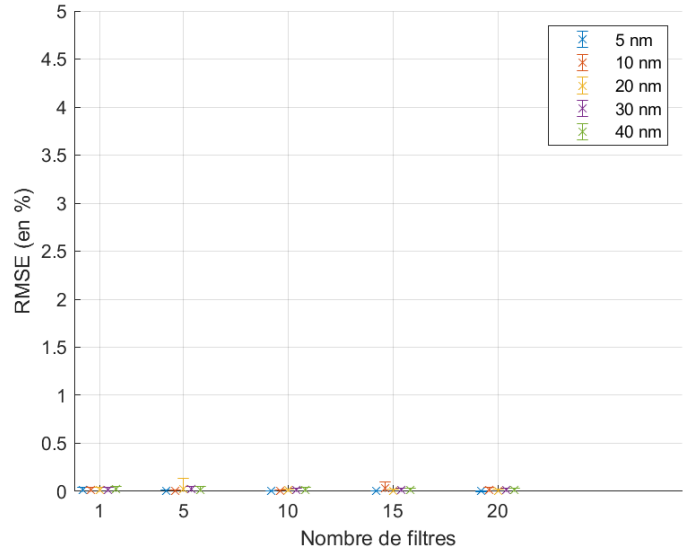
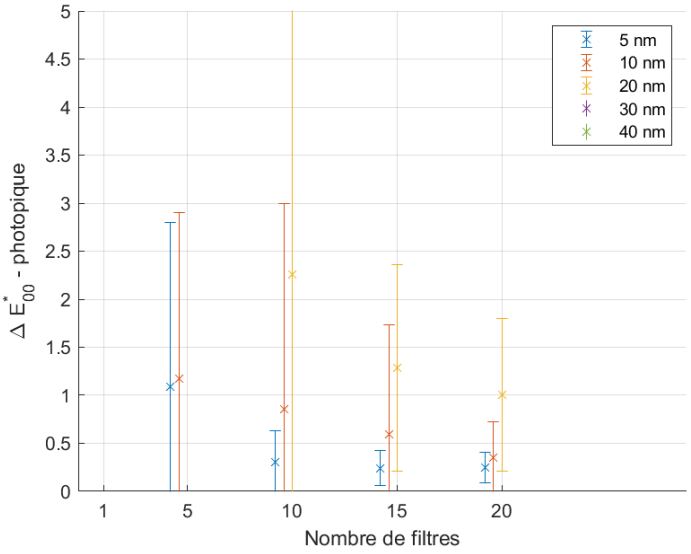
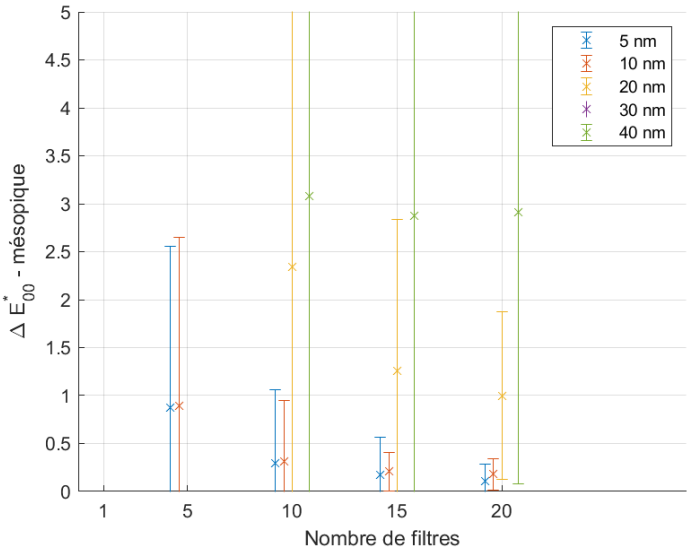


FIGURE 3.9 – Résultats de l'indicateur RMSE (en %) pour les données synthétiques sans bruit



(a) Résultats dans le domaine photopique



(b) Résultats dans le domaine mésopique

FIGURE 3.10 – Résultats de l'indicateur ΔE^*_{00} pour les données synthétiques sans bruit dans les domaines photopique et mésopique

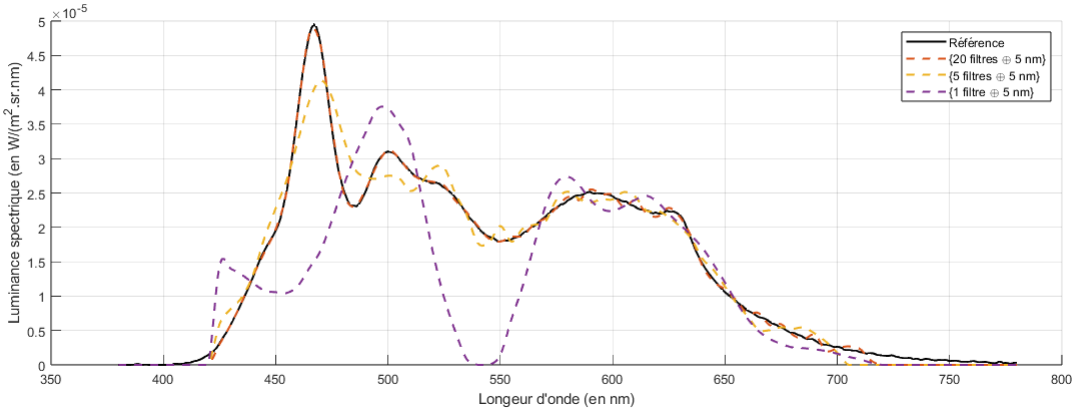


FIGURE 3.11 – Exemple de reconstructions spectrales – données synthétiques sans bruit

3.2.2.2 Données synthétiques avec bruit

Les Figures 3.12, 3.14 et 3.16 (resp. 3.13, 3.15 et 3.17) regroupent les résultats obtenus pour les indicateurs GFC, RMSE et ΔE^*_{00} lors des reconstructions spectrales réalisées avec des données comportant 1 % (resp. 3 %) de bruit. Les Figures 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21 représentent des exemples de reconstructionss spectrales obtenues pour des configurations représentatives pour des données affectées d'un bruit crête à crête de 1 %, 3 %, 5 % et 10 %.

D'après les Figures 3.12 et 3.13 deux tendances se dégagent. La première tendance est que plus le nombre de filtres augmente, meilleures sont les reconstructions spectrales vis-à-vis de l'indicateur GFC (valeur moyenne de 96.3 % lorsque 20 filtres colorés sont utilisés, contre 91.9 % avec un unique filtre, pour des pas d'échantillonnage de 20 nm à 40 nm, pour des données comportant 1 % de bruit). La seconde tendance est que lorsque l'amplitude du bruit est élevée, la qualité de reconstruction spectrale s'améliore avec l'augmentation du pas d'échantillonnage. En effet, sur des données affectées de 1 % (resp. 3 %) de bruit, la meilleure qualité de reconstruction spectrale est obtenue pour la configuration {20 filtres $\oplus$ 20 nm} (resp. {20 filtres $\oplus$ 40 nm}), caractérisée par un GFC moyen de 97.0 % (resp. 95.6 %). De plus, d'après les Figures 3.14 et 3.15, la qualité de reconstruction spectrale, avec des RMSE moyennes inférieures à 0.5 %, ne semble pas affectée par les variations du rapport signal sur bruit pour des pas d'échantillonnage de 20 nm, 30 nm et 40 nm.

D'après les Figures 3.16 et 3.17, dans les domaines photopique et mésopique avec des données comportant 1 % (resp. 3 %) de bruit, seules les configurations {5 filtres $\oplus$ 5 nm}, {15 filtres $\oplus$ 20 nm} et {20 filtres $\oplus$ 20 nm} (resp. {10 filtres $\oplus$ 40 nm}, {15 filtres $\oplus$ 40 nm} et {20 filtres $\oplus$ 40 nm}) garantissent des différences colorimétriques sous le seuil fixé.

Lorsque les trois indicateurs (GFC, RMSE et ΔE^*_{00} dans le domaine mésopique) sont considérés simultanément, dans le domaine mésopique, les configurations comportant 10, 15 et 20 filtres avec des pas d'échantillonnage de 30 nm et 40 nm permettent d'obtenir une reconstruction spectrale qui respecte les seuils fixés, pour des données comportant 1 % de bruit. Pour des données comportant 3 % de bruit, il n'y a que les configurations {10 filtres $\oplus$ 40 nm}, {15 filtres $\oplus$ 40 nm} et {20 filtres $\oplus$ 40 nm} qui le permettent. Enfin, dans le domaine mésopique, pour des données comportant 5 % ou 10 % de bruit, il n'y a que la configuration {20 filtres $\oplus$ 40 nm} qui le permet. Pour des données dans le domaine photopique comportant plus de 1 % de bruit, indépendamment du nombre de filtres colorés et du pas d'échantillonnage utilisé, les différences colorimétriques ne sont plus acceptables.

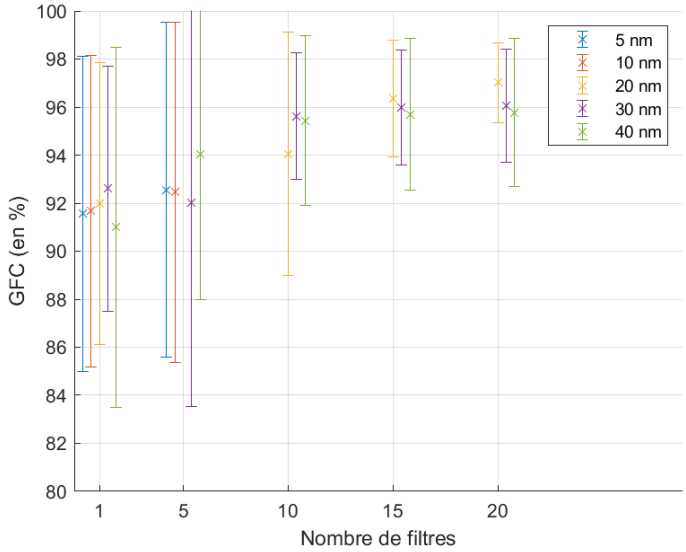


FIGURE 3.12 – Résultats de l'indicateur GFC (en %) pour des données comportant 1 % de bruit

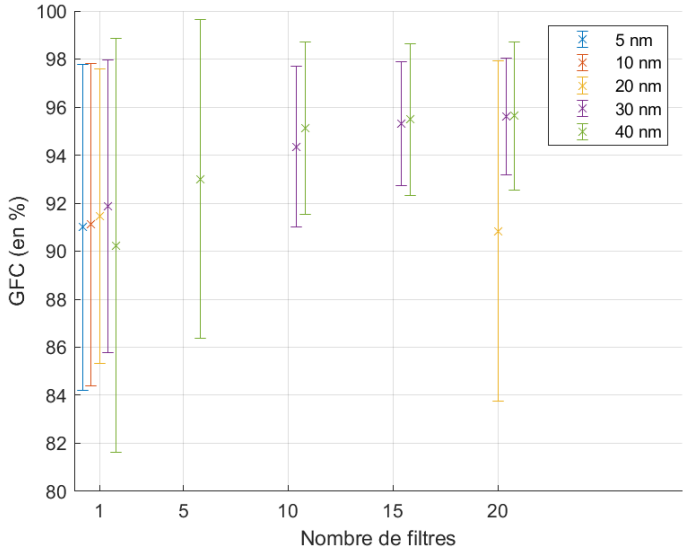


FIGURE 3.13 – Résultats de l'indicateur GFC (en %) pour des données comportant 3 % de bruit

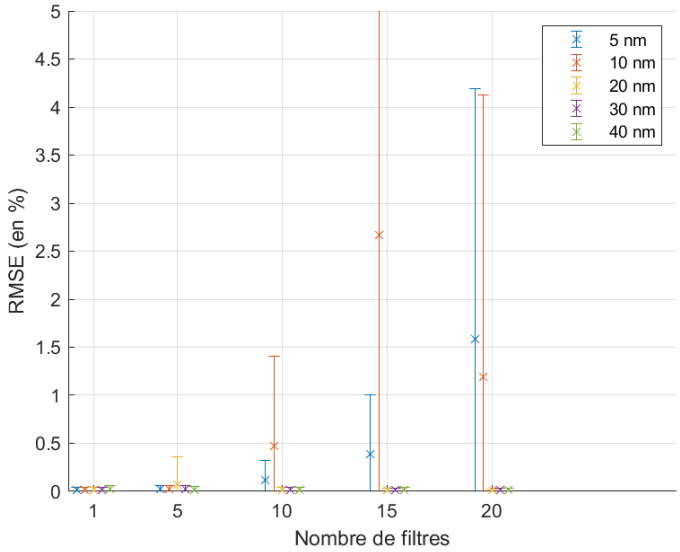


FIGURE 3.14 – Résultats de l'indicateur RMSE (en %) pour des données comportant 1 % de bruit

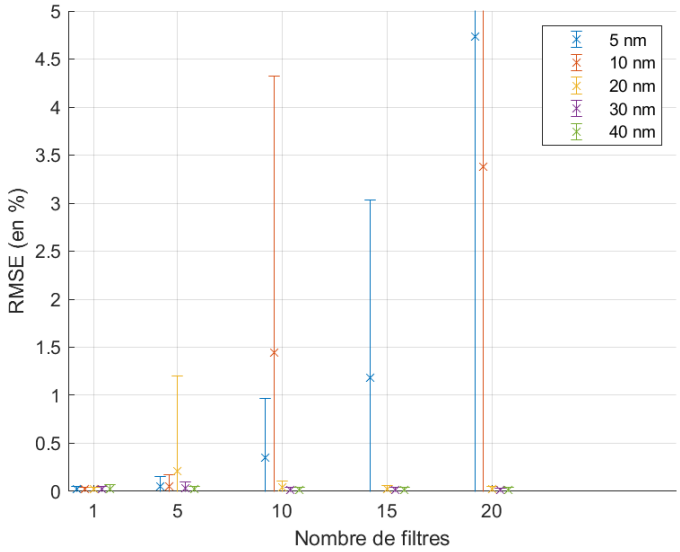
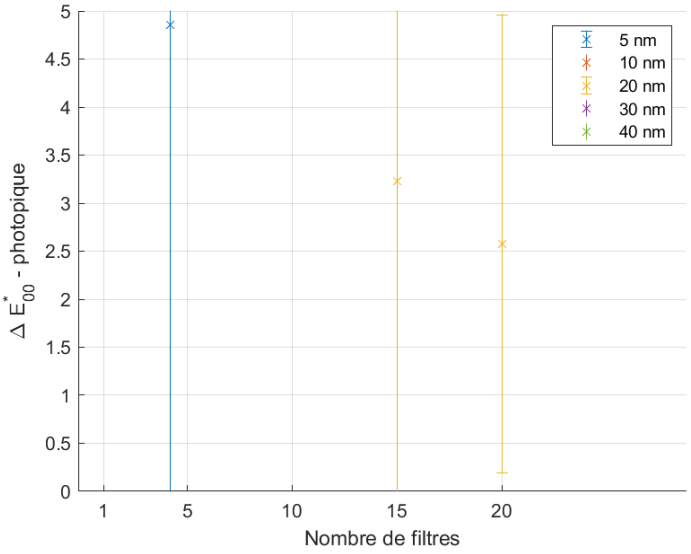
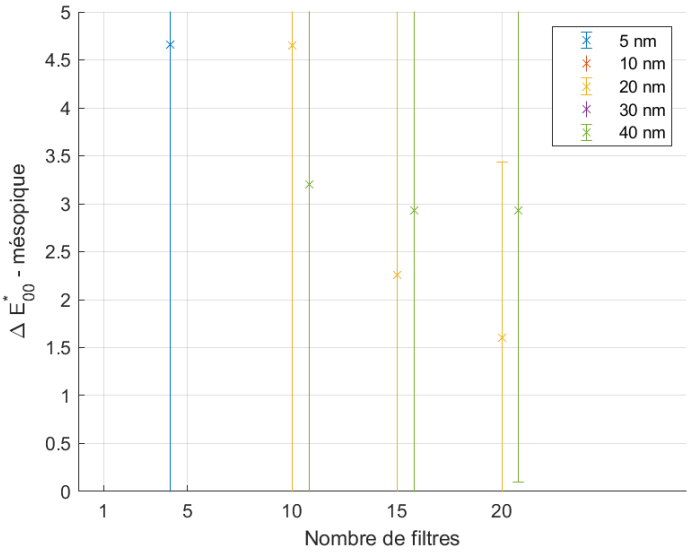


FIGURE 3.15 – Résultats de l'indicateur RMSE (en %) pour des données comportant 3 % de bruit



(a) Résultats dans le domaine photopique



(b) Résultats dans le domaine mésopique

FIGURE 3.16 – Résultats de l'indicateur ΔE^*_{00} pour des données comportant 1 % de bruit dans les domaines photopique et mésopique

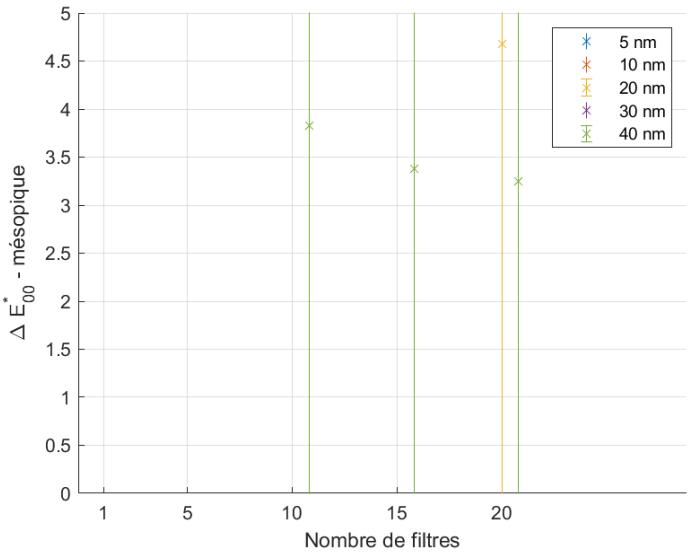


FIGURE 3.17 – Résultats de l'indicateur ΔE^*_{00} dans le domaine mésopique pour des données comportant 3 % de bruit

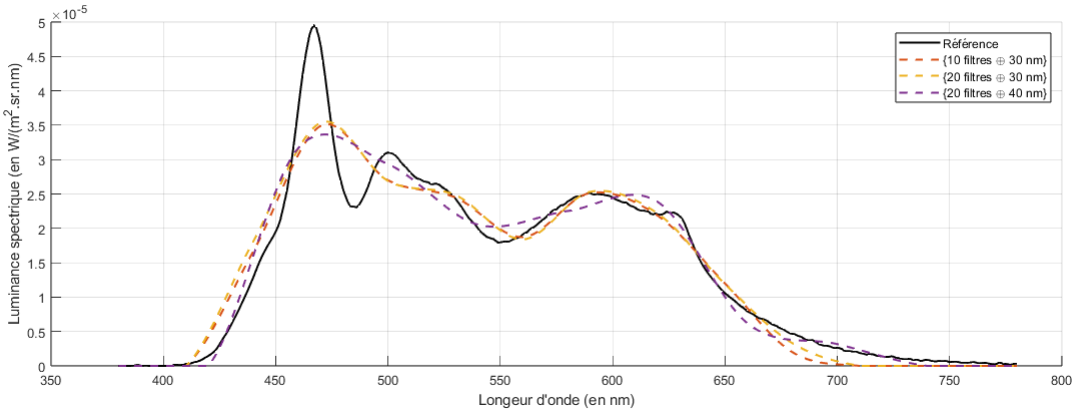


FIGURE 3.18 – Exemple de reconstructions spectrales - données comportant 1 % de bruit

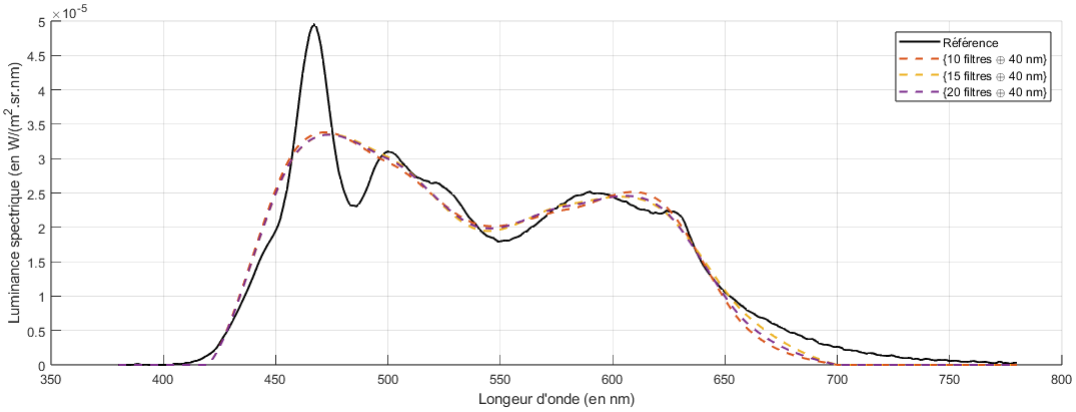


FIGURE 3.19 – Exemple de reconstructions spectrales - données comportant 3 % bruit

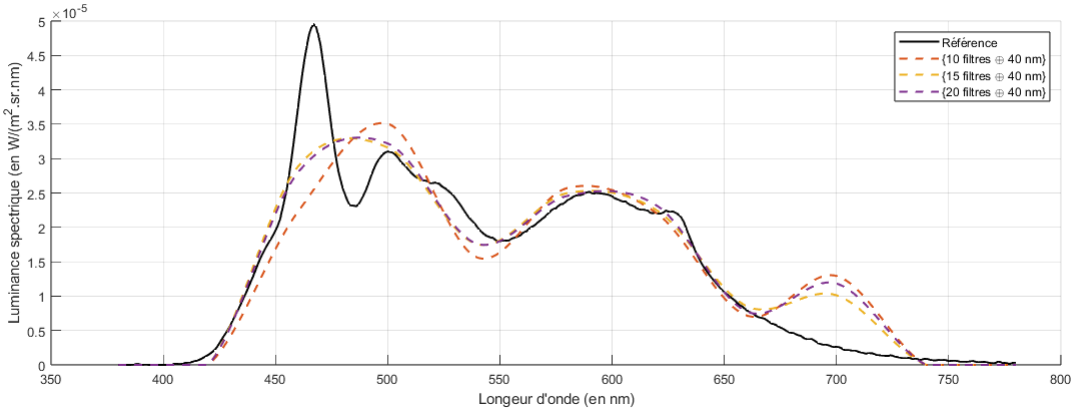


FIGURE 3.20 – Exemple de reconstructions spectrales - données comportant 5 % bruit

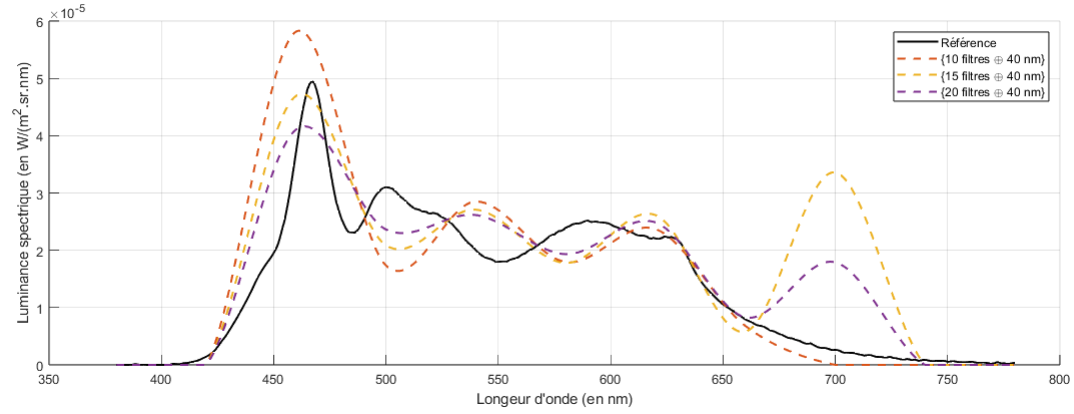


FIGURE 3.21 – Exemple de reconstructions spectrales - données comportant 10 % bruit

3.3 Discussion

3.3.1 Contributions

Dans ce chapitre, une base de données synthétiques comprenant des observations RVB natives et obtenues au travers de 21 filtres colorés positionnés alternativement devant l'objectif d'une caméra, ainsi que les luminances spectriques associées aux observations a été construite. Cette base de données a été déclinée en quatre variantes, comportant un bruit uniforme d'amplitude crête à crête de 1 %, 3 %, 5 % et 10 %. Une méthode de reconstruction spectrale s'appuyant sur une modélisation par splines, combinée à une résolution matricielle, a été proposée, garantissant l'identification du minimum global au problème inverse sous-jacent, et présentant un temps de calcul 3200 fois plus court, en moyenne, que celui induit par une optimisation numérique à l'aide d'une méthode implantée par exemple via la fonction Matlab « lsqcurvefit ».

Des reconstructions spectrales ont été effectuées à partir de la base de données construite, dans plusieurs configurations, avec un nombre de filtres colorés variables, et pour des pas d'échantillonnage spectraux variant entre 5 nn et 40 nm. Les résultats ont été comparés en utilisant trois métriques : le coefficient GFC et l'erreur RMSE qui visent à évaluer la forme de la distribution spectrale reconstruite ; la différence colorimétrique ΔE^*_{00}, enfin, qui évalue la fidélité colorimétrique perçue de la reconstruction spectrale.

Il ressort de ces expériences que :
— la fidélité de la reconstruction spectrale augmente avec le nombre d'observations RVB ;
— lorsque l'amplitude du bruit augmente, augmenter le pas d'échantillonnage spectral améliore la fidélité de reconstruction.

3.3.2 Limites et perspectives

L'expérience présentée dans ce chapitre comporte de nombreuses limites. Premièrement, les données utilisées sont synthétiques ; il reste à confirmer ou nuancer les résultats obtenus à l'aide de données réelles (observations RVB issues d'une caméra). Concernant les matériaux observés, il s'agit de patchs colorés éclairés par des sources LEDs ; il pourrait être intéressant de confirmer les résultats obtenus pour d'autres matériaux et pour une plus grande variété de sources, en particulier présentes dans les scènes urbaines nocturnes telles que des sources sodium à basse / haute pression.

Concernant l'outil de reconstruction spectrale, l'association d'une modélisation des distributions spectrales par splines avec une méthode de résolution matricielle a été proposée ; d'autres méthodes pourraient être étudiées, par exemple celles s'appuyant sur des réseaux de neurones. L'outil proposé peut être paramétré de plusieurs façons : si les travaux se sont focalisés sur une répartition régulière des nœuds, une répartition non régulière pourrait présenter des avantages (typiquement, en les positionnant au niveau des points remarquables - extrema, points d'inflexion - des combinaisons entre distributions spectrales des sources de la scène et des transmittances spectrales des filtres). Une approche multi-échelles pourrait aussi être explorée. Enfin, des hypothèses fortes ont été adoptées aux extrémités de l'ensemble de définition (intervalles [380 ; 420] nm et [720 ; 780]) ; davantage contraindre les splines dans l'étape de modélisation du problème pourrait permettre de s'en affranchir.

3.4 Conclusion

Pour les études menées dans ce chapitre, des bases de données synthétiques (triplets RVB enrichis et luminances spectriques associées) comprenant des niveaux lumineux photopiques et mésopiques ont été construites.

Une expérience a été menée afin de quantifier la fidélité (vis-à-vis des métriques GFC, RMSE et ΔE^*_{00}) des reconstructions spectrales réalisées en fonction du rapport signal sur bruit, et en fonction du nombre de filtres colorés utilisés. Les reconstructions spectrales ont été réalisées via l'association de splines cubiques de Hermite avec une méthode de résolution matricielle rapide. Pour des données n'excédant pas un bruit crête à crête de plus de 3 %, en utilisant cinq filtres colorés, la fidélité de reconstruction est satisfaisante vis-à-vis des critères et des seuils choisis ; celle-ci s'améliore avec l'augmentation du nombre de filtres colorés ; au-delà d'un bruit crête à crête de 3 %, l'utilisation de 20 filtres colorés est requise.

Finalement, la Table 3.5 fournit un récapitulatif des résultats présentés dans ce chapitre vis-à-vis des hypothèses formulées en section 3.1.2.

Description de l'hypothèse	Validation	Remarque
(H1) Plus le rapport signal sur bruit des observations RVB se dégrade , plus il est nécessaire d'appliquer un niveau de régularisation important afin de préserver un niveau comparable de fidélité dans la reconstruction spectrale (vis-à-vis des indicateurs GFC, RMSE et ΔE^*_{00}) ;	Validée	
(H2) indépendamment du niveau de régularisation appliquée et du rapport signal sur bruit, plus le nombre de filtres colorés augmente, meilleure est la fidélité de la reconstruction spectrale	Validée	Il est nécessaire de déterminer un ensemble de définition des splines adapté afin de garantir des reconstructions spectrales fidèles

TABLE 3.5 – Récapitulatif des hypothèses testés et de leurs validités - reconstructions spectrales

Conclusion de la première partie

La première partie visait à développer des méthodes facilement déployables pour évaluer la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes, à partir d'une caméra RVB via l'estimation de grandeurs photométriques et radiométriques permettant l'usage de modèles perceptifs. Afin de répondre à cette problématique, trois expériences ont été réalisées.

Les deux premières expériences portaient sur l'étude des outils d'étalonnage colorimétrique dans le contexte de scènes urbaines nocturnes. La première expérience visait à déterminer, dans le contexte de scènes lumineuses comportant des sources de mêmes caractéristiques spectrales, le comportement des outils d'étalonnage colorimétrique présentés dans l'état de l'art, dans les domaines de l'interpolation et de l'extrapolation, pour des niveaux lumineux photopiques et mésopiques. La seconde expérience, exploratoire, avait pour objectif d'adapter l'outil d'étalonnage colorimétrique par interpolation par splines de Menesatti et al. (2012), dans le cas de l'acquisition de deux triplets RVB (l'un provenant d'observations natives et le second, au travers d'un filtre coloré positionné devant la caméra) ; ceci, dans le contexte de scènes comportant des sources lumineuses caractérisées par différentes distributions spectrales, et dans le cas idéal où les matériaux utilisés pour la construction des données de référence sont représentatifs de ceux que l'on souhaite étalonner.

La troisième expérience portait sur l'étude de l'outil de reconstruction spectrale par association de splines cubique de Hermite avec une méthode matricielle de résolution rapide, dans le contexte de scènes urbaines nocturnes. Des reconstructions spectrales ont été réalisées en utilisant différentes configurations faisant intervenir un nombre variable de filtres colorés (1, 5, 10, 15 et 20 filtres colorés), et différents pas d'échantillonnage spectraux (5, 10, 20, 30 et 40 nm). La connaissance préalable des transmittances spectrales des filtres colorés de la caméra et des filtres colorés utilisés pour l'enrichissement des données RVB est nécessaire à la mise en œuvre de la méthode.

D'un point de vue applicatif, les expériences menées dans cette partie permettent de conclure que si un opérateur souhaite obtenir des données colorimétriques (espace CIE-XYZ (2°) ou LMSR) relatives aux scènes urbaines nocturnes, il est possible d'utiliser les outils d'étalonnage colorimétrique, ou de reconstruction spectrale.

En effet, dans le domaine photopique, en utilisant les outils d'étalonnage colorimétrique (caméra Nikon D850 et pour des données de référence provenant de la palette « *classic* » de la marque « calibrite Color Checker » - 24 patchs), les différences colorimétriques obtenues sont acceptables ($\Delta E^*_{00} < 5$), pour des scènes ne comportant qu'une seule source lumineuse, ceci tant en interpolation qu'en extrapolation sur une plage de [-50 ;+1000] cd/m^2. Plus précisément, en interpolation, les différentes méthodes étudiées présentent des comportements similaires et présentent une différence colorimétrique moyenne de 1.79 ; en extrapolation, dans les zones plus sombres (resp. lumineuses) que les données de référence, l'interpolation tri-linéaire (resp. SVD+) permet d'obtenir des ΔE^*_{00} compris entre 2.6 et 4.8 (resp. 2.16 et 4.66), pour des plages de luminances extrapolées comprises entre -10 cd/m^2 et -50 cd/m^2 (resp. 200 cd/m^2 et 1000 cd/m^2).

Dans le domaine mésopique, utiliser des outils d'étalonnage colorimétrique est acceptable lorsque la luminance d'adaptation de l'œil est située dans le domaine photopique. En effet, dans ces conditions, l'ensemble des méthodes (SVD, SVD+ et par interpolation tri-linéaire) présente des différences colorimétriques inférieures à 1. Cependant, si les yeux des observateurs sont adaptés à des niveaux lumineux mésopiques, aucune des méthodes ne permet de fournir des données colorimétriques acceptables.

Dans le cas de scènes comportant plusieurs sources lumineuses caractérisées par diverses densités spectrales, il est nécessaire d'acquérir des données colorimétriques de référence sous les différentes sources indépendamment. Utiliser un tel protocole permet d'obtenir, dans le domaine photopique, des différences colorimétriques de 2.70 (resp. 3.04) en interpolation (resp. extrapolation) en utilisant la méthode par interpolation par splines (resp. par SVD).

L'ensemble de ces méthodes d'étalonnage colorimétrique est facilement déployable.

Dans le cas où un opérateur souhaite obtenir des données colorimétriques de la meilleure qualité possible, il est nécessaire d'utiliser l'outil de reconstruction spectrale avec 20 filtres colorés, tout en mettant en œuvre un protocole d'acquisition visant à réduire le bruit, par exemple en effectuant la moyenne de plusieurs acquisitions HDR pour chacune des observations RVB. Dans le cas où les données sont affectées d'un bruit dont l'amplitude crête à crête n'excède pas 1 %, les différences colorimétriques moyennes attendus sont de 2.57 (resp. 1.61) dans le domaine photopique (resp. mésopique), lorsque l'outil de reconstruction spectrale proposé est utilisé, avec un pas d'échantillonnage spectral de 20 nm. Cette méthode d'estimation spectrale ne s'appuyant pas sur des données de référence liées à des sources ou à des patchs colorés particuliers, peut être utilisée pour caractériser n'importe quelle luminance spectrique d'une scène urbaine nocturne, en présence d'une ou plusieurs sources de caractéristiques spectrales différentes. La question de la facilité de déploiement est néanmoins posée, dans la mesure où la durée d'acquisition peut être longue, surtout pour réduire le bruit dans le contexte de scènes sombres, ce qui nécessiterait des temps de pose allongés.

Dans le cas où un opérateur souhaite obtenir des données de bonne qualité sans pour autant mettre en œuvre un protocole d'acquisition s'appuyant sur 21 photographies HDR, il peut exploiter l'outil d'étalonnage colorimétrique pour les points dont les luminances sont situées aux abords de celles des données de référence (entre -50 et +1000 cd/m^2), en combinaison, pour les autres points, avec l'outil de reconstruction spectrale avec cinq filtres colorés et un pas d'échantillonnage spectral de 5 nm. Cette approche présente des différences colorimétriques acceptables ($\Delta E^*_{00} < 5$) dans les domaines photopique et mésopique, et sa mise en œuvre pratique est envisageable avec des efforts modérés.

Enfin, l'ensemble des résultats obtenus lors de l'étude présentée en section 2.3 du chapitre 2 permet de proposer un outil prédictif de métriques (voir Figure 3.22). En effet, connaissant une luminance de référence d'une zone de l'image, il est possible d'estimer une carte de luminance à partir du standard sRGB via la relation :

$$L = \alpha.(0.2126.R + 0.7152.V + 0.0722.B) \tag{3.25}$$

où : L est la luminance associée au pixel $[R, V, B]$; α est un coefficient de mise à l'échelle obtenu à partir de la luminance de référence.

À partir de cette carte de luminance et des résultats obtenus en section 2.3, des cartes d'estimation des différences colorimétriques peuvent être obtenues (il est nécessaire que la palette de patchs colorés soit photographiée dans la scène afin d'obtenir une estimation de la dynamique de luminances des données de référence).

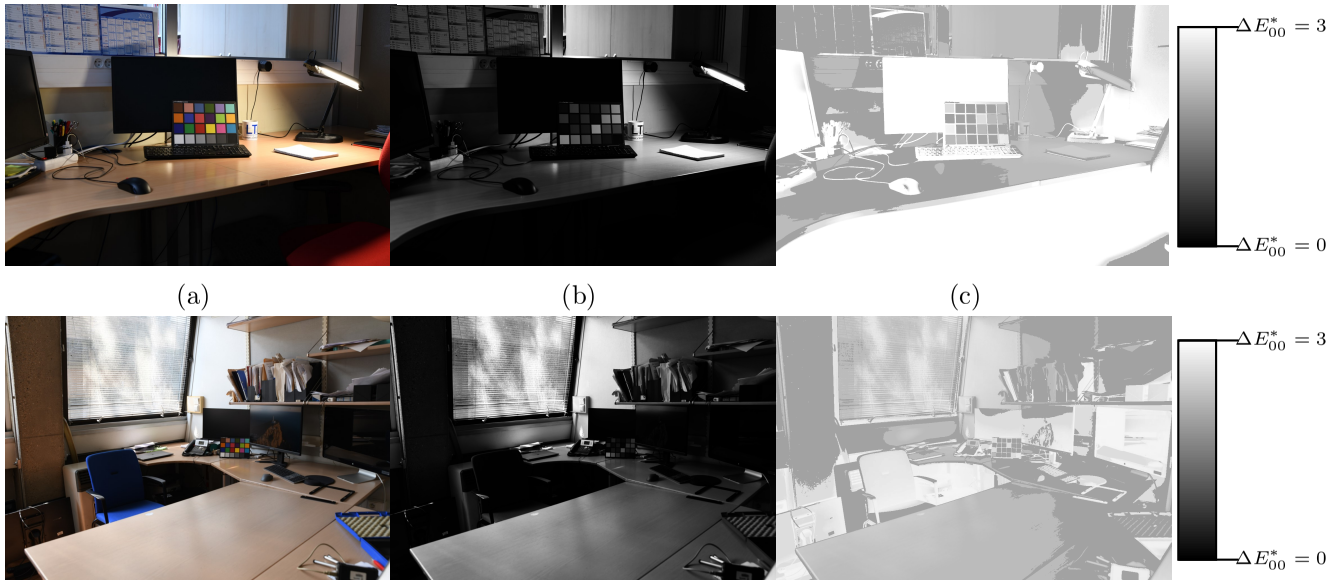


FIGURE 3.22 – Cartes de différences colorimétriques (voir (c) et (f)) pour les images initiales (a) et (d) à partir des estimations des cartes de luminances (b) et (e), en utilisant le standard sRGB

Deuxième partie

Développement et validation d'une méthode pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage urbain nocturne en environnement virtuel

Dans l'état de l'art, il a été mis en évidence, qu'il est possible d'évaluer la qualité de l'éclairage en utilisant d'une part des indicateurs issus de mesures radiométriques et/ou photométriques, et d'autre part directement via le recueil d'évaluations subjectives auprès de panels d'observateurs. Dans la partie I « Développement et validation de méthodes pour l'acquisition de données photométriques et radiométriques de scènes urbaines nocturnes », des outils sont proposés afin d'obtenir des grandeurs radiométriques et photométriques qui sont utiles dans les calculs et définitions d'indicateurs. Pour développer ces indicateurs, les chercheurs en éclairage mettent en place des expériences psychovisuelles pour collecter le ressenti des usagers et étudier le lien (corrélations ou modélisation) des données collectées avec la description photométrique des scènes. Recueillir les jugements subjectifs sur des scènes urbaines nocturnes permet de :

1. Fournir des données qui pourront servir lors de la conception de nouveaux indicateurs radiométriques et/ou photométriques pour concevoir ou évaluer la qualité d'installation d'éclairage ;
2. Valider ou consolider l'usage des indicateurs radiométriques et/ou photométriques existants pour concevoir ou évaluer la qualité d'installation d'éclairage ;
3. Mais aussi, obtenir des évaluations subjectives sur des critères pour lesquels aucun indicateur radiométrique et/ou photométrique existe ;
4. Obtenir le ressenti subjectif d'usagers dans une démarche participative.

Cependant, réaliser des évaluations de la qualité de scènes urbaines nocturnes sur site est soumis à des contraintes logistiques (*e.g.* faire venir les personnes sur place) et des conditions expérimentales incontrôlées (*e.g.* variations climatiques). Déployer le recueil de jugements subjectifs en environnement virtuel permettrait de s'affranchir de ces contraintes et d'obtenir un grand nombre d'évaluations, augmentant considérablement la pertinence des évaluations d'un point de vue statistique. Ces motivations sont consolidées par la littérature scientifique qui, dans le contexte de scènes diurnes, a démontré qu'il est possible d'utiliser des environnements virtuels pour certains critères de la qualité de l'éclairage (*e.g.* « Confort et satisfaction générale », voir section 1.2.2.2). Cela reste cependant à être démontré pour des scènes urbaines nocturnes.

Dans ce contexte, l'objectif de cette Partie II est de développer et valider une méthode d'évaluation de la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel. Cela consiste à développer une chaîne d'acquisition / restitution d'une scène urbaine nocturne sur un dispositif d'affichage permettant de recueillir des évaluations similaires à celles qui auraient été recueillies dans les scènes réelles par des piétons. Ces évaluations devant s'appuyer sur la conception d'un questionnaire selon les critères de qualité de l'éclairage pour les piétons (définis en section 1.2). De cet objectif principal découlent des objectifs secondaires qui sont étudiés dans la thèse :

1. Explorer l'impact du degré de fidélité physique et perceptif selon les critères de qualité de l'éclairage ;
2. Comparer les jugements de qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnements réel et virtuel pour valider les méthodes développées ;
3. Explorer l'impact des conditions d'observation en environnement virtuel lors du recueil de jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage des scènes urbaines nocturnes.

Pour ce faire, le recueil de jugements subjectifs dans trois scènes urbaines nocturnes a été réalisé sur site (voir chapitre 4) et reproduit sur un dispositif d'affichage, selon différentes chaînes d'acquisition / restitution, l'une prenant en compte exclusivement la vision photopique et deux autres prenant en compte la vision mésopique en affichage LDR ou HDR (voir chapitre 5). Une fois les recueils de données subjectives en environnements réel et virtuel réalisés, ils ont été comparés de façon à identifier les méthodes et outils à utiliser en fonction des critères de qualité de l'éclairage nocturne que l'on souhaite évaluer.

Chapitre 4

Établissement d'une vérité terrain : expérimentation sur site

L'objectif principal de ce chapitre est de collecter des ressentis subjectifs sur site dans différentes scènes urbaines nocturnes, *i.e.* comportant des caractéristiques variées (*e.g.* température de couleur, niveau lumineux, distribution spatiale des sources) de façon à constituer une base de données de référence à comparer aux évaluations recueillies en environnement virtuel en chapitre 5.

Après avoir défini les objectifs, la démarche scientifique et les hypothèses testées en section 4.1, les matériels et méthodes de l'expérience psychovisuelle réalisée dans les travaux de la thèse sont détaillés en section 4.2. Finalement, les résultats sont présentés en section 4.3 et discutés en section 4.4.

4.1 Objectifs, démarche scientifique et hypothèses

4.1.1 État de l'art

Dans le but d'étudier la qualité de l'éclairage pour les piétons, l'approche la plus écologique est de recueillir des évaluations sur site dans lesquels les piétons sont en train de marcher tout en regardant la scène librement (*e.g.* Haans and de Kort, 2012 ; Rahm and Johansson, 2021 ; Wei et al., 2024). Pour être le plus proche d'une situation écologique, des travaux récents ont étudié l'usage de casque de réalité virtuelle augmentant ainsi l'immersion des participants en autorisant des observations à 360° (*e.g.* Chamilothori et al., 2019). Cependant, d'après les méta-analyses de Stamps (1990, 2010), l'usage de photographies serait suffisant pour retranscrire certaines impressions de l'environnement (*e.g.* attraits des lieux). En effet, Stamps révèle une corrélation élevée (0.86) entre les évaluations sur site et à partir de photographies ayant un point de vue statique (*e.g.* des paysages). En parallèle, des méthodologies sur site fondées sur des évaluations dynamiques (en marchant) sont proposées pour recueillir les ressentis subjectifs des participants et habitants sur l'ambiance des lieux, telles que la méthode du « *go-along* » (Kusenbach, 2003) ou les parcours commentés (Thibaud, 2022). Cependant, la nécessité d'avoir une tâche de déplacement lors des évaluations de la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes n'est pas encore claire et pourrait dépendre des critères d'évaluations. En effet, des études ont mis en évidence qu'il y a moins d'inconfort lié à l'éblouissement lorsque les participants ont évalué l'environnement dans une situation écologique : après avoir marché (*e.g.* Villa et al., 2017) ou en regardant la scène librement (*e.g.* Bullough et al., 2003). La différence entre une évaluation en position statique et après un déplacement (dynamique) peut venir de la variation de la distribution des luminances dans le champ visuel des participants aux cours du temps mais aussi du fait que les participants sont impliqués dans la réalisation de leur tâche de déplacement. De plus, des travaux visant à recueillir le sentiment de sécurité mettent en avant la possibilité d'utiliser des items / questions relatives à des projections dans les tâches de déplacement (*e.g. "I would walk down this street in a higher pace than I usually walk in"* - Haans and de Kort, 2012). Ainsi au regard de notre objectif, il peut être intéressant de vérifier préliminairement qu'obtenir des données subjectives issues d'observations en position statique sont similaires à celles réalisées après un déplacement dans la scène, selon les différents critères de qualité de l'éclairage identifiés en chapitre 1 section 1.2.

Par ailleurs, pour les tâches de performances visuelles, il est nécessaire de fournir une tâche qui est relative aux usages et besoins des participants en fonction de l'environnement qu'ils évaluent. Dans le cas de scènes urbaines nocturnes, les travaux de Trefzeger et al. (2018) mettent en avant que les piétons observent principalement le sol et les autres piétons.

Ainsi, en se fondant sur les travaux de Trefzeger et al. (2018) et dans l'objectif de fournir une tâche de performance visuelle qui reflète l'usage des piétons, des travaux ont proposé une tâche de reconnaissance d'émotions (*facial emotion recognition* - FER ; Fotios et al., 2015 ; Li et al., 2023 ; Yang and Fotios, 2015). La tâche vise à demander aux participants de détecter une émotion qui leur est présentée à une distance donnée et dans un certain laps de temps (500 ms). Cette tâche écologique est à mi-chemin entre de la performance visuelle (détection des contrastes et reconnaissance) et une tâche cognitive via l'analyse d'émotions. Néanmoins, cette tâche visuelle n'a pas encore été testée sur site. De plus, au même titre que la perception de luminosité d'une ambiance lumineuse nocturne (Trop et al., 2023), Fotios and Johansson (2019) suggèrent que la performance à la tâche FER pourrait être liée au sentiment de sécurité, ce qui reste à être vérifié. Ainsi, dans ce chapitre nous proposons une mise en œuvre en situation réelle de cette tâche FER. De plus, le lien entre la tâche FER et le sentiment de sécurité est étudié dans ce chapitre.

4.1.2 Objectifs

Au regard des objectifs de la thèse et des verrous scientifiques identifiés dans l'état de l'art, les objectifs de ce chapitre sont :

1. collecter une « vérité terrain » dans des scènes urbaines nocturnes comportant différentes caractéristiques de façon à constituer une référence lors des comparaisons entre les évaluations en environnements réel et virtuel ;
2. comparer l'évaluation de la qualité de l'éclairage perçue après une tâche écologique de déplacement et/ou à un endroit donné dans une scène urbaine nocturne ;
3. étudier la possibilité d'utiliser une tâche de reconnaissance d'émotion pour discriminer les scènes urbaines nocturnes ;
4. étudier la possibilité d'utiliser une tâche de reconnaissance d'émotion plus facile à relier à des grandeurs photométriques pour décrire le sentiment de sécurité des piétons.

4.1.3 Démarche et hypothèses

Afin de répondre aux objectifs de ce chapitre, une expérience psychovisuelle a été mise en place pour recueillir des évaluations subjectives en environnement réel (sur site), en position statique et dynamique (*i.e.* suite à un déplacement dans les scènes urbaines nocturnes). Un questionnaire regroupant plusieurs items relatifs aux différents critères de qualité de l'éclairage a été développé. Ensuite, les évaluations en position statique étaient comparées avec celles réalisées après un déplacement (dynamique) sur l'ensemble des items décrivant les critères de qualité de l'éclairage.

Au regard des conclusions de l'état de l'art, il est possible de formuler les hypothèses suivantes :

(H1) Selon les résultats de Stamps (1990, 2010), les jugements subjectifs portant sur le critère de qualité de l'éclairage « confort » (attrait de la scène) ne sont pas sensibles aux modes d'évaluations (statique ou dynamique) réalisés sur site ;

(H2) Selon les résultats de Bullough et al. (2003) et Villa et al. (2017), les jugements subjectifs portant sur le critère de qualité de l'éclairage « inconfort lié à l'éblouissement » sont sensibles aux modes d'évaluations (statique ou dynamique) réalisés sur site ;

(H3) La luminosité et l'uniformité perçue (critère de qualité « perception de l'ambiance lumineuse »), en lien direct avec la distribution des luminances dans le champ visuel des participants, est sensible aux modes d'évaluations (statique ou dynamique) réalisés sur site ;

(H4) Les jugements subjectifs portant sur le critère de qualité de l'éclairage « sentiment de sécurité » ne sont pas sensibles aux modes d'évaluations (statique ou dynamique) réalisés sur site, à l'exception des items relatifs à des projections dans la tâche de déplacement (Haans and de Kort, 2012) ;

(H5) La tâche FER est une tâche de performance visuelle qui permet de différencier les scènes dont la qualité de l'éclairage pour les piétons diffère ;

(H6) Selon les suggestions de Fotios and Johansson (2019), il existe un lien entre la performance à la tâche FER et le sentiment de sécurité (*e.g.* les piétons qui ont les meilleurs performances à la tâche FER se sentent d'avantage en sécurité que ceux qui ne savent pas reconnaître les émotions présentées).

4.2 Matériels et méthodes

4.2.1 Panel

Le panel est composé de 43 participants (24 hommes et 19 femmes) entre 19 et 47 ans (M = 23.4 ans, σ = 5.42 ans). Les participants étaient des membres du personnel ou des étudiants de l'ENTPE. Les participants ont tous affirmés ne pas être daltonien et 30 d'entre eux portent des lunettes de correction. Les participants ont signé un formulaire de consentement avant de commencer l'expérience.

Les participants reportent qu'ils estiment que l'éclairage public de manière générale permet de leur garantir un niveau de sécurité relativement satisfaisant (M = 65.0, SE = 23.4 - sur une échelle de [0]-Insatisfait–Satisfait-[100]). De plus, les participants reportent qu'ils se sentent plus en insécurité à Vaulx-en-Velin (*i.e.* commune où l'expérience s'est déroulée) de jour (resp. de nuit) que s'ils étaient autre part ailleurs de jour (resp. de nuit) (Vaulx-en-Velin : M = 25.4, SE = 18.5 ; Ailleurs : M = 11.7, SE = 13.5 - sur une échelle de [0]-Sécurité–Insécurité-[100]) (resp. Vaulx-en-Velin : M = 64.9, SE = 24.4 ; Ailleurs : M = 55.8, SE = 22.2).

4.2.2 Stimuli

L'expérience a eu lieu dehors dans une aire de 0.084 km^2 aux alentours du campus de l'ENTPE à Vaulx-en-Velin. Trois chemins piétonniers (A, B et C) ont été sélectionnées pour leurs diversités (température de couleur ; niveau lumineux et uniformité) afin d'introduire de la variabilité dans les scènes (voir Figures 4.1 et 4.2).

Dans chaque scène (A, B ou C), un parcours de 15 m a été défini (stimulus « dynamique ») ainsi qu'une position statique au milieu du parcours (stimulus « statique »). Les caractéristiques principales des scènes sont regroupées dans la Table 4.1. Des mesures sur site ont été réalisées dans chaque parcours de 15 m et sont fournies en Table 4.1, Figure 4.4 et Annexe 7.7. Les éclairements horizontaux ont été mesurés avec un chromamètre CL-200A, tandis que les éclairements verticaux dans le plan de l'œil ont été mesurés avec un luxmètre continu étalonné utilisant une cellule plan LMT. Les températures de couleurs ont été mesurées en réflexion sur un matériau de type spectralon avec un spectroradiomètre. Les caractéristiques photométriques, le long du parcours de 15 m, des scènes A et B correspondent à la classe P2 de la norme EN13201 (2015) (voir Figure 4.3 et Table 4.1) (*i.e.* éclairement horizontal moyen > 10 lx, éclairement horizontal d'au moins 2 lx, éclairement vertical d'au moins 3 lx). Alors que l'éclairement horizontal et l'uniformité sont similaires pour les

scènes A et B, l'éclairement vertical dans le plan de l'œil a une plus grande plage de variation dans la scène B que dans la scène A (voir Table 4.1 et Annexe 7.7). Les niveaux lumineux dans la scène C sont en dessous de toutes les classes définies par la norme EN13201 (2015). Concernant l'éblouissement, une valeur du « *Threshold Increment* » (TI%) a été estimée (voir Table 4.1) à partir d'une carte de luminance mesurée en utilisant une caméra LMK 6-5L au niveau de la position statique dans chaque parcours et a une hauteur de 1.5 m, et en appliquant des hypothèses / simplifications de façon à adapter les calculs aux scènes urbaines nocturnes (les sources éblouissantes sont définies en utilisant la valeur seuil de 500 cd/m^2, direction d'observation définie au centre de l'image, la luminance de la route est estimée numériquement dans une zone définie entre 2.5° et 7.5° (Uchida et al., 2016)). Il est bon de noter que le long du parcours C, aucun luminaire n'éclaire directement la scène. De plus, aucun luminaire n'est présent le long du parcours A et B, cependant la Figure 4.3 donne les positions des luminaires les plus proches dans les parcours A et B.

Pour la tâche FER, des photographies de modèles mimant des émotions (*e.g.* peur, tristesse, colère, joie, dégout, neutre ; voir Figure 4.5) ont été imprimées avec des marges étroites sur des feuilles aux formats A4 (21 cm par 29.7 cm), ce qui représente un angle apparent de 2.67° à une distance de 7.5 m. Les photographies sont imprimées (et non affichées à travers un écran) de façon à conserver une tâche écologique, notamment en conservant les distributions et sources lumineuses identiques à celles présentes sur site.

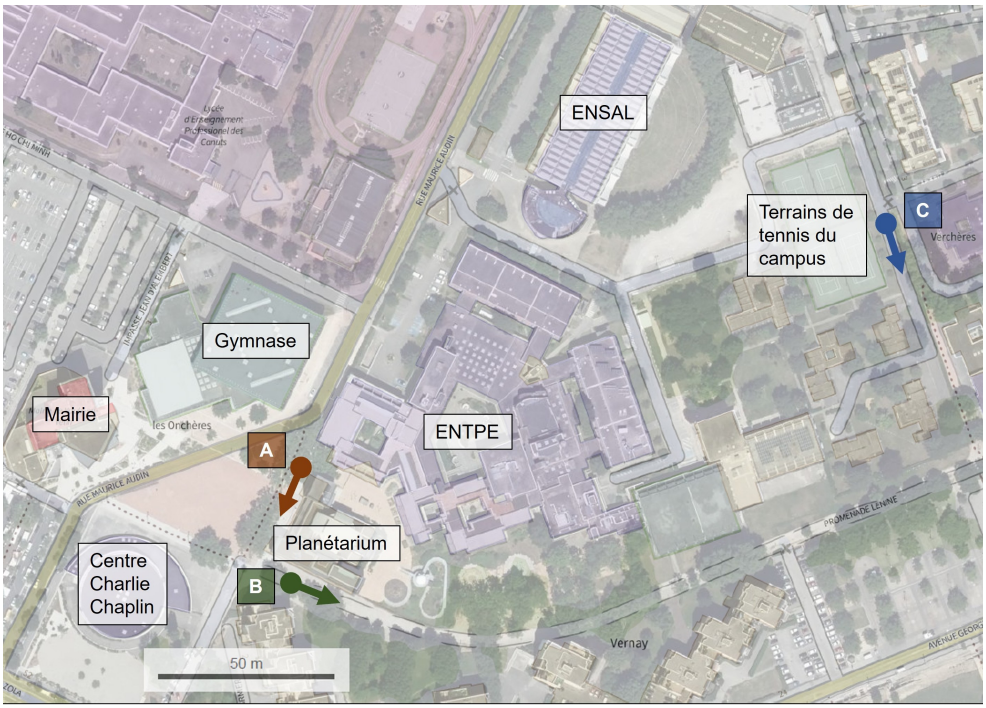


FIGURE 4.1 – Vue aérienne fusionnée avec une carte IGN représentant les environs du campus de l'ENTPE où la localisation des scènes utilisées lors de l'expérience en environnement réel ont été ajoutées. Fonds de carte issus du site geoportail.gouv.fr

	CCT (K)	Éclairement moyen horizontal $E_{\mathrm{h,av}}$ le long du parcours de 15 m (lx)	Uniformité de l'éclairement horizontal $U0 = E_{\mathrm{h,min}}/E_{\mathrm{h,av}}$	Éclairement vertical dans le plan de l'œil $E_{\mathrm{v,stat}}$ au niveau de la position statique (lx)	Rapport entre la dynamique d'éclairement vertical dans le plan de l'œil le long du chemin de 15 m et l'éclairement vertical dans le plan de l'œil en position statique $(E_{\mathrm{v,max}} - E_{\mathrm{v,min}})/E_{\mathrm{v,stat}}$	TI (%)
Scène A	2650	13.8	0.18	4.82	3.97	2.48
Scène B	2570	14.0	0.17	1.21	12.3	0.85
Scène C	1880	0.26	0.38	0.37	0.68	7.04

TABLE 4.1 – Récapitulatif des caractéristiques photométriques des scènes utilisées lors de l'expérience en environnement réel



(a) Scène A (b) Scène B (c) Scène C

FIGURE 4.2 – Photographies des trois scènes (A, B et C) utilisées lors de l'expérience en environnement réel. Les photographies ont été prises aux niveaux des positions statiques des participants

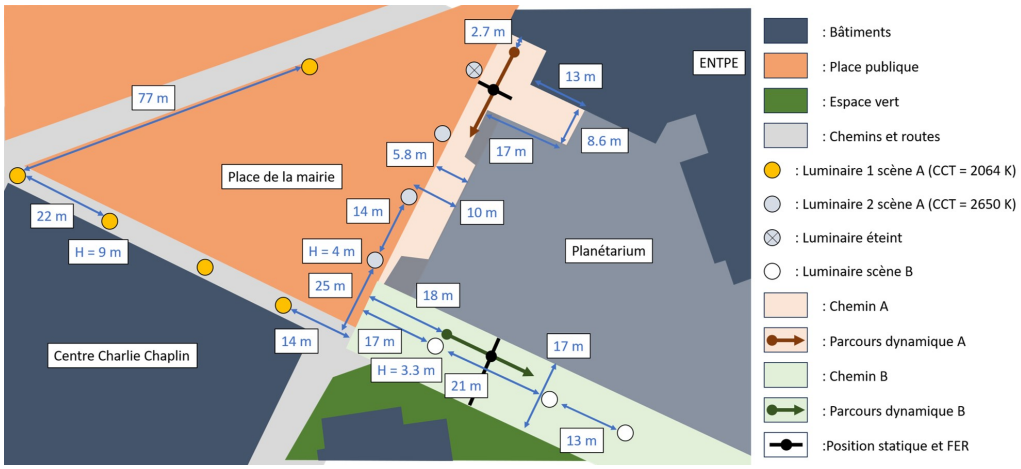
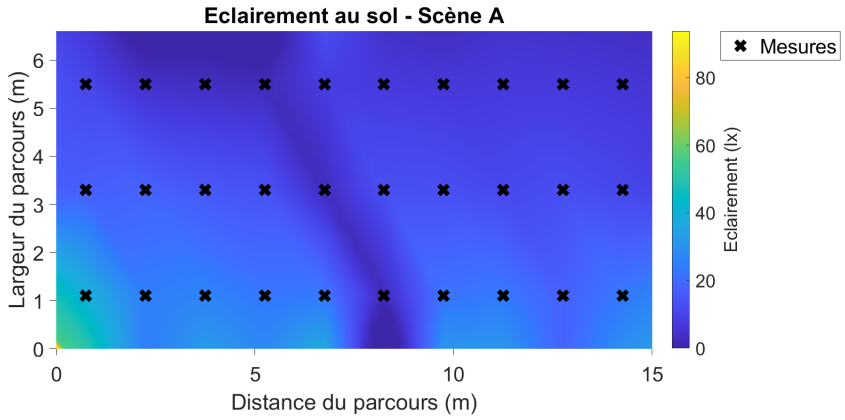
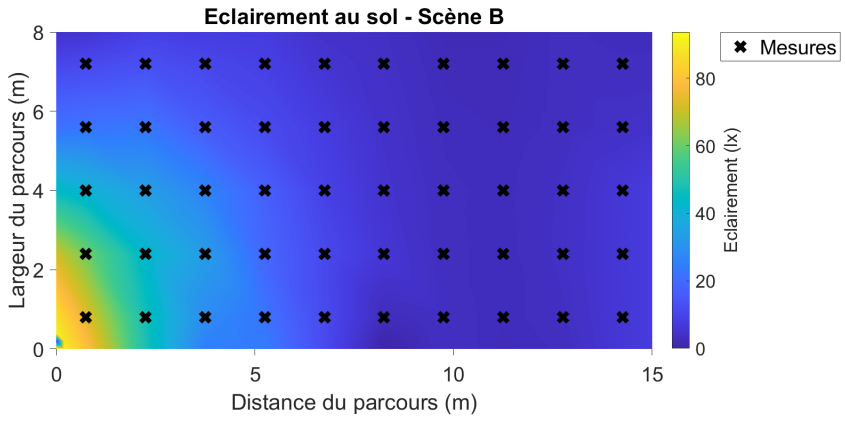


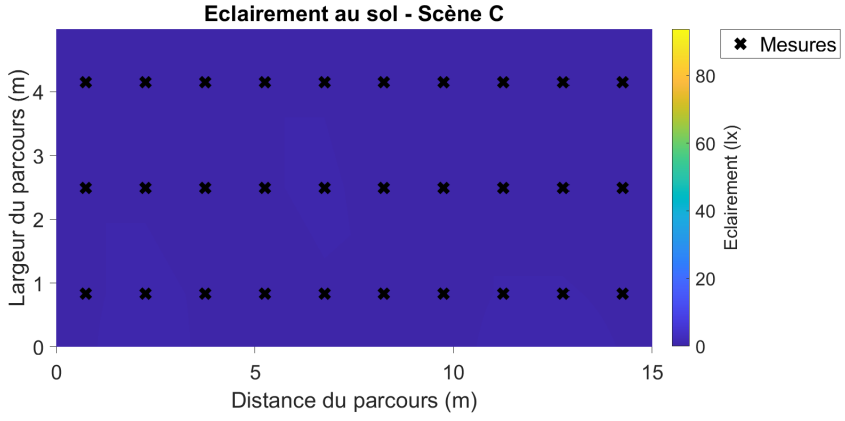
FIGURE 4.3 – Schéma à l'échelle représentant les alentours des parcours A et B



(a) Scène A

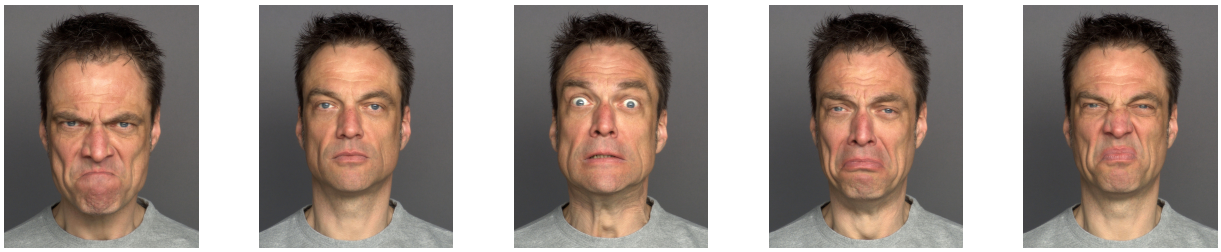


(b) Scène B



(c) Scène C

FIGURE 4.4 – Cartes d'éclairements horizontaux le long du parcours de 15 m pour les scènes de l'expérience en environnement réel



(a) A - « colère » (b) A - « neutre » (c) A - « peur » (d) A - « tristesse » (e) A - « dégout »



(f) B - « colère » (g) B - « joie » (h) B - « neutre » (i) B - « peur » (j) B - « tristesse »



(k) C - « colère » (l) C - « joie » (m) C - « neutre » (n) C - « peur » (o) C - « dégout »

FIGURE 4.5 – Modèles et images utilisées pour la tâche FER. Les images proviennent de la banque d'image de Ebner et al. (2010)

De plus, puisque la distribution des luminances le long du parcours B est beaucoup plus hétérogène que dans les autres scènes (voir Figure 4.4 et Annexe 7.7), nous avons décidé d'ajouter une seconde position statique (appelée statique bis) située à la fin du parcours (voir Figure 4.6). Pour éviter que ce stimuli n'interfère dans le plan expérimental initial, ce stimuli était évalué à la fin. En recueillant toujours les évaluations à la fin dans la scène B, les évaluations comportent un biais d'ordre et ne peuvent être inclues dans les comparaisons finales. Cependant, les résultats relatifs à ce stimuli sont fournis en Annexe 7.8 et sont discutés en section 4.4.



(a) Scène B (b) Scène B bis

FIGURE 4.6 – Photographie de la scène statique bis en comparaison avec la scène statique de la scène B utilisée lors de l'expérience en environnement réel. La photographie statique bis a été prise à la fin du parcours de 15 m

4.2.3 Protocole expérimental

Une session expérimentale est conçue pour faire passer quatre participants en même temps. Un questionnaire papier a été élaboré pour recueillir les réponses des participants au cours de l'expérience (voir Annexe 7.9). Le questionnaire se compose de trois parties, la première partie correspond à la page de garde, elle est présente pour faire un rappel des objectifs de l'expérience et fournir les instructions et consignes pour évaluer une scène et remplir le questionnaire. La seconde partie concerne le corps du questionnaire, où une page correspond à l'évaluation de la qualité de l'éclairage d'une scène en position statique ou dynamique. Enfin, la dernière page contient des questions générales sur une échelle continue de 0 à 100 (« Généralement, lorsque je marche dans la rue, à Vaulx-en-Velin, quand il fait nuit, je me sens en : sécurité–insecurité », « Généralement, lorsque je marche dans la rue, à Vaulx-en-Velin, le jour, je me sens en : sécurité–insecurité », « Généralement, lorsque je marche dans la rue quand il fait nuit, je me sens en : sécurité–insecurité », « Généralement, lorsque je marche dans la rue le jour, je me sens en : sécurité–insecurité » et « Je trouve que l'éclairage public me permet de garantir un niveau de sécurité satisfaisant : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord ») ou encore des données socio-démographiques (*e.g.* âge et sexe).

Une scène est évaluée d'une part en position statique et d'autre part après avoir marché 15 m, appelé dans la suite du manuscrit « position dynamique », par l'ensemble des participants. Pour ce faire, chaque participant se voit attribuer aléatoirement un ordre de passage, statique puis dynamique ou inversement, de sorte que les participants soient séparés en deux binômes. Le premier binôme évaluant la scène en position statique et l'autre en position dynamique, puis inversement lors de la seconde évaluation de la scène. Pour l'évaluation en position statique, les participants pouvaient, pendant qu'ils remplissaient le questionnaire papier, regarder autant de fois qu'ils le désirent la scène. Pour l'évaluation en position dynamique, les participants devaient effectuer le trajet de 15 m puis devaient se mettre sur le côté de façon à ce qu'ils ne puissent plus voir la scène et ensuite remplir le questionnaire sans regarder la scène de nouveau. L'ensemble des groupes de participants voient l'ensemble des scènes suivant un ordre déterminé aléatoirement en assurant un contrebalancement de l'ordre d'apparition des scènes entre tous les groupes de participants.

Ce protocole a été validé par le comité d'éthique de l'Université Gustave Eiffel.

4.2.3.1 Évaluation subjective de la qualité de l'éclairage par questionnaire

Pour la section du questionnaire correspondant à l'évaluation de la qualité de l'éclairage, l'ensemble des critères de qualité de l'éclairage d'une scène urbaine nocturne pour les piétons définis en section 1.2 sont représentés par au moins un item pour lesquels les participants répondent sur une échelle continue de 0 à 100. Pour le critère « Perception de l'ambiance lumineuse », deux items avec des échelles bipolaires « Sombre–Lumineuse » et « Chaude–Froide » largement employées par la communauté scientifique (*e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019 ; Johansson et al., 2014) sont utilisés, ainsi que l'item « Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord ». De plus deux items relatifs à la perception des couleurs du sol et de l'herbe sont également utilisés (voir Figure 4.7). Pour le critère « Performances visuelles », la tâche FER est utilisée. En ce qui concerne l'inconfort dû à l'éblouissement, un item « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » est utilisé. En ce qui concerne le critère portant sur le « Confort et satisfaction générale » de l'éclairage public, deux items sont utilisés, le premier est largement employé dans la littérature scientifique portant sur l'agréabilité des lieux, « Agréable–Désagréable » (*e.g.* Cauwerts, 2013 ; Chamilothori et al., 2019 ; Johansson et al., 2014), et le second item est « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Totalement satisfaisant ». Finalement, concernant le

sentiment de sécurité, en se fondant sur les travaux de Haans and de Kort (2012), trois items sont utilisés : « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord », « J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » et « J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord », ainsi que l'item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité ».

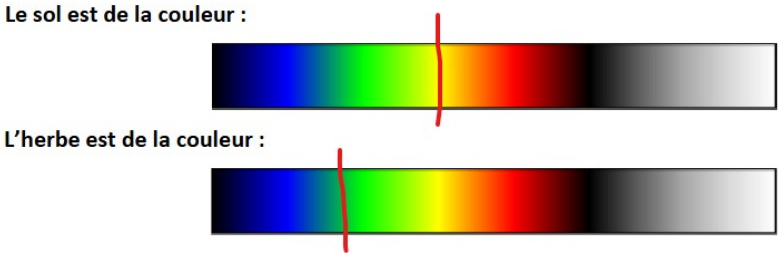


FIGURE 4.7 – Nuancier coloré utilisé pour reporter les perceptions colorées du sol et de l'herbe des participants. Les traits rouges illustrent les réponses d'un participant.

4.2.3.2 Tâche FER

Pour la tâche FER, les participants sont placés au centre des parcours et l'expérimentateur est placé à la fin du parcours. L'expérimentateur montre une émotion qui est imprimée sur une feuille A4. Dans une scène, un groupe de participant voit la même émotion qui est déterminée aléatoirement parmi les cinq possibles. Pour dix répétitions, l'expérimentateur montre l'image en moyenne pendant 550 ms avec un écart-type de 92 ms, ce qui correspond à environ 500 ms comme préconisé dans les travaux de Fotios et al. (2015). Pour éviter tous biais d'apprentissage, les images utilisées ne sont pas montrées en avance aux participants et chaque scène se voit attribuée un modèle et une émotion. L'ensemble des modèles et images utilisées sont répertoriés dans la Figure 4.5. Finalement, ces modèles et images sont sélectionnés de façon à garantir une probabilité de détection théorique (en condition de visibilité normale) similaire (d'après Ebner et al. (2010)), voir Table 4.2 pour des données complémentaires. Pour réaliser la tâche, les participants devaient cocher l'émotion qu'ils détectaient parmi six émotions primaires (« Joie », « Colère », « Tristesse », « Dégout », « Peur » et « Neutre ») ou la case « Je ne sais pas ». L'objectif dans l'introduction de la case « Je ne sais pas », qui est un ajout par rapport à la littérature (*e.g.* Fotios et al., 2015 ; Li et al., 2023 ; Yang and Fotios, 2015), est d'éviter que les participants répondent aléatoirement quand ils ne savent pas.

Scène	Luminance dans le plan de l'image (cd/m^2)	Moyenne pondérée des probabilités de référence (%)
Scène A	0.182	85.3
Scène B	0.120	88.6
Scène C	0.037	85.9

TABLE 4.2 – Données complémentaires concernant les stimuli FER

4.2.4 Procédure

Une séance dure approximativement une heure. Les participants sont accueillis à l'ENTPE entre 18h et 19h30 par groupe (de deux à quatre personnes) par l'expérimentateur. Dans une salle de l'ENTPE, un rappel de l'objectif de l'expérience est donné aux participants et un temps d'échange de cinq minutes environ est mis en place afin de permettre aux participants de se familiariser avec les items du questionnaire et signer le formulaire de consentement.

Une fois arrivés dans la première scène à évaluer, les participants suivent leurs questionnaires individuels afin de savoir s'ils doivent commencer par l'évaluation en position statique ou dynamique. Les participants qui évaluent la scène en dynamique sont envoyés en premier pour effectuer le parcours et ensuite les autres participants se mettent à la position statique. Cette étape est répétée une seconde fois en inversant les rôles des participants (statique et dynamique). Une fois les évaluations statiques et dynamiques terminées, l'ensemble des participants du groupe se place en ligne au niveau du point statique afin d'effectuer les tâches de perceptions colorées avec le nuancier coloré (l'expérimentateur a indiqué en amont ce qui est défini comme « sol » et « herbe »). Finalement, les participants gardent leur position et réalise la tâche FER. Dans la scène B, les participants étaient invités à réaliser une deuxième évaluation en position statique bis (en ligne) à la fin du parcours. Puis les participants et l'expérimentateur changent de scène et répètent l'ensemble des actions.

Une fois l'ensemble des stimuli évalués, les participants sont raccompagnés par l'expérimentateur dans une salle à l'ENTPE pour remplir le questionnaire « final », terminer la procédure de passation et remettre la gratification des participations (10€ en chèque cadeau valable un an).

4.2.5 Plan expérimental

Le plan expérimental est composé de trois scènes A, B et C et deux positions statique ou dynamique. Il s'agit d'un plan à mesures répétées où tous les participants voient l'ensemble des stimuli (plan intra-sujets).

4.2.6 Analyses statistiques

L'utilisation d'échelle continue a permis de collecter des données du niveau d'intervalle / métrique pour lesquelles des statistiques de données métriques peuvent être réalisées. Pour la tâche FER pour laquelle des données nominales ont été collectées, les statistiques seront réalisées sur les proportions (*e.g.* le nombre de bonnes réponses).

Pour effectuer les comparaisons entre les évaluations en position statique et dynamique, puisque les participants ont vu l'ensemble des stimuli, les variables en jeu sont de type intra-sujets. Ainsi, lorsque les hypothèses sont validées (distribution normale et sphéricité) il est possible d'utiliser une analyse de la variance (ANOVA - *Analysis of variance*) à mesures répétées avec les deux facteurs : a. SCENE (trois modalités : A, B ou C) ; b. POSITION (deux modalités : statique ou dynamique). Lorsque la sphéricité n'est pas valide (test de Mauchly) la correction de Greenhouse-Geisser est appliquée. Finalement, lorsque la condition de normalité n'est pas valide (test de Kolmogorov-Smirnov), il n'est plus possible d'utiliser le test paramétrique de l'ANOVA à mesures répétées et des tests de Friedman pour échantillons appariés sont alors réalisés. Ces tests visent à déterminer à l'aide de leur indicateur *p-value* si l'hypothèse nulle peut être validée avec un seuil généralement pris égal à 5 % (erreur de première espèce).

Dans notre cas les hypothèses nulles sont :

$(\tilde{H0})_1$: « Pour un item donné, les évaluations subjectives réalisées sur le site A, B ou C sont similaires »

$(\tilde{H0})_2$: « Pour un item donné, les évaluations subjectives réalisées en position statique ou dynamique sont similaires »

$(\tilde{H0})_3$: « Pour un item donné, il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs SCENE et POSITION »

En complément, il est possible de déterminer à quel point les différences sont grandes d'un point de vue statistique. Il s'agit de l'estimation des tailles d'effet. Plus une taille d'effet sera grande plus cela conforte l'idée selon laquelle l'hypothèse nulle doit être rejetée. Les tailles d'effet issues de l'ANOVA à mesures répétées sont données en utilisant l'indicateur eta carré partiel (η_p^2). Pour les tests non paramétriques (*e.g.* Friedman et Wilcoxon) le d de Cohen est utilisé pour mesurer les tailles d'effet. Les seuils des tailles d'effet sont fournis dans la Table 4.3.

Taille d'effet	Eta carré partiel (η_p^2)	d de Cohen (d)
Faible	0.01	0.2
Modérée	0.06	0.5
Grande	0.14	0.8

TABLE 4.3 – Taille d'effet des indicateurs η_p^2 et d de Cohen. D'après Watson (2021)

Pour analyser les données issues de la tâche FER, nous décidons de séparer les réponses en trois classes : a. les bonnes réponses (G) ; b. les mauvaises réponses (W) ; c. les réponses « Je ne sais pas » (IDK). Ensuite, nous appliquons sur les proportions des classes G / W / IDK, un test de χ^2 de McNemar à mesures répétées avec l'hypothèse nulle $(H0)_4$: « Les proportions des classes issues de la tâche FER sont identiques pour l'ensemble des scènes évaluées ».

Finalement, pour étudier si la tâche FER peut être un indicateur sur le sentiment de sécurité, des ANOVAs sont mises en place (plus de détails sont fournis en section 4.3.3) avec les hypothèses nulles suivantes :

$(\tilde{H0})_5$: « Pour la scène A, les évaluations subjectives du sentiment de sécurité des participants ayant réalisé une performance G / W ou IDK à la tâche FER sont similaires » ;

$(\tilde{H0})_6$: « Pour la scène B, les évaluations subjectives du sentiment de sécurité des participants ayant réalisé une performance G / W ou IDK à la tâche FER sont similaires » ;

$(\tilde{H0})_7$: « Pour la scène C, les évaluations subjectives du sentiment de sécurité des participants ayant réalisé une performance G / W ou IDK à la tâche FER sont similaires ».

4.3 Résultats

4.3.1 Statistiques descriptives et analyse préliminaire

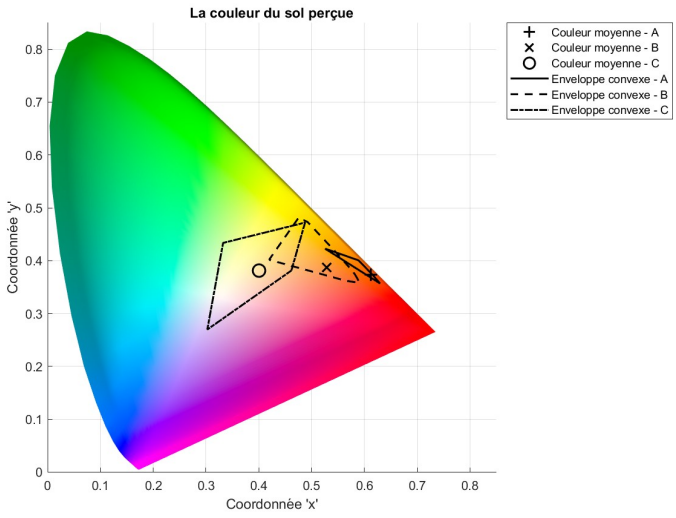
Les valeurs moyennes ainsi que les écarts-types obtenues selon chaque item pour chaque scène sont fournis dans les deux dernières colonnes des Tables 4.7 et 4.8. De plus, des graphiques représentant les valeurs moyennes et les intervalles de confiance à 95 % sont également fournis en Annexe 7.10. Visuellement on remarque que la qualité de l'éclairage dans la scène C est jugée moins bonne que dans les autres scènes.

La Table 4.4 présente les résultats de la tâche FER avec le taux de participants ayant choisis l'émotion réellement présentée (proportion de bonnes réponses), s'étant trompé (proportion de mauvaises réponses) ou ayant coché « Je ne sais pas » (proportion de « Je ne sais pas »).

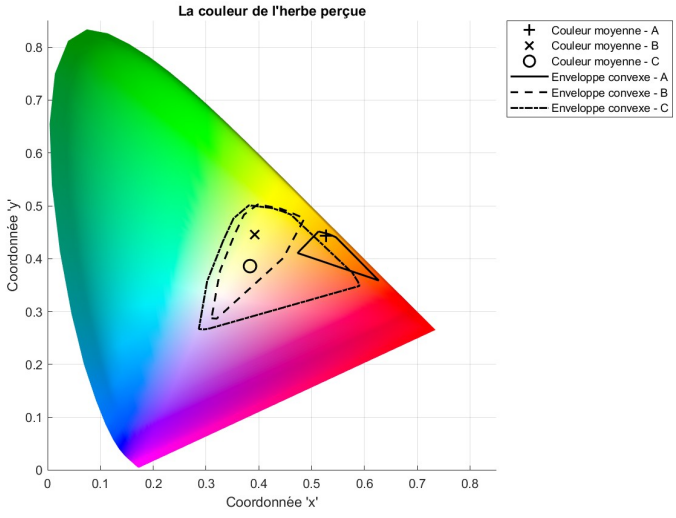
	Bonne réponse (G)	Mauvaise réponse (W)	« Je ne sais pas » (IDK)
Scène A	51.2 %	39.5 %	9.3 %
Scène B	51.2 %	32.5 %	16.3 %
Scène C	37.2 %	20.9 %	41.9 %

TABLE 4.4 – Résultats de la tâche FER pour l'expérience en environnement réel

Pour la tâche de perception colorée, la méthode permettant la conversion des données recueillies (voir Figure 4.7) en des données colorimétriques (espace CIE-XYZ (2°)) est expliquée en Annexe 7.11. Les valeurs moyennes et enveloppes convexes (*i.e.* les valeurs « maximales » et « minimales ») des coordonnées chromatiques x et y que les participants ont reporté comme observés sur site pour la couleur du sol et de l'herbe sont présentées en Figure 4.8. Sur site, les sols sont composés de différents matériaux (A - terre rouge, B - terre marron et C - bitume) ce que l'on retrouve dans les résultats des participants. Concernant les couleurs de l'herbe, dans les scènes B et C l'herbe est perçue plus achromatique que dans la scène A. De plus, les luminaires de la scène A (2064 K et 2650 K) donnent l'impression que l'herbe est « rouge-orange », ce qui est cohérent avec la perception des participants (voir Figure 4.8b).



(a) Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol



(b) Tâche de perception colorée portant sur la couleur de l'herbe

FIGURE 4.8 – Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol et de l'herbe sur site

Enfin, le questionnaire comporte quatre items qui visent à décrire le sentiment de sécurité des participants (trois items provenant de l'étude de Haans and de Kort (2012) et un item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité »). Ainsi, si l'indicateur α de Cronbach le permet, il est possible de regrouper ces quatre items en un nouveau item (SENTIMENT_SECURITE_FUSION) qui est la moyenne des quatre items relatifs au sentiment de sécurité. Néanmoins, il est nécessaire de vérifier au préalable que ces quatre items peuvent se grouper ensemble.

Après avoir réalisé plusieurs analyses en composantes principales (ACP) :

— En prenant les notations de chaque scène en position statique ;

— En prenant les notations de chaque scène en position dynamique ;

— En confondant les notations de chaque scène en position statique ;

— En confondant les notations de chaque scène en position dynamique ;

— En confondant les notations de chaque scène et les positions d'évaluation.

Les quatre items relatifs au sentiment de sécurité ont, à eux quatre, toujours été compris quasiment exclusivement dans un vecteur directeur (métrique utilisée pour les ACPs : Varimax) avec un taux d'appartenance au vecteur directeur regroupant les items de sentiment de sécurité supérieur à 80 % par item. De plus les coefficients α de Cronbach (voir Table 4.5) sont tous supérieurs à 0.7 (Kline, 1999), que ce soit sur les données scène par scène ou les données générales. Ainsi, il est possible de fusionner l'ensemble des items en un nouvel item qui est défini comme la moyenne des quatre items. De plus, il est possible de remarquer qu'il n'y a que pour la scène B qu'enlever un item (item relatif à la cadence de marche) lors de la fusion garantit un meilleur α de Cronbach. La Figure 4.9 présente pour l'item fusionné du sentiment de sécurité la moyenne et l'intervalle de confiance à 95 % pour chaque scène. Visuellement les participants se sentaient globalement plus en sécurité dans la scène A, puis la scène B et moins dans la scène C.

α de Cronbach (statique // dynamique)	ABC_SD	ABC	A	B	C
Avec les quatre items	0.929	0.935 // 0.945	0.878 // 0.927	0.912 // 0.907	0.883 // 0.896
Sans l'item 7)	0.912	0.916 // 0.921	0.842 // 0.913	0.876 // 0.851	0.857 // 0.857
Sans l'item 8)	0.890	0.898 // 0.914	0.816 // 0.874	0.862 // 0.873	0.810 // 0.830
Sans l'item 9)	0.913	0.934 // 0.945	0.860 // 0.915	0.933 // 0.916	0.881 // 0.895
Sans l'item 10)	0.916	0.913 // 0.934	0.859 // 0.917	0.872 // 0.881	0.848 // 0.882

TABLE 4.5 – α de Cronbach pour l'item fusionné « SENTIMENT_SECURITE_FUSION ». « ABC_SD » signifie que l'ensemble des stimuli (toutes scènes confondues et statique/dynamique confondus) a été pris pour le calcul de α. « ABC » signifie que l'ensemble des stimuli par position (toutes les évaluations statiques / toutes les évaluations dynamiques) et scènes a été pris pour le calcul de α. « A » ou « B » ou « C » signifie que seulement les données de la scène « A » ou « B » ou « C » ont été prises pour le calcul de α

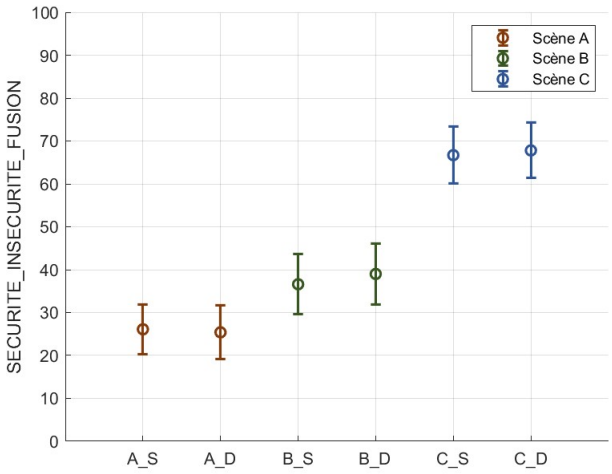


FIGURE 4.9 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item fusionné portant sur le sentiment de sécurité (S - Statique ; D - Dynamique)

4.3.2 Comparaisons des évaluations en position statique et dynamique

Dans cette section sont détaillés les résultats item par item ainsi que l'item fusionné portant sur le sentiment de sécurité. Enfin, les résultats sur l'étude exploratoire (voir Annexe 7.8) sont ajoutés en fin de section.

Les résultats des analyses sont présentés en Tables 4.7 et 4.8, disponibles à la fin du chapitre. Premièrement, un effet significatif du facteur SCENE est révélé pour l'ensemble des critères de qualité de l'éclairage, avec des jugements différents d'une scène à l'autre. Ce résultat est consolidé avec une taille d'effet large ($\eta_p^2 > 0.14$). Les Tables 4.9 et 4.10, disponibles à la fin du chapitre, présentent les résultats des tests post-hoc de Tukey. Nous remarquons que la qualité de l'éclairage est significativement moins bonne pour la scène C que les scènes A et B, excepté pour l'item « Chaud–Froid » pour lequel aucune différence significative entre les scènes C et B est observé (t(42) = -0.915, p = 0.634). De plus, des différences significatives sur les notations moyennes dans les scènes A et B sont observées pour l'ensemble des items, sauf pour les items « Agréable–Désagréable » (t(42) = -1.54, p = 0.282), « Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » (t(42) = 1.66, p = 0.231) et « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant » (t(42) = 2.42, p = 0.051).

Pour une grande majorité des items, il n'y a pas d'effet du facteur POSITION (évaluations en position statique ou dynamique), sauf pour les deux items suivants : « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène » (F(1,42) = 5.24, p = 0.027, $\eta_p^2 = 0.111$) et « Je vois le sol » (F(1,42) = 5.44, p = 0.025, $\eta_p^2 = 0.115$) où l'on observe des tailles d'effet moyennes/grandes. En effet, les participants ressentent légèrement plus de gêne quant à l'idée de marcher dans la scène après l'avoir fait (évaluations dynamiques ; scène A / B / C - M = 24 / 41 / 69) plutôt que d'après leurs projections (évaluations statiques ; M = 23 / 36 / 64). La visibilité perçue est significativement meilleure en position statique (M = 83 / 74 / 37) plutôt qu'après s'être déplacé (M = 76 / 73 / 33). Aucun différence significative n'est observée sur les autres items relatifs à la tâche de déplacement, par exemple la cadence de marche. Finalement, il est bon de noter que de grandes tailles d'effet sont observées pour les items « Sombre–Lumineux » et « Agréable–Désagréable » alors qu'il n'y a

pas d'effet du facteur POSITION (resp. p = 0.053, $\eta_p^2 = 0.086$; p = 0.064, $\eta_p^2 = 0.079$).

Finalement, une interaction SCENExPOSITION a été trouvée pour l'item « Sombre-Lumineux ». Le test post-hoc de Tukey révèle qu'il y a une différence significative entre les notes moyennes obtenues en position statique et dynamique pour la scène B (t(42) = -3.08, p = 0.039) mais pas dans la scène A (t(42) = -1.31, p = 0.777) et la scène C (t(42) = 0.08, p = 1.000). Lorsque l'on observe les valeurs moyennes (voir Table 4.7) la scène B a été jugée plus lumineuse après un déplacement (dynamique) que lorsque les participants étaient statiques.

En considérant l'item fusionné (voir dernière ligne de la Table 4.8), aucun effet du facteur POSITION (F(1,42) = 0.572, p = 0.454 ; $\eta_p^2 = 0.013$) ou de l'interaction SCENExPOSITION (F(2,84) = 0.689, p = 0.505 ; $\eta_p^2 = 0.016$) n'est révélé. De plus, l'ANOVA à mesures répétées confirme les observations de la Figure 4.9, c'est-à-dire que la scène A procure un plus grand sentiment de sécurité que la scène B qui est plus grand que la scène C.

Finalement, concernant l'étude exploratoire (voir Annexe 7.8), puisque les données sont sujettes au biais d'ordre les résultats sont à prendre avec précaution. Pour l'ensemble des items nous observons un effet significatif sur le facteur POSITION (Statique / Dynamique / Statique bis), à l'exception de l'item « J'éviterais de marcher dans la scène » (p > 0.05). De plus, sauf pour l'item « J'éviterais de marcher dans la scène », les tests post-hoc de Tukey révèlent des différences significatives entre les évaluations statique et statique bis (p < 0.03). Des différences significatives sont également visibles entre les évaluations statique bis et dynamique pour l'ensemble des items, à l'exception des items « Agréable–Désagréable » (p > 0.05) et « Je me sens en : Sécurité–Insécurité » (p > 0.05). Concernant l'inconfort dû à l'éblouissement, le test de Friedman et les tests post-hocs non paramétriques montrent qu'il y a une différence significative entre l'évaluation en position statique bis (avec un éclairement vertical dans le plan de l'œil de 14.2 lx) et les évaluations statique et dynamique (p < 0.001).

4.3.3 Tâche FER

Le taux de réponse pour chaque condition expérimentale a été comparé en utilisant un test de χ^2 de McNemar à mesures répétées. Aucune différence significative sur les proportions des réponses à la tâche FER entre les scènes A et B n'apparaît ($\chi^2(3) = 1.43$, p = 0.699). Des différences significatives apparaissent entre les proportions des réponses pour les scènes A et C ($\chi^2(3) = 12.1$, p = 0.007) et entre B et C ($\chi^2(3) = 12.1$, p = 0.007), qui sont liés aux proportions différentes de réponses « Je ne sais pas ». En effet, 41.9 % des participants ont reporté ne pas reconnaître l'émotion présentée dans la scène C contre 9.3 % (resp. 16.3 %) pour la scène A (resp. B).

Pour étudier si le sentiment de sécurité peut être prédit par la performance à la tâche FER, nous avons réalisé, par scène, une ANOVA sur la variable sentiment de sécurité fusionnée issue des évaluations dynamiques avec le facteur REPONSE_FER (bonne réponse - G ; mauvaise réponse - W ; « Je ne sais pas » - IDK). Pour chaque scène, les participants ont été regroupés selon leur réponse à la tâche FER (G, W, IDK). Ainsi, pour chaque scène, nous avons obtenu trois échantillons de notes relatives au sentiment de sécurité, un pour chaque type de réponse à la tâche FER. La normalité a été vérifiée à partir de tests de Kolmogorov-Smirnov. Les notes moyennes ainsi que les intervalles de confiance par scène et issues de chaque classe de réponse FER (G, W et IDK) sont fournis en Figures 4.10 à 4.12. Que ce soit pour la scène A, B ou C, aucun effet significatif n'est observé pour le facteur REPONSE_FER : Scène A - F(2,40) = 1.65, p = 0.204, $\eta_p^2 = 0.204$; Scène B - F(2,40) = 0.635, p = 0.535, $\eta_p^2 = 0.031$; Scène C - F(2,40) = 1.31, p = 0.281, $\eta_p^2 = 0.062$.

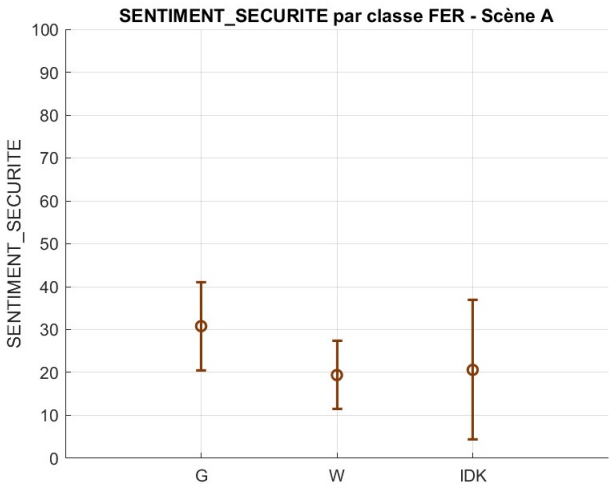


FIGURE 4.10 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item sentiment de sécurité fusionné (évaluations dynamiques) par classe de réponse FER - scène A

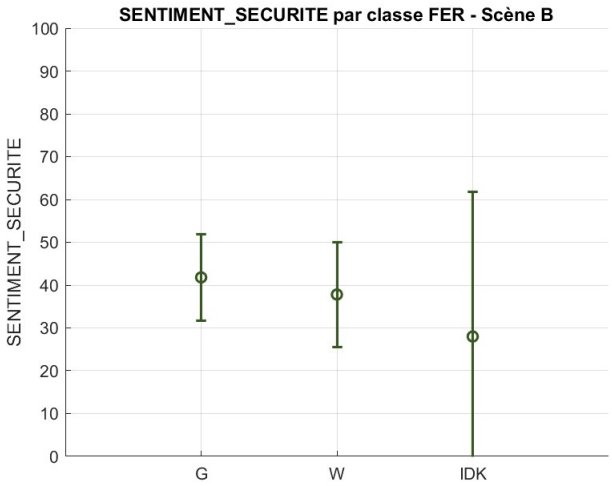


FIGURE 4.11 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item sentiment de sécurité fusionné (évaluations dynamiques) par classe de réponse FER - scène B

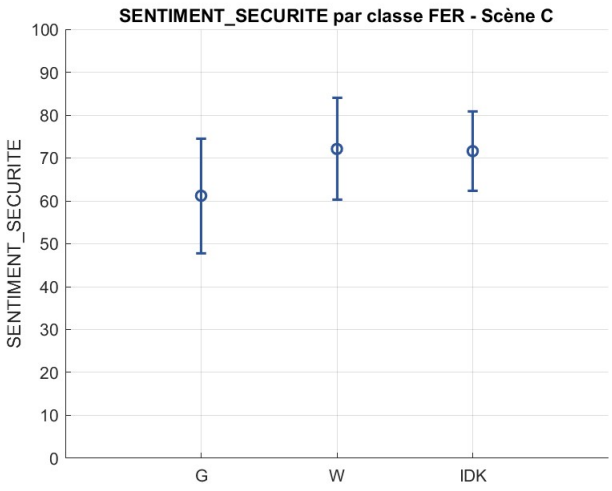


FIGURE 4.12 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item sentiment de sécurité fusionné (évaluations dynamiques) par classe de réponse FER - scène C

4.4 Discussion

4.4.1 Contributions

Sur la majorité des critères de qualité de l'éclairage, aucune différence n'a été mise en évidence entre une évaluation en position statique et après s'être déplacé sur 15 m. En effet, lors des comparaisons entre les évaluations statiques et dynamiques, les items relatifs aux critères de confort et satisfaction générale de l'ambiance lumineuse ne sont pas impactés par le mode d'évaluation (statique ou dynamique), ce qui confirme les résultats de la littérature scientifique (e.g. Stamps (1990) et Stamps (2010)).

Pour le sentiment de sécurité, tous les items (à l'exception de l'item « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène ») ne sont pas sensibles au mode d'évaluation, ce qui peut être lié au fait que la première impression (le fait de venir sur site) permet aux participants de déterminer s'ils se sentent en sécurité avant même de réaliser les évaluations. De plus, lors de la fusion des items relatifs aux sentiments de sécurité, la moyenne des quatre items n'est pas sensible au mode d'évaluation. Pour l'item « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène », la différence significative qu'il y a entre les modes d'évaluation (statique ou dynamique) peut s'expliquer par le fait qu'en position statique leur projection dans la tâche de déplacement est différente de ce qu'ils ressentent vraiment après avoir marché le long du parcours de 15 m, ce résultat pourrait être intéressant à confirmer dans des études futures.

Pour le critère « d'inconfort dû à l'éblouissement » aucune différence significative n'est observée entre les deux modes d'évaluation, ce qui n'est pas confirmé par la littérature scientifique (Bullough et al., 2003 ; Villa et al., 2017). Cette divergence de résultats par rapport à la littérature peut être lié au fait que l'échelle utilisée dans l'étude n'est pas la même. Mais il est plus probable que ce soit lié au fait que durant notre expérience les participants n'étaient pas (ou faiblement) éblouis ($M < 22$ - sur une notation allant à 100).

Pour l'item « Je vois le sol » on observe une différence significative entre les évaluations statiques et dynamiques. Cela peut être lié au fait que lors de l'évaluation statique les participants ont surévalués leurs capacités à voir le sol contrairement à ce qu'ils ont vu lorsqu'ils se sont déplacés (M statique // dynamique de la Scène : A - 83 // 76 ; B - 74 // 73 ; C - 37 // 33).

Enfin, sur la perception de l'ambiance lumineuse, aucune différence n'est observée pour l'item « Chaud–Froid ». En revanche pour l'item « Sombre–Lumineux » nous observons une interaction due à une différence d'évaluation entre les positions statique et dynamique dans la scène B. L'étude exploratoire au point statique bis soulève la question du choix pertinent de la position statique dans une scène de luminosité variable comme celle-ci.

En effet, le choix du point statique pourrait modifier les jugements subjectifs des participants. Dans l'analyse exploratoire réalisée sur des données biaisées (biais d'ordre), des différences significatives ont été observées entre les évaluations à la position statique bis en fin de parcours et celles recueillies en dynamique ou à mi-parcours. Cette différence peut être due au fait que les distributions des luminances dans le champ visuel des participants est différent entre la position statique et statique bis. En effet, le point statique était situé entre deux luminaires tandis que le point statique bis se situait très proche d'un luminaire. Or, Haans and de Kort (2012) ont mis en évidence, dans l'évaluation d'une scène urbaine nocturne, l'importance du luminaire le plus proche du piétons (même si dans leur étude les luminaires étaient espacés de 20 m).

La tâche FER telle que mise en œuvre ne semble pas pertinente pour discriminer les scènes que ce soit du point de vue de la performance visuelle ou du lien avec le sentiment de sécurité. En effet, la mise en œuvre sur site de la tâche FER pourtant proposée comme écologique dans la littérature présente certaines limites et n'a pas permis de discerner les scènes A et B. La position à laquelle doit être réalisée la tâche FER et les évaluations sur site méritent de plus amples investigations.

4.4.2 Limites et perspectives

L'expérience présente diverses limites. Premièrement, les participants ont été amenés sur site sans que leurs yeux soient bandés, ce qui leur a permis d'avoir déjà un a priori des lieux. Concernant le choix des stimuli, les participants ont parcouru une distance fixe de 15 m et ont évalué la scène à une seule position statique au milieu du parcours. D'autres études sont nécessaires pour étudier si la distance du parcours impacte les jugements subjectifs et si le choix de la position statique relativement à la distance du parcours impacte les jugements subjectifs. En effet, une étude exploratoire (étude comportant un biais d'ordre) réalisant des comparaisons (deux à deux) entre les positions statique au milieu du parcours, à la fin du parcours de la scène B et dynamique le long du parcours ouvre des questions de recherche méthodologiques pour déterminer la position statique la plus pertinente à utiliser pour recueillir des jugements similaires à ceux que les piétons auraient en marchant sous une installation d'éclairage au regard de la variabilité des conditions lumineuses dans la scène étudiée, notamment sur les critères en lien avec la visibilité perçue et la perception de luminosité dans la scène.

Concernant le questionnaire et le traitement des données, lors des évaluations les participants n'ont pas évalué l'uniformité perçue de la scène, ce qui aurait pu fournir des résultats intéressants notamment sur la scène B où l'on observe de grandes différences photométriques entre les positions d'évaluations. De plus, lors de la conversion des données issues de la tâche de perception colorée, nous avons fait le choix de passer par l'espace colorimétrique CIE-XYZ (2°) qui n'est valable qu'en vision photopique. Ce choix peut être contesté, notamment pour la scène C, mais permet une analyse « simple » des données qui coïncide avec l'approche « facilement déployable » des outils que l'on

souhaite mettre en place dans les travaux de thèse.

En complément, pour la tâche FER, les stimuli étaient des images imprimées sur des feuilles, ce qui pouvaient sur site rendre la tâche plus difficile dû au reflet que les luminaires peuvent introduire sur les feuilles. De plus, les stimuli FER étaient présentés une seule fois par l'expérimentateur ce qui introduit des variations dans la présentation des stimuli rendant la tâche plus difficile ($\Delta t <$ 500 ms) ou plus simple ($\Delta t >$ 500 ms) et pas assez de répétitions pour une tâche de performance visuelle. En perspective, des visages 3D pourraient être utilisés (Mao and Fotios, 2022) et différentes distances testées avec davantage de répétitions.

4.5 Conclusion

Une expérience psychovisuelle (N = 43) incluant trois scènes comportant des installations d'éclairage différentes (température de couleur, uniformité, niveau d'éclairement) a été menée auprès de participants, appelés à évaluer la qualité de l'éclairage vis-à-vis de différents critères de qualité de l'éclairage. Les évaluations ont été réalisées à travers une tâche écologique (déplacement sur 15 m) et dans une position statique (à mi-chemin du parcours). De plus, la tâche de performance visuelle FER (reconnaissance faciale d'émotion - *facial emotion recognition*) initialement proposée en laboratoire a été mise en œuvre sur site à un endroit donné du parcours.

Il a été démontré que les scènes sélectionnées ont bien été perçues comme significativement différentes au vu des critères de qualité de l'éclairage étudiés : perception de l'ambiance lumineuse ; performance visuelle à travers la tâche FER ; sentiment de sécurité ; inconfort dû à l'éblouissement ; confort et satisfaction générale.

Aucune différence significative n'a été observée entre les évaluations en statique ou après avoir marché 15 m sur la majorité des critères de qualité de l'éclairage sauf pour un item relatif à la projection dans l'exercice de déplacement (« Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord-Tout à fait d'accord ») et la visibilité perçue (« Je vois le sol : Pas du tout d'accord-tout à fait d'accord »). Dans une scène peu uniforme le long du parcours, la perception de la luminosité de la scène différait entre les évaluations réalisées en positions statique et dynamique. Ainsi, dans des travaux futurs, réaliser de nouveau les comparaisons entre évaluations statiques et dynamiques pour ces items en échantillonnant différentes positions statiques le long du parcours permettrait de consolider les résultats de cette étude.

La mise en œuvre de la tâche FER (à 7.5 m) sur site et non en laboratoire, contrairement à la littérature, a permis de discuter les limites de cette tâche pour évaluer la qualité de l'éclairage pour les piétons (voir sous-section 4.4.2). De plus, aucun lien direct n'a pu être établi entre la performance à la tâche FER et le sentiment de sécurité.

Ces conclusions nous permettent de considérer les évaluations aux positions statiques comme une vérité terrain suffisante à comparer aux prises de vues statiques qui seront évaluées en environnement virtuel. Enfin, la Table 4.6 fournit un récapitulatif des résultats présentés dans ce chapitre en fonction des hypothèses soulevées en section 4.1.

Description de l'hypothèse	Validation	Remarque
(H1) Selon les résultats de Stamps (1990, 2010), les jugements subjectifs portant sur le critère de qualité de l'éclairage « confort » (attrait de la scène) ne sont pas sensibles aux modes d'évaluations (statique ou dynamique) réalisés sur site	Validée	Validée pour le point statique au milieu du parcours et invalidée pour le point statique en fin de parcours de la scène B
(H2) Selon les résultats de Bullough et al. (2003) et Villa et al. (2017), les jugements subjectifs portant sur le critère de qualité de l'éclairage « inconfort lié à l'éblouissement » sont sensibles aux modes d'évaluations (statique ou dynamique) réalisés sur site	Validée	Validée pour le point statique au milieu du parcours et invalidée pour le point statique en fin de parcours de la scène B
(H3) La luminosité et l'uniformité perçue (critère de qualité « perception de l'ambiance lumineuse »), en lien direct avec la distribution des luminances dans le champ visuel des participants, est sensible aux modes d'évaluations (statique ou dynamique) réalisés sur site	Validée	L'uniformité n'a pas été étudiée dans la thèse
(H4) Les jugements subjectifs portant sur le critère de qualité de l'éclairage « sentiment de sécurité » ne sont pas sensibles aux modes d'évaluations (statique ou dynamique) réalisés sur site, à l'exception des items relatifs à des projections dans la tâche de déplacement (Haans and de Kort, 2012)	Validée	Validée pour le point statique au milieu du parcours et invalidée pour le point statique en fin de parcours de la scène B
(H5) La tâche FER est une tâche de performance visuelle qui permet de différencier les scènes dont la qualité de l'éclairage pour les piétons diffère	Validée	L'hypothèse est validée entre les scènes A et C, et les scènes B et C
(H6) Selon les suggestions de Fotios and Johansson (2019), il existe un lien entre la performance à la tâche FER et le sentiment de sécurité (*e.g.* les piétons qui ont les meilleurs performances à la tâche FER se sentent d'avantage en sécurité que ceux qui ne savent pas reconnaître les émotions présentées)	Invalidée	

TABLE 4.6 – Récapitulatif des hypothèses testées et de leur validité - expériences en environnement réel

Item (0-100)	Facteur SCENE (A / B / C)	Facteur POSITION (Statique / Dynamique)	Interaction SCENE x POSITION	Moyenne (écart-type) des évaluations « Statique »	Moyenne (écart-type) des évaluations « Dynamique »
1) Sombre–Lumineux	**$F(1.8, 73) = 108$;** **$p_g < 0.001^*$;** $\eta_p^2 = 0.720$	$F(1,42) = 3.97$; $p = 0.053$; $\eta_p^2 = 0.086$	**$F(2,84) = 3.82$;** **$p = 0.026$;** $\eta_p^2 = 0.083$	A = 59.3 (23.4) B = 42.8 (18.8) C = 16.9 (16.3)	A = 63.5 (21.2) B = 52.1 (19.7) C = 16.7 (14.4)
2) Agréable–Désagréable	**$F(2, 84) = 44.8$;** **$p < 0.001$;** $\eta_p^2 = 0.516$	$F(1,42) = 3.61$; $p = 0.064$; $\eta_p^2 = 0.079$	$F(2,84) = 0.06$; $p = 0.939$; $\eta_p^2 = 0.001$	A = 41.1 (24.7) B = 46.8 (22.1) C = 72.7 (17.5)	A = 37.3 (22.1) B = 42.6 (18.9) C = 67.4 (20.5)
3) Chaud–Froid	**$F(2, 84) = 20.3$;** **$p < 0.001$;** $\eta_p^2 = 0.326$	$F(1,42) = 0.515$; $p = 0.477$; $\eta_p^2 = 0.012$	$F(2,84) = 2.245$; $p = 0.112$; $\eta_p^2 = 0.051$	A = 39.4 (23.7) B = 53.3 (19.4) C = 57.1 (25.0)	A = 37.2 (22.5) B = 56.3 (18.4) C = 59.3 (24.1)
4) Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(2, 84) = 78.9$;** **$p < 0.001$;** $\eta_p^2 = 0.652$	**$F(1,42) = 5.44$;** **$p = 0.025$;** **$\eta_p^2 = 0.115$**	$F(2,84) = 1.30$; $p = 0.277$; $\eta_p^2 = 0.030$	A = 83.2 (15.7) B = 74.2 (24.3) C = 37.3 (25.2)	A = 75.8 (19.0) B = 73.0 (23.1) C = 32.5 (25.9)
5) Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	~~X~~	A : $p = 0.555$; B : $p = 0.282$; C : $p = 0.576$	~~X~~	A = 17.0 (22.0) B = 20.5 (25.3) C = 18.0 (25.1)	A = 14.1 (17.1) B = 22.1 (26.0) C = 20.0 (24.8)
6) Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant	**$F(2, 84) = 104$;** **$p < 0.001$;** $\eta_p^2 = 0.713$	$F(1,42) = 0.024$; $p = 0.878$; $\eta_p^2 = 0.001$	$F(2,84) = 0.045$; $p = 0.956$; $\eta_p^2 = 0.001$	A = 67.3 (22.8) B = 57.3 (21.4) C = 17.1 (19.2)	A = 67.4 (21.1) B = 58.2 (22.6) C = 17.0 (18.1)

TABLE 4.7 – Résultats des ANOVAs à mesures répétées de l'expérience en environnement réel hors item relatif au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$). Pour l'item 5) un test non paramétrique de Friedman a été réalisé

Item (0-100)	Facteur SCENE (A / B / C)	Facteur POSITION (Statique / Dynamique)	Interaction SCENE x POSITION	Moyenne (écart-type) des évaluations « Statique »	Moyenne (écart-type) des évaluations « Dynamique »
7) Je me sens en : Sécurité–Insécurité	**$F(2, 84) = 62.5$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.598$**	$F(1,42) = 1.04$; $p = 0.314$; $\eta_p^2 = 0.024$	$F(2,84) = 0.620$; $p = 0.620$; $\eta_p^2 = 0.011$	A = 33.8 (24.8) B = 43.9 (23.0) C = 70.1 (21.6)	A = 30.0 (20.9) B = 42.1 (23.9) C = 69.6 (20.0)
8) Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(2, 84) = 71.7$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.630$**	**$F(1,42) = 5.24$; $p = 0.027$; $\eta_p^2 = 0.111$**	$F(2,84) = 0.414$; $p = 0.620$; $\eta_p^2 = 0.010$	A = 22.9 (19.9) B = 36.4 (24.8) C = 63.9 (24.8)	A = 24.4 (22.6) B = 41.0 (24.3) C = 68.5 (22.8)
9) J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(2, 84) = 56.6$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.574$**	$F(1,42) = 0.471$; $p = 0.496$; $\eta_p^2 = 0.011$	$F(2,84) = 2.42$; $p = 0.095$; $\eta_p^2 = 0.055$	A = 27.7 (23.7) B = 35.9 (26.3) C = 68.4 (25.7)	A = 26.7 (22.8) B = 41.7 (29.7) C = 66.7 (24.5)
10) J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(2, 84) = 83.9$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.666$**	$F(1,42) = 0.630$; $p = 0.432$; $\eta_p^2 = 0.015$	$F(2,84) = 0.203$; $p = 0.816$; $\eta_p^2 = 0.005$	A = 19.8 (19.9) B = 30.2 (27.8) C = 64.2 (27.6)	A = 20.7 (22.6) B = 31.0 (25.4) C = 66.7 (27.9)
Item fusionné « SENTIMENT _SECURITE »	**$F(2, 84) = 85.3$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.670$**	$F(1,42) = 0.572$; $p = 0.454$; $\eta_p^2 = 0.013$	$F(2,84) = 0.689$; $p = 0.505$; $\eta_p^2 = 0.016$	A = 26.1 (19.0) B = 36.6 (22.7) C = 66.7 (21.5)	A = 25.4 (20.2) B = 39.0 (22.9) C = 67.8 (20.9)

TABLE 4.8 – Résultats des ANOVAs à mesures répétées de l'expérience en environnement réel pour les items relatifs au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$).

Item (0-100)	Scène A - Scène B	Scène A - Scène C	Scène B - Scène C	Interprétation visuelle
1) Sombre–Lumineux	t(42) = 3.86 $p_{tukey} = 0.001$	t(42) = 14.87 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = 11.74 $p_{tukey} < 0.001$	A > B > C
2) Agréable–Désagréable	t(42) = -1.54 $p_{tukey} = 0.282$	t(42) = -8.44 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -7.91 $p_{tukey} < 0.001$	A = B < C
3) Chaud–Froid	t(42) = -4.97 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -6.81 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -0.915 $p_{tukey} = 0.634$	A < B = C
4) Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	t(42) = 1.66 $p_{tukey} = 0.231$	t(42) = 11.1 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = 9.72 $p_{tukey} < 0.001$	A = B > C
5) Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord				
6) Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant	t(42) = 2.42 $p_{tukey} = 0.051$	t(42) = 15.1 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = 10.8 $p_{tukey} < 0.001$	A = B > C

TABLE 4.9 – Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur SCENE) hors items relatifs au sentiment de sécurité.

Item (0-100)	Scène A - Scène B	Scène A - Scène C	Scène B - Scène C	Interprétation visuelle
7) Je me sens en : Sécurité–Insécurité	t(42) = -3.21 $p_{tukey} = 0.007$	t(42) = -11.1 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -7.45 $p_{tukey} < 0.001$	A < B < C
8) Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	t(42) = -4.35 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -11.6 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -7.51 $p_{tukey} < 0.001$	A < B < C
9) J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	t(42) = -3.27 $p_{tukey} = 0.006$	t(42) = -10.0 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -6.98 $p_{tukey} < 0.001$	A < B < C
10) J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	t(42) = -3.35 $p_{tukey} = 0.005$	t(42) = -11.7 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -8.83 $p_{tukey} < 0.001$	A < B < C
Item fusionné « SENTIMENT _SECURITE »	t(42) = -3.7 $p_{tukey} = 0.002$	t(42) = -10.7 $p_{tukey} < 0.001$	t(42) = -7.86 $p_{tukey} < 0.001$	A < B < C A < B < C

TABLE 4.10 – Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur SCENE) pour les items relatifs au sentiment de sécurité.

Chapitre 5

Expérimentation en environnement virtuel et comparaisons réel et virtuel

Dans le chapitre 4, le recueil de jugements subjectifs portant sur l'évaluation de la qualité de l'éclairage a été effectué sur site. Cependant, recueillir les jugements subjectifs sur site est soumis à des contraintes logistiques et climatiques. Une autre façon de recueillir les jugements subjectifs est de réaliser des évaluations en environnement virtuel, c'est-à-dire via des dispositifs d'affichage. Pour valider l'usage d'un environnement virtuel pour le recueil de jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage, il est nécessaire de réaliser des comparaisons entre les évaluations réalisées sur site (*i.e.* vérité terrain) et en environnement virtuel. Cependant, comme abordé dans le chapitre « État de l'art » (voir section 1.5), l'usage d'environnement virtuel pour réaliser le recueil de jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage n'a été validé quasiment que pour des scènes diurnes / en intérieur.

Pour réaliser le recueil de jugements subjectifs en environnement virtuel il est nécessaire de définir la chaîne d'acquisition / restitution, le dispositif d'affichage et les conditions d'évaluations (lieu et éclairage ambiant où les évaluations sont réalisées). La section 5.1 vise à définir les objectifs, la démarche scientifique et les hypothèses qui seront étudiées dans ce chapitre.

5.1 Objectifs, démarche scientifique et hypothèses

5.1.1 État de l'art

Cette section est une synthèse de l'état de l'art, section 1.5.

Premièrement, il n'y a que peu d'études qui traitent de la validation d'environnement virtuel pour l'évaluation de la qualité de l'éclairage des scènes urbaines nocturnes (*e.g.* Bishop and Rohrmann, 2003). La majorité d'études est réalisée dans le contexte d'évaluation de scènes photopiques et qui, par conséquent, utilisent des algorithmes prenant en compte exclusivement la vision photopique. En particulier, une chaîne d'acquisition / restitution qui est grandement utilisée dans la littérature consiste en la réalisation d'images HDR étalonnées par rapport à la luminance d'un point de la scène qui sont ensuite compressées par l'algorithme de Reinhard et al. (2002), permettant ainsi d'afficher ces images HDR indépendamment de la dynamique de reproduction de l'écran (écran LDR ou HDR). Néanmoins, il existe des algorithmes prenant en compte la vision mésopique (*e.g.* Mikamo et al., 2014 ; Rezagholizadeh, 2016 ; Wanat and Mantiuk, 2014). Cependant, ces algorithmes n'ont pas été validés dans le cadre de l'évaluation de la qualité de l'éclairage des scènes urbaines nocturnes.

Le degré de fidélité de reproduction des scènes réelles dans les environnements virtuels semble impacter certains critères de la qualité de l'éclairage. Par exemple, les travaux de Newsham et al. (2010) mettent en avant que l'usage d'écran HDR permet d'obtenir des jugements subjectifs portant sur l'inconfort dû à l'éblouissement identiques entre l'évaluation sur site et en environnement virtuel. Alors que, lorsque les auteurs utilisent un écran LDR, ils trouvent un effet significatif du mode d'évaluation (sur site / en environnement virtuel). Pour d'autres critères, tels que la satisfaction ou le confort, le degré d'immersion semble plus important que le rendu physiquement réaliste (Cauwerts, 2013).

En complément à la chaîne d'acquisition / restitution et au dispositif d'affichage, l'ambiance lumineuse dans la pièce où est réalisée l'évaluation en environnement virtuel est généralement soit dans le noir, soit avec une ambiance lumineuse similaire à celle présente sur site (*i.e.* fond lumineux uniforme proche de la luminance moyenne présente sur site - Newsham et al. (2010)). Cependant, des travaux (*e.g.* Devlin et al., 2006 ; Mantiuk et al., 2008) mettent en avant que le fond lumineux ambiant peut impacter les jugements subjectifs des participants.

5.1.2 Objectifs

Au regard des objectifs de la thèse et des verrous scientifiques identifiés dans l'état de l'art, les objectifs de ce chapitre sont :

1. collecter, pour les trois scènes évaluées en environnement réel, les ressentis subjectifs de la qualité de l'éclairage en environnement virtuel via plusieurs chaînes d'acquisition / restitution ;
2. comparer les jugements subjectifs issus de l'évaluation sur site et en environnement virtuel afin de déterminer quelle chaîne d'acquisition / restitution utiliser pour quel critère de qualité de l'éclairage ;
3. explorer la possibilité d'ajuster les niveaux lumineux du dispositif d'affichage de façon à ce que les ressentis subjectifs de la qualité de l'éclairage ne soient pas différents d'une condition lumineuse ambiante à une autre ;
4. étudier la possibilité d'objectiver, via une tâche de détection des contrastes, l'ajustement des niveaux lumineux du dispositif d'affichage en fonction de l'éclairage ambiant pour garantir des ressentis subjectifs identiques d'une condition lumineuse ambiante à une autre.

5.1.3 Démarche et hypothèses

Au regard des conclusions de l'état de l'art, il est possible de formuler les hypothèses suivantes :

(H1) Selon les résultats de Abd-Alhamid et al. (2019), Bishop and Rohrmann (2003), Cauwerts (2013), Newsham et al. (2010) et Stamps (1990, 2010), les jugements subjectifs portant sur le critère de qualité de l'éclairage « confort » ne sont pas sensibles aux environnements d'évaluation,*i.e.* sur site ou en environnement virtuel, et cela indépendamment de la qualité de reproduction physico-perceptive des environnements virtuels (écran LDR / HDR ou casque RV ou technologie type QTVR ou vidéo) ;

(H2) Selon les résultats de Abd-Alhamid et al. (2019), Cauwerts (2013), Newsham et al. (2010) et Chen et al. (2019), il n'y a pas de consensus clair sur le fait que les jugements subjectifs relatifs à la « perception de l'ambiance lumineuse » soient sensibles à la qualité de reproduction physico-perceptive des environnements virtuels ;

(H3) Selon les résultats et discussions / limites exposés par Abd-Alhamid et al. (2019) et Rockcastle et al. (2021), les tâches de « performance visuelle » sont dépendantes des limites des dispositifs d'affichage (*e.g.* résolution et gamut) ;

(H4) Selon les résultats de Cauwerts (2013) et Newsham et al. (2010), il n'y a pas de consensus clair sur le fait que les jugements subjectifs relatifs à « l'inconfort dû à l'éblouissement » soient sensibles aux environnements d'évaluation. De plus, il semblerait qu'utiliser des dispositifs d'affichage avec une meilleure qualité de reproduction physico-perceptive (*i.e.* utiliser un

écran HDR à la place d'un écran LDR) soit préférable mais cela reste à être validé sur des scènes où les personnes ressentent de l'inconfort dû à l'éblouissement ;

(H5) Pour le critère relatif au « sentiment de sécurité », il y a peu de travaux qui traitent de ce critère. Cependant, puisque ce critère est lié à une multitude de facteurs (*e.g.* voir l'espace et analyser le contexte du lieu), il est possible de formuler l'hypothèse selon laquelle les jugements subjectifs portant sur le critère « sentiment de sécurité » ne sont pas sensibles aux environnements d'évaluation et cela indépendamment de la qualité de reproduction physico-perceptive des environnements virtuels ;

(H6) Les évaluations en environnement virtuel, après réglage des niveaux lumineux du dispositif d'affichage, ne sont pas sensibles aux conditions lumineuses ambiantes autour du dispositif d'affichage ;

(H7) Il est possible d'objectiver l'ajustement des niveaux lumineux du dispositif d'affichage à l'aide d'une tâche de détection des contrastes.

Ainsi, deux expériences psychovisuelles sont mises en place. Les deux expériences, ont été réalisées à la suite l'une de l'autre avec le même panel de participants. Toutefois pour faciliter la lecture, elles sont présentées séparément dans le manuscrit.

La première, décrite dans la section 5.2, a pour objectif de déterminer quelle chaîne d'acquisition / restitution utiliser pour le recueil de jugements subjectifs en fonction des critères de qualité de l'éclairage (hypothèses 1 à 5). Des comparaisons entre les évaluations sur site et en environnement virtuel sont réalisées. Pour observer si la fidélité de reproduction physico-perceptive des chaînes d'acquisition / restitution impacte le recueil de jugements subjectifs, trois chaînes d'acquisition / restitution sont étudiées : une chaîne utilisée dans la littérature qui ne prend en compte que la vision photopique et deux chaînes qui prennent en compte la vision mésopique avec une dynamique de reproduction des luminances restreintes / élargies (LDR / HDR).

La seconde expérience, décrite dans la section 5.3, s'oriente dans une démarche de facilité de déploiement des outils et méthodes du recueil de jugements subjectifs en environnement virtuel. Pour ce faire, la seconde expérience vise à déterminer s'il est possible de réaliser le recueil de jugement subjectif en environnement virtuel dans différentes conditions d'éclairage ambiant (avec l'ajustement des niveaux lumineux du dispositif d'affichage) (hypothèse 6). De plus, cette expérience vise également à déterminer s'il est possible d'objectiver l'ajustement des niveaux lumineux du dispositif d'affichage selon l'éclairage ambiant dans la pièce via une tâche de détection des contrastes (hypothèse 7).

5.2 Expérience sur l'évaluation de la qualité de l'éclairage en environnement virtuel - expérience 5.1

5.2.1 Matériels et méthodes

Puisque cette expérience vise à proposer et valider l'usage d'une chaîne d'acquisition / restitution pour le recueil de jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage, des comparaisons entre les jugements subjectifs obtenus sur site et en environnement virtuel sont réalisées. Le recueil de jugements subjectifs réalisé lors de l'expérience en environnement réel servira de « vérité terrain ». Les matériels et méthodes du recueil de jugements subjectifs sur site est explicité dans le chapitre 4 en section 4.2.

5.2.1.1 Panel

Le panel pour le recueil de jugements subjectifs en environnement virtuel est composé de 48 participants (20 hommes et 28 femmes) ayant des âges compris entre 19 et 65 ans (M = 29.7 ans, SE = 13.5 ans). Les participants étaient des membres du personnel ou des étudiants de l'ENTPE. Les participants ont tous affirmés ne pas être daltonien et 30 d'entre eux portaient des lunettes de correction. Les participants ont signé un formulaire de consentement. Parmi les 48 participants, sept d'entre eux ont participé à l'expérience en environnement réel (*i.e.* sur site).

De manière générale, les participants reportent qu'ils estiment que l'éclairage public permet de leur garantir un niveau de sécurité relativement satisfaisant (M = 62.2, SE = 25.3 - sur une échelle de [0]-Insatisfait–Satisfait-[100]). De plus, les participants reportent qu'ils se sentent plus en insécurité à Vaulx-en-Velin (*i.e.* commune d'où proviennent les scènes) de jour (resp. de nuit) que s'ils étaient autre part ailleurs de jour (resp. de nuit) (Vaulx-en-Velin : M = 31.1, SE = 19.7 ; Ailleurs : M = 13.1, SE = 10.5 - sur une échelle de [0]-Sécurité–Insécurité-[100]) (resp. Vaulx-en-Velin : M = 62.0, SE = 25.9 ; Ailleurs : M = 52.5, SE = 22.1).

5.2.1.2 Dispositif expérimental

L'expérience s'est déroulée dans une salle de l'ENTPE. Le dispositif expérimental est composé d'un projecteur LED qui éclaire, à l'aide d'un diffuseur, une boite tapissée d'un drap blanc dans laquelle est placé un ordinateur portable, MacBook Pro 14 pouces 2024, qui affichera l'ensemble des stimuli (voir Figures 5.1 et 5.2).

L'écran de l'ordinateur portable est composé d'une dalle mini-LED de 14.2 pouces (36.1 cm) de diagonale qui peut fonctionner en mode LDR (8 bits) ou HDR (10 bits). La luminosité de la dalle lumineuse peut s'ajuster via 16 niveaux qui permet d'atteindre une luminosité maximale en mode HDR de 1723 cd/m^2 (resp. 6.158 cd/m^2) lorsque la dalle lumineuse est au maximum (resp. minimum). En fonctionnement LDR, la luminosité maximale est de 661.7 cd/m^2 (resp. 1.032 cd/m^2) lorsque la dalle lumineuse est au maximum (resp. minimum). Plus de détails concernant la caractérisation de l'écran sont fournis en Annexes 7.12 et 7.13.

Les participants étaient situés à 22 cm de l'écran, l'image était agrandie de façon à avoir la même taille angulaire d'observation que sur site (taille de la feuille A4 de la tâche FER prise comme référence). Pour assurer la reproductibilité des conditions d'observations, les participants se positionnaient sur une mentonnière (voir Figure 5.2).

Le projecteur qui éclaire la boîte est le même que celui utilisé en chapitre 2 section 2.2.1.1. Le projecteur est réglé sur la source « White », et éclaire la boîte avec un niveau lumineux moyen de 0.79 cd/m^2 ce qui correspond à la moyenne des niveaux lumineux moyens qui ont été mesurés sur site dans la zone de luminance d'adaptation définie par Uchida et al. (2016) dans les trois scènes A, B et C (scène A : 0.87 cd/m^2 ; scène B : 1.2 cd/m^2 ; scène C : 0.02 cd/m^2 ; M = 0.70 cd/m^2). La Figure 5.3 fournit les cartes de luminance mesurées en utilisant une caméra LMK 6-5L à la position d'observation des participants.

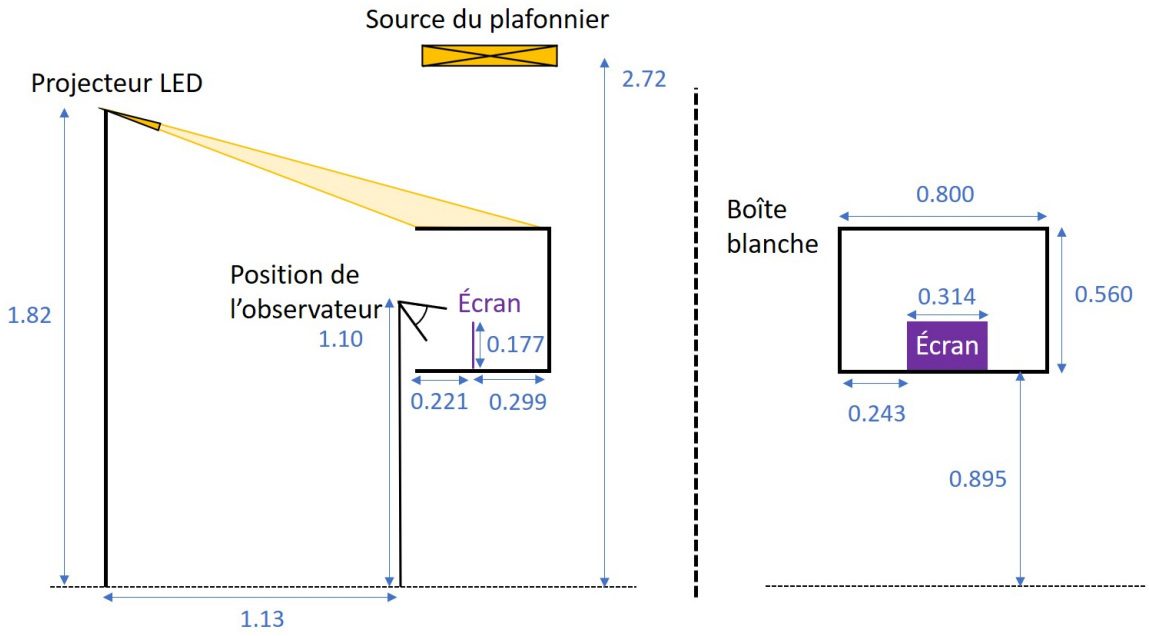
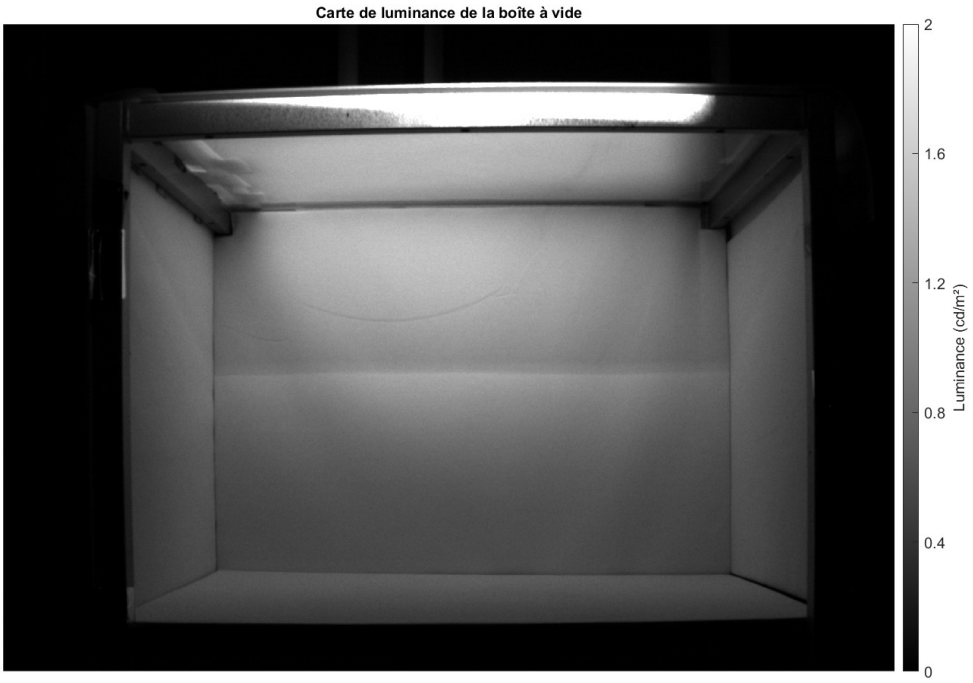


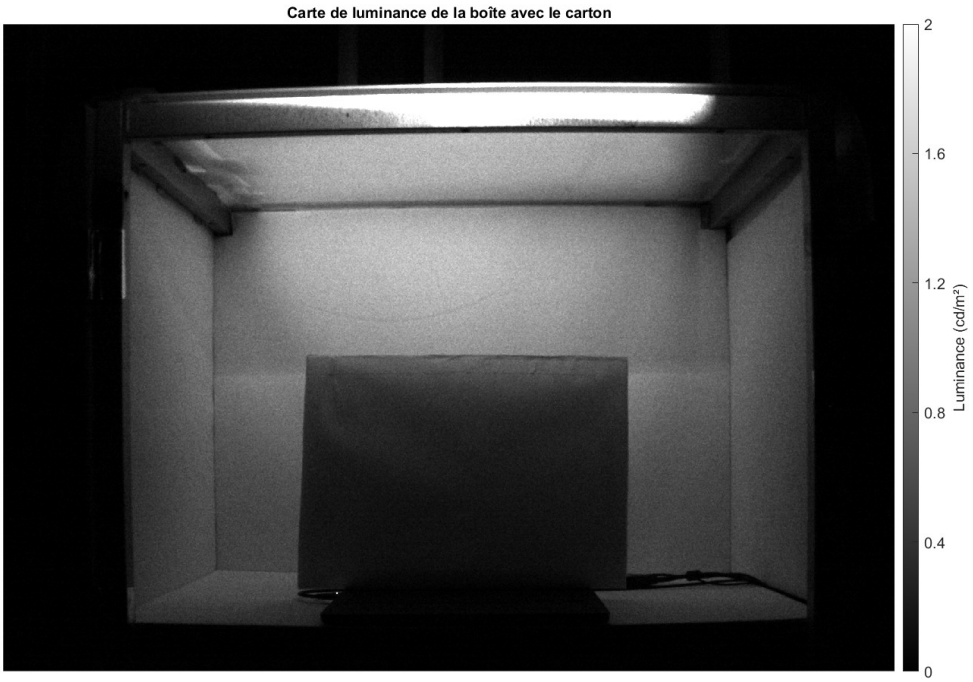
FIGURE 5.1 – Schéma à l'échelle du dispositif expérimental avec une vue de profil (à gauche) et une vue de face (à droite). La source du plafonnier (à 2.72 m du sol) est éteinte pour cette expérience. Les cotations sont exprimées en mètre



FIGURE 5.2 – Photographie du dispositif expérimental. Note : le plafonnier était éteint lors de l'expérience



(a) Carte de luminance « à vide »



(b) Carte de luminance avec le carton

FIGURE 5.3 – Cartes de luminance dans la boîte « à vide » et avec le carton devant l'écran

5.2.1.3 Stimuli

Durant l'expérience, trois chaînes d'acquisition / restitution sont étudiées (voir Figure 5.4) afin de reproduire en environnement virtuel (*i.e.* sur l'écran) les scènes évaluées en position statique (milieu du parcours) lors de l'expérience en environnement réel (voir chapitre 4 section 4.2.2). Les stimuli sont présentés à la fin de la section en Figures 5.5 et 5.6.

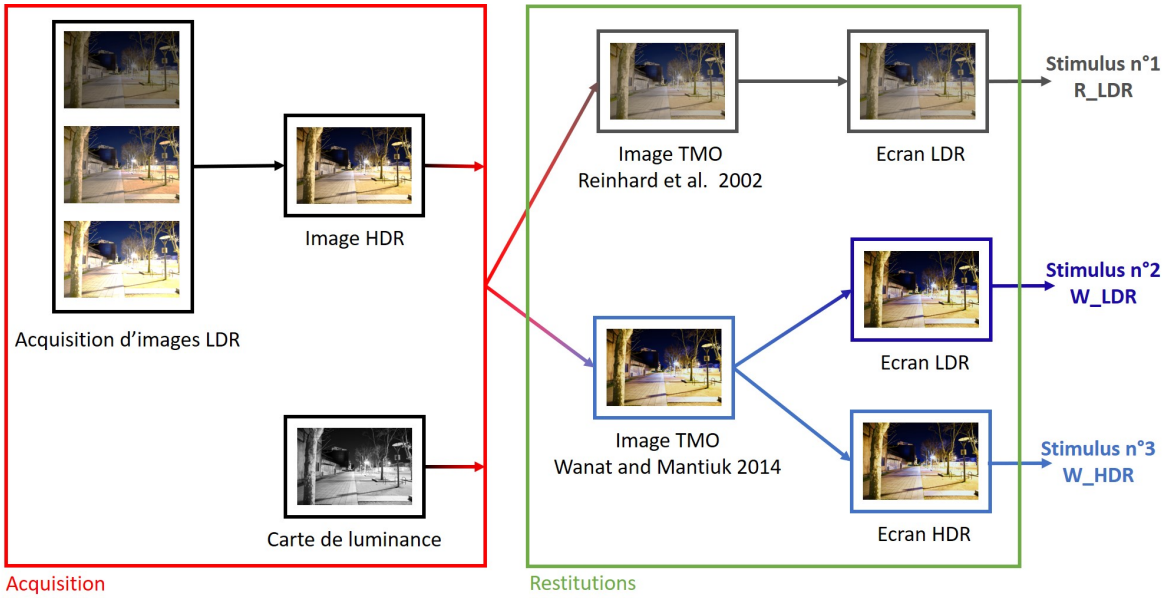


FIGURE 5.4 – Illustration des trois chaînes d'acquisition / restitution utilisées lors de l'expérience en environnement virtuel

Acquisition des scènes lumineuses

Les acquisitions des scènes lumineuses sont réalisées aux niveaux des points statiques dans les scènes réelles et en direction de l'horizon. Dans l'objectif de contrôler les outils d'acquisition tout en garantissant des méthodes facilement déployables, nous proposons, pour une scène lumineuse, de simuler plusieurs images LDR au format JPEG à partir de captures RAW. Puis de ces images JPEG avec durées d'exposition variables (et ouverture constante) sont construites des images HDR.

Une acquisition est réalisée à l'aide d'une caméra numérique Nikon D850 avec un objectif Zeiss Milvus (ouverture f/2.8 avec une distance focale de 18 mm). Chaque acquisition capture un champ visuel de 100° / 89° / 67° pour la diagonale / horizontale / verticale, répartie sur une résolution de 8256 x 5504 pixels. Pour une durée d'exposition et une ouverture constante, les acquisitions sont réalisées au format RAW encodées sur 14 bits. En tout, 24 photographies sont prises avec des durées d'exposition respectives (avec ouverture constante) : 10 s, 6 s, 4 s, 2.5 s, 1.6 s, 1 s, 0.62 s, 1/2 s, 1/4 s, 1/6 s, 1/10 s, 1/15 s, 1/25 s, 1/40 s, 1/60 s, 1/100 s, 1/160 s, 1/250 s, 1/400 s, 1/640 s, 1/1000 s, 1/1600 s, 1/2500 s et 1/4000 s. Les photographies ont été acquises en janvier 2024.

Pour obtenir une image JPEG (8 bits) à partir d'une image RAW (14 bits), le protocole suivant est utilisé :

1.1. Déterminer les balances des blancs utilisées par la caméra en fonction des températures de couleurs (cible) de la scène, *i.e.* $CCT_{camera} \mapsto M(CCT)$, où : $M(CCT)$ correspond à une matrice 3x3 qui permet de convertir un triplet RGB_{RAW} en un triplet RGB_{CCT} où la balance des blancs a été réalisée. En tout 31 matrices sont déterminées pour des températures de couleur variant de 2500 K à 10000 K ;

1.2. Déterminer les températures de couleurs cible à atteindre pour chacune des scènes lumineuses (A, B et C) CCT_{scene} ;

1.3. Pour une température de couleur cible prendre la balance des blancs associée à la température de couleur qui est la plus proche fournie par la caméra CCT_{camera} (CCT_{camera} atteint lorsque le minimum de $min\{(CCT_{scene} - CCT_{camera})^2, CCT_{camera}\}$ est atteint) ;

2.1. Convertir les pixels de l'image d'entrée (RAW 14 bits) en une image double (16 bits d'encodage) comprise entre 0 et 1 :

$$I_{double} = I_{RAW}/(2^{14} - 1) \tag{5.1}$$

2.2. Appliquer, par pixel coloré, la balance des blancs sur cette nouvelle image :

$$I_{double,WB} = I_{double} * M(CCT_{camera}) \tag{5.2}$$

2.3. Convertir l'image $I_{double,WB}$ en une image encodée sur 8 bits (*e.g.* au format entier naturel 8 bits) ;

2.4. Enregistrer l'image obtenue au format JPEG (sans compression) puis répéter les étapes 1.3. à 2.4. autant de fois qu'il y a d'images à convertir.

Finalement, ces images JPEG sont modifiées de façon à ce que les bruits (principalement numérique) soient diminués dans la prise en compte de la création de l'image HDR. Pour ce faire, un seuil est fixé à une valeur de 39 (sur 255 - 8 bits) de façon à ce qu'un pixel ayant une valeur en dessous de ce seuil soit pris égal à zéro, ce qui aura pour conséquence de ne pas prendre en compte le pixel lors de la création de l'image HDR. De plus, les images LDR qui sont acquises pour des durées d'exposition faibles ont un rapport signal/bruit trop important ainsi nous décidons de ne prendre que les images LDR ayant une durée d'exposition allant de 10 s à 1/15 s (resp. 1/6 s et 2.5 s) pour la scène A (resp. B et C), ce qui correspond à 14 (resp. 12 et 4) photographies. Il est bon de noter que toutes les images sélectionnées ont des durées d'exposition supérieures à la fréquence électrique du réseau Français (50 Hz) limitant ainsi des erreurs de mesures qui pourraient venir des variations temporelles des sources lumineuses. Ensuite, une image HDR est obtenue à partir de l'ensemble des images LDR en utilisant l'algorithme décrit en section 2.2.1.1.

Pour la création de la carte de luminance nécessaire aux algorithmes de mise en correspondance tonal les images RAW (14 bits, LDR) sont utilisées. D'après l'étude présentée en Annexe 7.14, l'étalonnage en luminance de la caméra dans des conditions de laboratoire (source lumineuse : lampe halogène) permet des estimations plus précises de cette carte de luminance (dans le cas de scènes avec de grande gamme de dynamique ayant des niveaux lumineux photopiques et mésopiques). Le protocole permettant l'estimation des cartes de luminance à partir d'images LDR peut se résumer à l'utilisation de la relation suivante :

$$I_{grey} = 0.2126 * (I_R - R_{offset}) + 0.7152 * (I_G - G_{offset}) + 0.0722 * (I_B - B_{offset}) \tag{5.3}$$

où : I_{grey} est une carte de luminance obtenue à partir d'une image LDR ; I_R (resp. I_G et I_B) correspond à la couche « rouge » (resp. « verte » et « bleue ») de l'image LDR ; R_{offset} (resp. G_{offset} et B_{offset}) correspond à une valeur déterminée en laboratoire lors de l'étalonnage.

Finalement, pour réduire le bruit présent dans les cartes de luminance, une plage de validité des mesures a été établie en laboratoire sur les niveaux de gris (I_{grey} valide si : $45 < I_{grey} < 63101$, note : pour cette étape les valeurs sont converties sur 16 bits). De plus, les cartes de luminance associées aux durées d'exposition variant de 10 s à 1/100 s (17 cartes de luminance) sont utilisées puisqu'elles semblent avoir un rapport signal/bruit acceptable. Enfin, la carte de luminance finale correspond à une moyenne pondérée des cartes de luminances précédentes en appliquant un profil triangulaire centré (pondération maximale pour la valeur V = 31527, valeur sur 16 bits). Cette procédure d'acquisition a été réalisée dans les trois scènes urbaines nocturnes lorsque les conditions lumineuses étaient proches de celles observées par les participants pendant l'expérience sur site.

Restitution des scènes lumineuses

Pour restituer les images HDR acquises sur site, puisque l'écran possède des limites techniques (*e.g.* la luminance maximale affichable), il est nécessaire d'appliquer des algorithmes de mise en correspondance tonale (TMO). Nous avons sélectionné deux algorithmes TMO, l'algorithme de Reinhard et al. (2002) (voir Annexe 7.3) et une version revisitée de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) (voir Annexe 7.15). L'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) vise à prendre en compte la vision photopique et mésopique, alors que l'algorithme de Reinhard et al. (2002) ne prend en compte que la vision photopique. Il est bon de noter que quel que soit l'algorithme utilisé des paramètres libres doivent être fixés. Pour l'algorithme de Reinhard et al. (2002), il y a la *key-value* - a, le blanc de référence - L_{white} et le paramètre d'accentuation des contrastes locaux - ϕ. Pour l'algorithme revisité de Wanat and Mantiuk (2014), il y a la plage de luminance de l'écran - $[L_{min,ecran}; L_{max,ecran}]$ et une *key-value* équivalente a'.

Pour l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014), il est nécessaire de connaître les niveaux lumineux que peut atteindre le dispositif d'affichage. Nous avons fait le choix d'utiliser l'écran en mode LDR et HDR au maximum des niveaux lumineux qu'il puisse reproduire, cela correspond à un maximum de luminosité de 661.7 / 1723 cd/m^2 pour un fonctionnement LDR / HDR. Pour l'algorithme de Reinhard et al. (2002), la valeur de ϕ est fixée égale à 8 comme préconisé par défaut dans l'article de Reinhard et al. (2002) et la valeur de L_{white} est déterminée en utilisant l'algorithme de Reinhard (2002).

Les paramètres libres de type *key-value* ont été déterminés sur site par les expérimentateurs. Pour se faire, les expérimentateurs sont allés sur site dans les mêmes conditions nocturnes que lors de l'acquisition des scènes et à la même position d'évaluation statique puis ils ont ajusté les *key-values* de façon à ce que l'image sur l'écran corresponde au mieux à la scène réelle qui était présente devant eux.

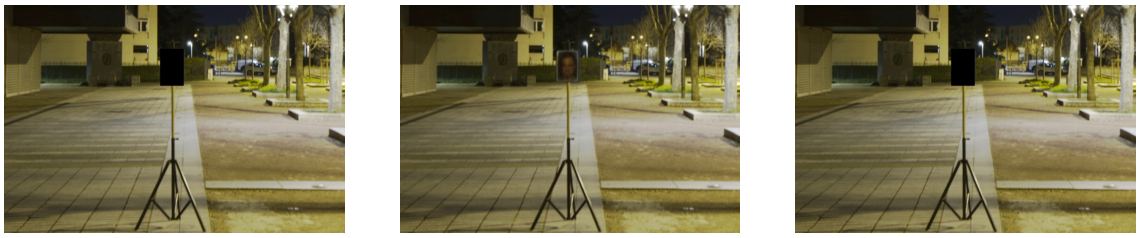
Enfin, les images sont agrandies de façon à ce que le champ visuel sur site soit reproduit dans le dispositif d'affichage. Les participants sont libres de bouger dans l'image (translation), ce qui est similaire à une méthode du type QTVR.

En récapitulatif, les paramètres suivants ont été utilisés lors de la restitution des images HDR (création des stimuli) :

Chaîne n°	Paramètre	Valeur
1	$L_{min,ecran}$	0 cd/m^2
	$L_{max,ecran}$	661.7 cd/m^2
	Algorithme TMO	Reinhard et al. (2002)
	a (A / B /C)	0.0072 / 0.0090 / 0.0004
	L_{white} (A / B / C)	29 461 158 / 45 885 892 / 8 000 000 000 cd/m^2
	ϕ	8 (pixels)
2	$L_{min,ecran}$	0 cd/m^2
	$L_{max,ecran}$	661.7 cd/m^2
	Algorithme TMO	Wanat and Mantiuk (2014) - revisité
	a' (A / B / C)	30 / 28 / 22
3	$L_{min,ecran}$	0 cd/m^2
	$L_{max,ecran}$	1723 cd/m^2
	Algorithme TMO	Wanat and Mantiuk (2014) - revisité
	a' (A / B / C)	59 / 61 / 41

TABLE 5.1 – Table de synthèse des paramètres des chaînes d'acquisition / restitution

Pour la tâche de performance visuelle (tâche FER), dans les scènes réelles (sur site) un trépied avec les images des modèles mimant une émotion sur site (voir Figure 5.5) a été positionné à la même place que l'expérimentateur lors de la réalisation de la tâche FER en environnement réel. Puis les chaînes d'acquisition / restitution sont utilisées pour créer les stimuli. Il est bon de noter que, pour les stimuli FER, aucune image de synthèse est ajoutée en post-production, ce qui permet d'avoir un stimuli similaire à celui présenté sur site (même distribution des luminances / éclairements dans le plan de la feuille et même distribution spectrale de la source lumineuse).



(a) (b) (c)

FIGURE 5.5 – Illustration d'un stimulus pour la tâche FER



(a) A - R_LDR (b) A - W_LDR (c) A - W_HDR

(d) B - R_LDR (e) B - W_LDR (f) B - W_HDR

(g) C - R_LDR (h) C - W_LDR (i) C - W_HDR

FIGURE 5.6 – Stimuli obtenus. Note : Les consignes RVB des images ont été multipliées par 5 pour l'impression du manuscrit

5.2.1.4 Protocole expérimental

Une session expérimentale en environnement virtuel est conçue pour faire passer un participant à la fois. Le même questionnaire que celui utilisé lors de la passation en environnement réel est utilisé (voir Annexe 7.9). Cependant, à ce questionnaire est ajouté une section relative à la qualité de reproduction de l'environnement virtuel. Les items de cette section servent de contrôle, c'est-à-dire qu'ils permettent de déterminer si les participants se sont suffisamment sentis en immersion dans l'environnement virtuel. Les items proviennent tous du questionnaire « *igroup presence questionnaire* - IPQ » (Schubert, 2025) dont le terme « environnement virtuel » a été choisi à la place des termes « le monde généré par l'ordinateur », « espace virtuel » et « monde virtuel ». Les questions sur le sentiment de présence sont les suivantes : « Dans l'environnement virtuel, j'ai eu le sentiment "d'y être" : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord », « Je me suis senti présent(e) dans l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord », « J'étais complètement captivé(e) par l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » et « Comment l'environnement virtuel vous a-t-il semblé ? Complètement réel–Pas du tout réel ». L'échelle de réponse est continue de 0 à 100.

De plus, dans le « questionnaire final », des items portant sur les souvenirs qu'ont les participants des scènes réelles sont posés : « Avez-vous participé à l'expérience en réel : Oui - Non » ; « Si non, est-ce que vous êtes déjà allé(e) dans les scènes quand il fait nuit : La scène le long des terrains de tennis : Oui - Non ; La scène sur la place de la mairie : Oui - Non ; La scène le long du planétarium : Oui - Non » ; « Si vous y êtes déjà allé(e) quand il fait nuit : Je me souviens parfaitement de la scène le long des terrains de tennis : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord ; Je me souviens parfaitement de la scène sur la place de la mairie : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord ; Je me souviens parfaitement de la scène le long du planétarium : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord ». De même les échelles de réponses sont continues de 0 à 100.

Une scène est évaluée dans l'environnement virtuel via trois chaînes d'acquisition / restitution. La première utilise l'algorithme de Reinhard et al. (2002) avec un niveau lumineux maximal de 661.7 cd/m^2 (écran LDR), nommée R_LDR. Les deuxième et troisième chaînes d'acquisition / restitution utilisent l'algorithme revisité de Wanat and Mantiuk (2014) (voir Annexe 7.15) avec des niveaux lumineux maximaux de 661.7 cd/m^2 (écran LDR) et 1723 cd/m^2 (écran HDR), nommées W_LDR et W_HDR. Pour ce faire, chaque participant se voit attribuer aléatoirement un ordre de passage des algorithmes (*e.g.* W_LDR puis R_LDR et enfin W_LDR) par scène ainsi qu'un ordre de passage des scènes A, B ou C aléatoire contrebalancé. Ainsi, par exemple, un participant évalue trois fois la scène A puis trois fois la scène C et enfin la scène B. Les participants regardaient un stimulus affiché en se positionnant sur une mentonnière et ils pouvaient observer la scène autant de fois qu'ils le souhaitaient et sans limite de temps à l'exception de devoir observer la scène pendant au moins 10 secondes avant de commencer à répondre au questionnaire. Une fois l'évaluation d'un stimulus fini les participants devaient placer une pancarte opaque devant l'écran, permettant ainsi à l'expérimentateur de charger le stimulus suivant sans pour autant changer le niveau d'adaptation des yeux des participants.

Pour les tâches de perceptions colorées, les participants avaient l'obligation de mettre le questionnaire dans la boîte à gauche de l'ordinateur de façon à conserver entre les participants des conditions lumineuses similaires. Pour répondre aux autres questions, les participants étaient libres de déplacer le questionnaire à leur guise.

La tâche de performance visuelle FER est réalisée à la fin des évaluations des scènes. Un stimulus FER se présente comme suit (voir Figure 5.5) :

1. Affichage de la scène contenant l'image FER avec un carré noir au niveau de l'émotion mimée ;
2. Le carré noir est enlevé durant 500 ms (contrôlé par un logiciel) pour présenter l'émotion ;
3. Affichage de la première image avec le carré noir.

Chaque participant se voit attribuer des stimuli FER aléatoirement pour les trois scènes et les trois chaînes d'acquisition / restitution (neuf stimuli). Les stimuli FER sont présentés au participant en respectant le même ordre d'apparition des scènes déterminé lors de la première partie de l'expérience sauf que l'ordre des chaînes d'acquisition / restitution est déterminé aléatoirement. Ainsi, par exemple, un participant aura les trois stimuli FER de la scène A, puis les trois de la scène C et enfin ceux de la scène B.

Ce protocole a été validé par le comité d'éthique de l'Université Gustave Eiffel.

5.2.1.5 Procédure

Une séance dure approximativement 45 minutes. Les participants sont accueillis par l'expérimentateur tout au long de la journée (entre 9h et 17h). Dans la salle de l'expérience, l'objectif de l'expérience est rappelé aux participants. Ensuite les participants sont immergés dans la condition lumineuse de l'expérience (voir Figure 5.3b) pendant cinq minutes permettant aux yeux des participants de s'adapter aux niveaux lumineux de l'expérience, durant ce même laps de temps les participants peuvent se familiariser avec les items du questionnaire. Finalement, puisque les participants de l'expérience en environnement réel ont reporté qu'ils se sentent plus en insécurité à Vaulx-en-Velin qu'autre part ailleurs (voir section 4.2.1), nous avons pris le choix de fournir des éléments de contexte aux participants de l'expérience en environnement virtuel. Ainsi, un rappel du lieu où les scènes ont été acquises est fait via la phrase suivante « Vous êtes à Vaulx-en-Velin et vous marchez seul(e) » et via un plan du campus indiquant les scènes. De plus, entre chaque changement de scène un rappel du lieu est réalisé (*e.g.* « Vous êtes désormais en train de marcher le long de la place de l'hôtel de ville. »).

Une fois le premier stimulus affiché, les participants se familiarisent avec le dispositif permettant le déplacement (translations) au sein des scènes puis ils remplissent le questionnaire associé à ce stimulus. Une fois que les participants ont fini d'évaluer le premier stimulus, l'expérimentateur leur indique de mettre le cache devant l'écran de l'ordinateur le temps que l'expérimentateur charge le stimulus suivant, puis les participants enlèvent le cache, observent le stimulus suivant pendant au moins 10 secondes et l'évalue via leur questionnaire. Cette dernière étape est répétée autant de fois que nécessaire pour évaluer l'ensemble des stimuli restants. Une fois que les scènes ont fini d'être évaluées via le questionnaire de qualité de l'éclairage, les participants sont invités à réaliser la tâche de performance visuelle FER. Entre chaque stimulus FER, les participants mettent le cache permettant à l'expérimentateur de charger le prochain stimulus FER.

Une fois l'ensemble des stimuli évalués, après une pause, les participants sont invités à réaliser la seconde expérience (voir section 5.3), puis à la fin des deux expériences, les participants remplissent le questionnaire « final », signent le formulaire de consentement et sont gratifiés pour leur participation (10 € en chèque cadeau valable un an).

5.2.1.6 Plan expérimental

Le plan expérimental est composé de trois scènes (modalités : A, B ou C), deux positions d'évaluations en environnement réel (modalités : statique ou dynamique) et trois chaînes d'acquisition / restitution (modalités : R_LDR, W_LDR ou W_HDR). Il s'agit d'un plan à deux facteurs intra-sujets en environnement virtuel (scène et chaîne) et un facteur inter-sujets sur l'environnement d'évaluation (modalités : REEL ou VIRTUEL) :

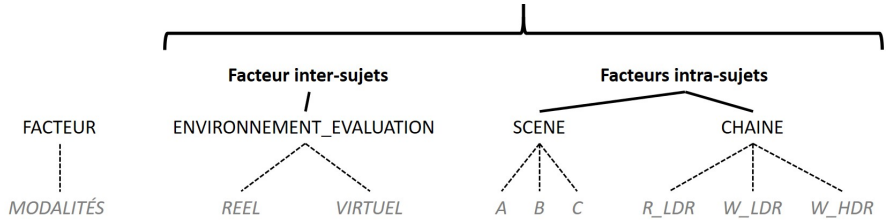


FIGURE 5.7 – Illustration du plan expérimental

5.2.1.7 Analyses statistiques

Pour effectuer les comparaisons entre les ressentis subjectifs obtenus en environnement virtuel, puisque les participants ont vu l'ensemble des stimuli, les variables en jeu sont de type intra-sujets. Ainsi, lorsque les hypothèses sont validées (distribution normale et sphéricité) il est possible d'utiliser une ANOVA à mesures répétées avec deux facteurs intra-sujets : a. SCENE (trois modalités : A, B ou C) ; b. CHAINE (trois modalités : R_LDR, W_LDR ou W_HDR). Lorsque la sphéricité n'est pas valide (test de Mauchly) la correction de Greenhouse-Geisser est appliquée. Finalement, lorsque la condition de normalité n'est pas valide (test de Kolmogorov-Smirnov), il n'est plus possible d'utiliser le test paramétrique de l'ANOVA à mesures répétées et des tests de Friedman pour échantillons appariés sont alors réalisés. Les hypothèses nulles sont :

$(\tilde{H0})_1$: « Pour un item donné, les évaluations subjectives réalisées sur le site A, B ou C sont similaires »

$(\tilde{H0})_2$: « Pour un item donné, les évaluations subjectives réalisées en utilisant les chaînes d'acquisition / restitution R_LDR, W_LDR ou W_HDR sont similaires »

$(\tilde{H0})_3$: « Pour un item donné, il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs SCENE et CHAINE »

Pour effectuer les comparaisons entre les ressentis subjectifs obtenus dans les environnements réel et virtuel, les analyses sont réalisées en comparant un mode d'évaluation en environnement réel (statique ou dynamique) et virtuel (R_LDR, W_LDR ou W_HDR). Ainsi, lorsque les hypothèses sont validées (distribution normale et sphéricité) il est possible d'utiliser une ANOVA à mesures répétées avec un facteur intra-sujets SCENE (trois modalités : A, B ou C) et un facteur inter-sujets ENVIRONNEMENT_EVALUATION (deux modalités : REEL ou VIRTUEL). Lorsque la sphéricité n'est pas valide (test de Mauchly) la correction de Greenhouse-Geisser est appliquée. Finalement, lorsque la condition de normalité n'est pas valide (test de Kolmogorov-Smirnov), il n'est plus possible d'utiliser le test paramétrique de l'ANOVA à mesures répétées et des tests de Mann-Whitney pour échantillons indépendants sont alors réalisés pour chaque scène. Les hypothèses nulles sont :

$(\tilde{H0})_4$: « Pour un item et binôme de comparaison réel//virtuel donné, les évaluations subjectives réalisées sur le site A, B ou C sont similaires »

$(\tilde{H0})_5$: « Pour un item et binôme de comparaison réel//virtuel donné, les évaluations subjectives réalisées sur le site A, B ou C sont similaires indépendamment du mode d'évaluation REEL ou VIRTUEL »

$(\tilde{H0})_6$: « Pour un item et binôme de comparaison réel//virtuel donné, il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs SCENE et ENVIRONNEMENT_EVALUATION »

Pour comparer les résultats issus de la tâche de performance FER sur site et en environnement virtuel, puisque les deux panels de participants (expérience sur site et en environnement virtuel) sont différents, nous devons appliquer un test de χ^2 pour échantillons indépendants. Comme pour l'expérience en environnement réel nous proposons de séparer les réponses en trois classes : a. les bonnes réponses (G) ; b. les mauvaises réponses (W) ; c. les réponses « Je ne sais pas ».

Les hypothèses nulles sont :

$(\tilde{H0})_7$: « Pour la scène A, les proportions des classes issues de la tâche FER sont identiques entre les modes d'évaluations (sur site ou en environnement virtuel) » ;

$(\tilde{H0})_8$: « Pour la scène B, les proportions des classes issues de la tâche FER sont identiques entre les modes d'évaluations (sur site ou en environnement virtuel) » ;

$(\tilde{H0})_9$: « Pour la scène C, les proportions des classes issues de la tâche FER sont identiques entre les modes d'évaluations (sur site ou en environnement virtuel) » ;

$(\tilde{H0})_{10}$: « Indépendamment des scènes, les proportions des classes issues de la tâche FER sont identiques entre les modes d'évaluations (sur site ou en environnement virtuel) » ;

Pour comparer les résultats issues de la tâche de perception colorée du sol et de l'herbe entre les différents environnements virtuels (R_LDR, W_LDR et W_HDR), puisque les coordonnées trichromatiques (x,y) sont dépendantes, une MANOVA à mesures répétées est appliquée avec comme variables dépendantes les coordonnées (x,y) et comme variable indépendante la chaîne d'acquisition / restitution (même si les hypothèses permettant l'usage d'une MANOVA à mesures répétées sont violées (distributions normales multivariées et homogénéité des matrices de covariance)).

Les hypothèses nulles sont :

$(\tilde{H0})_{11}$: « Pour la scène A, les couleurs du sol / de l'herbe sont identiques entre les environnements virtuels (R_LDR, W_LDR et W_HDR) » ;

$(\tilde{H0})_{12}$: « Pour la scène B, les couleurs du sol / de l'herbe sont identiques entre les environnements virtuels (R_LDR, W_LDR et W_HDR) » ;

$(\tilde{H0})_{13}$: « Pour la scène C, les couleurs du sol / de l'herbe sont identiques entre les environnements virtuels (R_LDR, W_LDR et W_HDR) ».

Finalement, pour comparer les résultats issus de la tâche de perception colorée du sol et de l'herbe entre les différents environnements d'évaluation (sur site ou en environnement virtuel), puisque les coordonnées trichromatiques (x,y) sont dépendantes, une MANOVA à mesures répétées est appliquée avec comme variables dépendantes les coordonnées (x,y) et comme variable indépendante l'environnement d'évaluation (même si les hypothèses permettant l'usage d'une MANOVA à mesures répétées sont violées (distributions normales multivariées et homogénéité des matrices de covariance)).

Les hypothèses nulles sont :

$(\tilde{H0})_{14}$: « Pour la scène A, les couleurs du sol / de l'herbe sont identiques entre les modes d'évaluations (sur site ou en environnement virtuel) » ;

$(\tilde{H0})_{15}$: « Pour la scène B, les couleurs du sol / de l'herbe sont identiques entre les modes d'évaluations (sur site ou en environnement virtuel) » ;

$(\tilde{H0})_{16}$: « Pour la scène C, les couleurs du sol / de l'herbe sont identiques entre les modes d'évaluations (sur site ou en environnement virtuel) ».

5.2.2 Résultats

5.2.2.1 Statistiques descriptives et analyse préliminaire

Les valeurs moyennes ainsi que les écarts-types obtenus selon chaque item pour chaque scène et chaque chaîne d'acquisition / restitution sont fournis dans les trois dernières colonnes des Tables 5.7 et 5.8. De plus, des graphiques représentant les valeurs moyennes et les intervalles de confiance à 95 % sont également fournis en Annexe 7.16. Visuellement on remarque que la qualité de l'éclairage dans la scène C est jugée moins bonne que dans les autres scènes. De plus, visuellement le sentiment de présence dans l'environnement virtuel ne semble pas être dépendant des scènes et des chaînes d'acquisition / restitution.

Les Tables 5.2 à 5.4 présentent les résultats de la tâche FER par chaîne d'acquisition / restitution (R_LDR, W_LDR ou W_HDR) avec le taux de participants ayant choisis l'émotion réellement présentée (proportion de bonnes réponses), s'étant trompé (proportion de mauvaises réponses) ou ayant coché « Je ne sais pas » (proportion de « Je ne sais pas »).

	Bonne réponse (G)	Mauvaise réponse (W)	« Je ne sais pas » (IDK)
Scène A	31.3 %	58.3 %	10.4 %
Scène B	50.0 %	35.4 %	14.6 %
Scène C	12.5 %	18.8 %	68.8 %

Table 5.2 – Résultats de la tâche FER pour l'expérience en environnement virtuel - R_LDR

	Bonne réponse (G)	Mauvaise réponse (W)	« Je ne sais pas » (IDK)
Scène A	29.2 %	50.0 %	20.8 %
Scène B	50.0 %	41.7 %	8.33 %
Scène C	0 %	12.5 %	87.5 %

Table 5.3 – Résultats de la tâche FER pour l'expérience en environnement virtuel - W_LDR

	Bonne réponse (G)	Mauvaise réponse (W)	« Je ne sais pas » (IDK)
Scène A	35.4 %	56.3 %	8.34 %
Scène B	58.3 %	33.3 %	8.34 %
Scène C	2.08 %	4.17 %	93.8 %

Table 5.4 – Résultats de la tâche FER pour l'expérience en environnement virtuel - W_HDR

Comme pour l'expérience sur site, les quatre items relatifs au sentiment de sécurité peuvent se regrouper en un item fusionné. Les mêmes analyses que celles présentées en section 4.3 sont réalisées par chaîne d'acquisition / restitution.

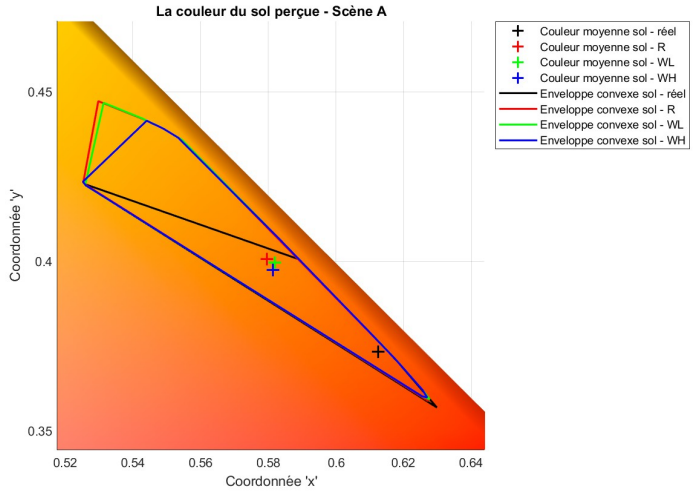
Les quatre items relatifs au sentiment de sécurité sont toujours compris dans un vecteur directeur (métrique utilisée pour les ACPs : Varimax) avec un taux d'appartenance supérieur à 64 % par item, à l'exception de l'ACP sur la scène C avec la chaîne W_HDR où l'item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité » n'a un taux d'appartenance que de 33.6 %. De plus, les coefficients α de

Cronbach (voir Table 5.5) sont tous supérieurs à 0.7 (Kline, 1999), que ce soit sur les données scène par scène ou les données générales. Ainsi, il est possible de fusionner l'ensemble des items en un nouvel item qui est défini comme la moyenne des quatre items.

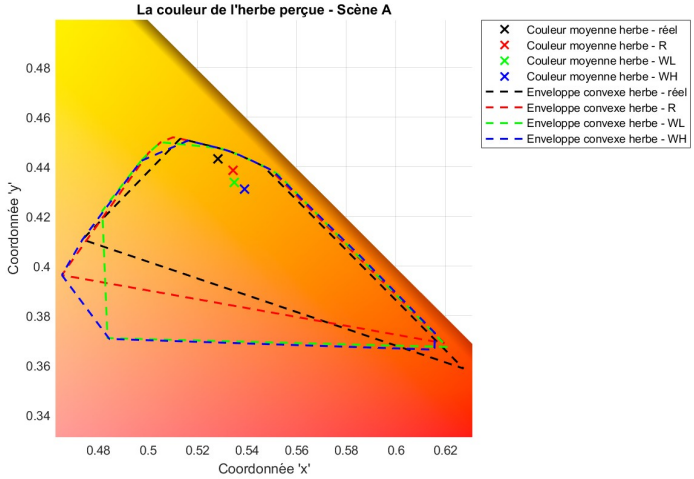
α de Cronbach		ABC_all	ABC	A	B	C
Avec les quatre items	R_LDR	0.929	0.932	0.887	0.857	0.914
	W_LDR		0.932	0.856	0.893	0.906
	W_HDR		0.924	0.869	0.862	0.873
Sans l'item 7)	R_LDR	0.912	0.910	0.851	0.800	0.898
	W_LDR		0.909	0.792	0.853	0.900
	W_HDR		0.916	0.843	0.829	0.905
Sans l'item 8)	R_LDR	0.890	0.895	0.831	0.770	0.860
	W_LDR		0.894	0.773	0.842	0.851
	W_HDR		0.882	0.794	0.808	0.778
Sans l'item 9)	R_LDR	0.913	0.921	0.858	0.861	0.899
	W_LDR		0.919	0.827	0.860	0.891
	W_HDR		0.900	0.832	0.813	0.833
Sans l'item 10)	R_LDR	0.916	0.920	0.876	0.837	0.896
	W_LDR		0.923	0.868	0.892	0.872
	W_HDR		0.905	0.857	0.842	0.822

TABLE 5.5 – α de Cronbach pour l'item fusionné « SENTIMENT_SECURITE_FUSION ». « ABC_all » signifie que l'ensemble des stimuli (toutes scènes confondues et chaînes confondues) a été pris pour le calcul de α. « ABC » signifie que l'ensemble des stimuli par chaine (toutes les évaluations R_LDR ou W_LDR ou W_HDR) et scènes a été pris pour le calcul de α. « A » ou « B » ou « C » signifie que seulement les données de la scène « A » ou « B » ou « C » ont été prises pour le calcul de α

Pour la tâche de perception des couleurs, les moyennes et enveloppes convexes par matériau sont tracées dans les Figures 5.8 à 5.10. Visuellement, pour l'ensemble des scènes, les couleurs du sol et de l'herbe semblent avoir été perçues similairement entre les trois chaînes d'acquisition / restitution (environnement virtuel). De plus, à l'exception de la scène A, les couleurs du sol et de l'herbe semblent avoir été perçues différemment entre l'expérience sur site et celle en environnement virtuel.

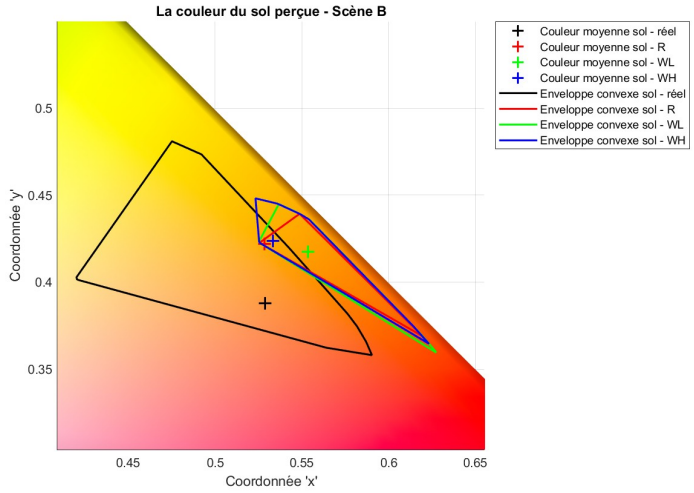


(a) Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol - scène A

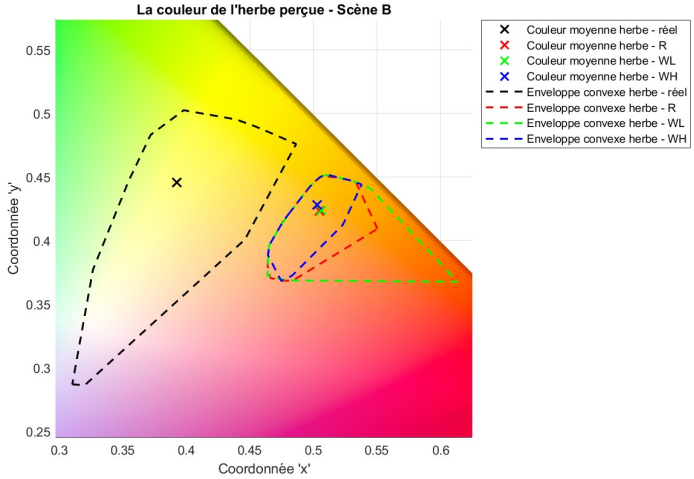


(b) Tâche de performance visuelle portant sur la couleur de l'herbe - scène A

FIGURE 5.8 – Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol et de l'herbe - scène A

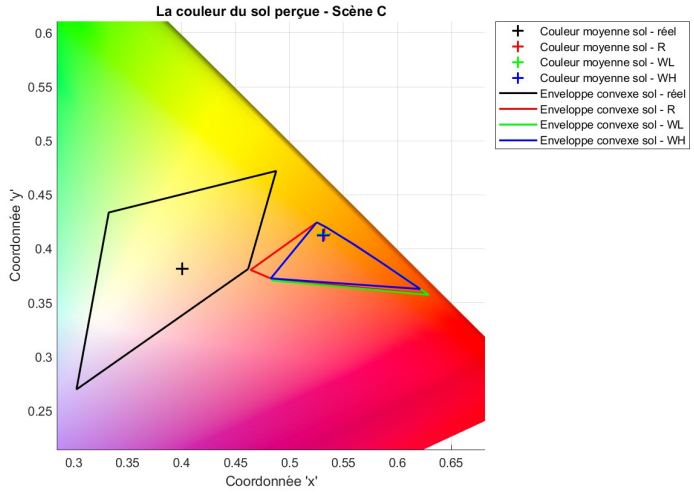


(a) Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol - scène B

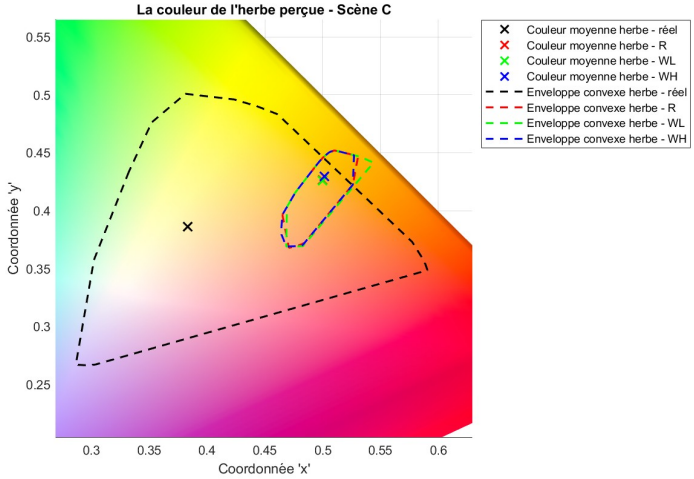


(b) Tâche de performance visuelle portant sur la couleur de l'herbe - scène B

FIGURE 5.9 – Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol et de l'herbe - scène B



(a) Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol - scène C



(b) Tâche de performance visuelle portant sur la couleur de l'herbe - scène C

FIGURE 5.10 – Tâche de perception colorée portant sur la couleur du sol et de l'herbe - scène C

5.2.2.2 Comparaisons des évaluations entre les chaînes d'acquisition / restitution en environnement virtuel

Premièrement, les résultats des analyses portant sur les items du questionnaire IQP sont présentés dans la Table 5.6. Pour l'ensemble des items du questionnaire IQP, aucun effet significatif n'est observé sur le facteur CHAINE ($p > 0.05$). De plus, à l'exception de la question « J'étais complètement captivé(e) par l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord », aucun effet significatif du facteur SCENE n'est observé. En effet, d'après un test post-hoc de Tukey, la scène C a été significativement moins captivante que la scène B ($t(46) = 2.55$, $p_{tukey} = 0.037$), alors que les scènes A et B ou A et C ne sont pas significativement différentes. Finalement, pour l'ensemble des items, aucune interaction entre les facteurs SCENE et CHAINE n'a été observée.

Les résultats des analyses portant sur les items de qualité de l'éclairage sont présentés dans les Tables 5.7 et 5.8. Pour l'ensemble des items, un effet significatif est observé pour le facteur SCENE. Les Tables 5.9 et 5.10 présentent les résultats des tests post-hoc de Tukey. Nous remarquons que la qualité de l'éclairage est significativement moins bonne pour la scène C que les scènes A et B, excepté pour l'item « Chaud–Froid » pour lequel aucune différence significative entre les scènes C et B est observé ($t(47) = -0.476$, $p = 0.883$). De plus, des différences significatives sur les notations moyennes dans les scènes A et B sont observées pour l'ensemble des items, sauf pour les items « Sombre–Lumineux » ($t(47) = -1.55$, $p = 0.278$), « Agréable–Désagréable » ($t(47) = 2.26$, $p = 0.071$), « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant » ($t(47) = 0.399$, $p = 0.916$) et « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » ($t(47) = 1.72$, $p = 0.210$). Il est bon de noter que pour le facteur SCENE les résultats de l'expérience en environnement réel (sur site) sont majoritairement retrouvés dans l'expérience en environnement virtuel.

Pour les items « Chaud–Froid », « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » et « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant » un effet significatif du facteur CHAINE est observé. La Table 5.11 présente les résultats des tests post-hoc de Tukey. Les tests post-hoc mettent en avant qu'il y a des différences significatives entre les évaluations du critère « Chaud–Froid » entre les chaînes d'acquisition / restitution W_HDR et W_LDR. En effet, la scène reproduite avec la chaîne W_LDR est jugée plus chaude que celle reproduite via la chaîne W_HDR (W_LDR : M_A = 46.0 ; M_B = 45.2 ; M_C = 61.6 // W_HDR : M_A = 56.0 ; M_B = 62.3 ; M_C = 66.5 - $t(47) = 6.62$, $p_{tukey} < 0.001$). Pour le critère « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant » l'éclairage dans les scènes reproduites avec la chaine R_LDR (M_A = 74.9 ; M_B = 64.5 ; M_C = 20.4) est jugé significativement plus insatisfaisant que celles issue de la chaîne W_LDR (M_A = 62.1 ; M_B = 69.1 ; M_C = 16.9 - $t(46) = 2.84$, $p_{tukey} = 0.018$) ou de la chaîne W_HDR (M_A = 60.6 ; M_B = 64.3 ; M_C = 14.4 - $t(46) = 3.24$, $p_{tukey} = 0.006$). Pour l'item « Agréable–Désagréable » un effet significatif du facteur CHAINE est observé mais n'est pas confirmé par le test post-hoc de Tukey.

De plus, une interaction entre les facteurs SCENE et CHAINE est observée pour l'ensemble des items analysés avec une ANOVA à mesures répétées, à l'exception de l'item « J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord ». Pour l'item « Sombre–Lumineux », l'effet d'interaction est lié à la scène A pour laquelle la chaîne R_LDR produit une image jugée plus lumineuse qu'avec W_LDR ($t(47) = 3.852$, $p_{tukey} = 0.010$) tandis qu'il n'y a pas de différence significative pour les deux autres scènes (voir Figure 7.40). Pour l'item « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Totalement satisfaisant », l'effet d'interaction est lié à la scène A pour laquelle la chaîne R_LDR produit une image jugée plus satisfaisante qu'avec W_LDR et

W_HDR (W_LDR : t(46) = 5.130, $p_{tukey} < 0.001$; W_HDR : t(46) = 4.363, $p_{tukey} = 0.002$) tandis qu'il n'y a pas de différence significative pour les deux autres scènes. (voir Figure 7.45) Pour l'item « Chaud–Froid », l'effet d'interaction est lié à la scène C pour laquelle la chaîne W_HDR produit une image jugée identique à celle obtenue avec W_LDR (t(47) = 2.017, $p_{tukey} = 0.540$) mais plus chaude que celle obtenue avec R_LDR (t(47) = -2.915, $p_{tukey} = 0.013$) ce qui est le contraire avec les autres scènes. De plus, pour l'item « Chaud–Froid » l'interaction est aussi lié à la scène B pour laquelle la chaîne R_LDR produit une image plus froide que W_LDR (t(47) = 7.250, $p_{tukey} < 0.001$) ce qui n'est pas le cas dans les autres scènes (voir Figure 7.42). Pour l'item « Agréable–Désagréable », l'effet d'interaction s'explique par le fait qu'il n'y a aucune conclusion claire qui se dégage lors des comparaisons entre la chaîne R_LDR et les autres. En effet, des différences significatives sont observées entre les chaînes R_LDR et W_LDR pour les scènes B et C (B : t(47) = 3.671, p_{tukey} = 0.016 ; C : t(47) = -3.533, $p_{tukey} = 0.024$) alors qu'aucune différence n'est observée pour la scène A. De plus, une différence significative est observée entre les chaînes R_LDR et W_HDR pour la scène C (B : t(47) = -5.178, $p_{tukey} < 0.001$) alors qu'aucune différence n'est observée pour les scènes A et B (voir Figure 7.41). Pour les items « Je me sens en : Sécurité–Insécurité », « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Totalement d'accord » et « j'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Totalement d'accord », l'interaction ne provient pas d'une scène ou d'un algorithme en particulier. En effet, aucune différence significative n'est observée entre les scènes (A, B ou C) ou les chaînes d'acquisition / restitution ($p_{tukey} > 0.05$). Pour l'item fusionné relatif au sentiment de sécurité, l'interaction peut s'expliquer en partie par le fait qu'une différence significative n'est observée que pour la scène A entre les chaînes R_LDR et W_HDR (t(47) = -3.699, $p_{tukey} = 0.015$) et nulle part ailleurs.

Finalement, concernant la tâche de perception colorée du sol ou de l'herbe, d'après les MANOVAs à mesures répétées aucun effet de la chaîne d'acquisition / restitution n'est observé ($p > 0.05$), à l'exception de la perception de la couleur du sol dans la scène B ($F(4,282) = 10.325$, $p < 0.001$) ou des différences significatives sont observées pour l'ensemble des tests post-hoc (MANOVA à mesures répétées avec un seuil de première espèce corrigé par la méthode de Bonferroni, soit $\alpha = 0.017$) : R_LDR vs W_LDR - $F(2,93) = 23.713$, $p < 0.001$; R_LDR vs W_HDR - $F(2,93) = 3.8936$, $p = 0.02377$; W_LDR vs W_HDR - $F(2,93) = 7.735$, $p < 0.001$.

Item (0-100)	Facteur SCENE (A / B / C)	Facteur CHAINE (R_LDR / W_LDR / W_HDR)	Interaction SCENE x CHAINE	Moyenne (écart-type) des évaluations R_LDR	Moyenne (écart-type) des évaluations W_LDR	Moyenne (écart-type) des évaluations W_HDR
11) Dans l'environnement virtuel, j'ai eu le sentiment « d'y être » : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	F(2, 92) = 1.64 ; p = 0.200 ; $\eta_p^2 = 0.034$	F(1.6, 74) = 1.22 ; $p_g = 0.294^*$; $\eta_p^2 = 0.026$	F(4,184) = 1.03 p = 0.393 ; $\eta_p^2 = 0.022$	A = 68.5 (22.5) B = 65.8 (24.1) C = 65.9 (19.6)	A = 65.6 (20.7) B = 66.4 (21.6) C = 60.7 (23.7)	A = 66.2 (24.0) B = 65.6 (22.9) C = 60.6 (23.6)
12) Je me suis senti présent(e) dans l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	F(2, 94) = 1.004 ; p = 0.370 ; $\eta_p^2 = 0.021$	F(1.6, 77) = 0.408 ; $p_g = 0.626^*$; $\eta_p^2 = 0.009$	F(3.1, 147) = 2.0 $p_g = 0.122^*$; $\eta_p^2 = 0.040$	A = 66.8 (23.6) B = 62.1 (23.7) C = 63.8 (18.8)	A = 63.4 (21.5) B = 65.2 (21.6) C = 59.8 (22.8)	A = 62.8 (23.0) B = 65.5 (21.9) C = 60.6 (23.1)
13) J'étais complètement captivé(e) par l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**F(1.8, 81) = 3.9 ; p_g = 0.029* ; η_p^2 = 0.078**	F(1.7, 79) = 1.4 ; $p_g = 0.245^*$; $\eta_p^2 = 0.030$	F(4, 184) = 0.971 p = 0.425 ; $\eta_p^2 = 0.021$	A = 56.2 (24.7) B = 55.5 (26.7) C = 52.3 (25.0)	A = 52.5 (25.9) B = 55.9 (27.3) C = 50.3 (28.4)	A = 51.8 (27.6) B = 56.9 (27.6) C = 46.8 (27.4)
14) Comment l'environnement virtuel vous a-t-il semblé ? Complètement réel–Pas du tout réel	F(2, 94) = 1.373 ; p = 0.258 ; $\eta_p^2 = 0.028$	F(1.8, 83) = 0.5 ; $p_g = 0.570^*$; $\eta_p^2 = 0.011$	F(4, 188) = 0.79 p = 0.532 ; $\eta_p^2 = 0.017$	A = 30.9 (24.0) B = 33.2 (26.7) C = 35.7 (21.7)	A = 30.9 (22.4) B = 28.1 (24.1) C = 35.0 (21.3)	A = 34.8 (26.3) B = 30.5 (23.6) C = 34.2 (21.9)

TABLE 5.6 – Statistiques descriptives et résultats des ANOVAs à mesures répétées des données de l'expérience en environnement virtuel pour les items relatifs au questionnaire IPQ. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$)

Item (0-100)	Facteur SCENE (A / B / C)	Facteur CHAINE (R_LDR / W_LDR / W_HDR)	Interaction SCENE x CHAINE	Moyenne (écart-type) des évaluations R_LDR	Moyenne (écart-type) des évaluations W_LDR	Moyenne (écart-type) des évaluations W_HDR
1) Sombre–Lumineux	**$F(2, 94) = 218$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.823$**	$F(2,94) = 0.935$; $p = 0.396$; $\eta_p^2 = 0.020$	**$F(4,188) = 4.55$; $p = 0.002$; $\eta_p^2 = 0.009$**	A = 71.7 (18.2) B = 58.4 (20.8) C = 16.4 (14.6)	A = 62.3 (23.1) B = 64.3 (17.5) C = 14.9 (14.5)	A = 63.4 (21.9) B = 61.5 (20.1) C = 15.7 (14.8)
2) Agréable–Désagréable	**$F(1.4, 67) = 49$; $p_g < 0.001^*$; $\eta_p^2 = 0.512$**	**$F(2,94) = 3.17$; $p = 0.046$; $\eta_p^2 = 0.063$**	**$F(4, 188) = 9.35$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.166$**	A = 38.3 (20.7) B = 53.6 (18.7) C = 65.3 (25.6)	A = 44.2 (21.7) B = 42.3 (19.8) C = 75.4 (21.3)	A = 45.0 (25.0) B = 45.7 (20.3) C = 79.0 (19.7)
3) Chaud–Froid	**$F(2, 94) = 7.51$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.138$**	**$F(2,94) = 21.01$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.309$**	**$F(4,188) = 15.38$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.247$**	A = 49.6 (16.8) B = 72.1 (19.2) C = 56.5 (22.1)	A = 46.0 (20.4) B = 45.2 (21.3) C = 61.6 (21.4)	A = 56.0 (19.5) B = 62.3 (18.6) C = 66.5 (20.1)
4) Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord		A : p = 0.117 B : p = 0.338 C : p = 0.444		A = 89.7 (19.3) B = 89.2 (12.9) C = 34.5 (29.3)	A = 85.3 (21.0) B = 88.4 (14.8) C = 31.2 (30.0)	A = 83.1 (23.5) B = 88.8 (17.5) C = 33.4 (28.3)
5) Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord		**A : p < 0.001** **B : p = 0.047** **C : p < 0.001**		A = 33.3 (28.4) B = 32.9 (24.5) C = 29.7 (27.6)	A = 49.7 (27.6) B = 36.2 (27.6) C = 62.5 (27.2)	A = 56.2 (31.3) B = 46.7 (29.2) C = 67.6 (30.1)
6) Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant	**$F(2, 92) = 161.36$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.778$**	**$F(2,92) = 7.06$; $p_g = 0.002^*$; $\eta_p^2 = 0.133$**	**$F(4,184) = 4.70$; $p = 0.001$; $\eta_p^2 = 0.093$**	A = 74.9 (18.9) B = 64.5 (23.0) C = 20.4 (19.1)	A = 62.1 (22.9) B = 69.1 (21.3) C = 16.9 (20.3)	A = 60.6 (25.6) B = 64.3 (25.1) C = 14.4 (13.8)

TABLE 5.7 – Statistiques descriptives et résultats des ANOVAs à mesures répétées des données de l'expérience en environnement virtuel hors item relatif au sentiment de sécurité et IPQ. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$). Pour les items 4) et 5) un test non-paramétrique de Friedman a été réalisé pour chaque scène

Item (0-100)	Facteur SCENE (A / B / C)	Facteur CHAINE (R_LDR / W_LDR / W_HDR)	Interaction SCENE x CHAINE	Moyenne (écart-type) des évaluations R_LDR	Moyenne (écart-type) des évaluations W_LDR	Moyenne (écart-type) des évaluations W_HDR
7) Je me sens en : Sécurité–Insécurité	**$F(1.6, 76) = 68$; $p_g < 0.001^*$; $\eta_p^2 = 0.590$**	$F(2, 94) = 1.27$; $p = 0.283$; $\eta_p^2 = 0.027$	**$F(3.5,163) = 4.08$; $p_g = 0.005^*$; $\eta_p^2 = 0.080$**	A = 33.1 (19.6) B = 48.8 (23.0) C = 70.8 (22.7)	A = 38.6 (21.4) B = 39.2 (19.2) C = 73.5 (23.7)	A = 38.2 (22.5) B = 45.0 (21.0) C = 75.9 (23.0)
8) Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(1.7, 77) = 59$; $p_g < 0.001^*$; $\eta_p^2 = 0.557$**	$F(2,94) = 0.919$; $p = 0.403$; $\eta_p^2 = 0.019$	**$F(4,188) = 4.139$; $p = 0.003$; $\eta_p^2 = 0.081$**	A = 31.3 (22.0) B = 44.3 (24.7) C = 69.2 (24.7)	A = 35.2 (24.0) B = 37.6 (22.5) C = 72.5 (23.0)	A = 38.9 (24.7) B = 37.5 (22.8) C = 74.7 (21.5)
9) J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(1.7, 80) = 60$; $p_g < 0.001^*$; $\eta_p^2 = 0.560$**	$F(2,94) = 0.483$; $p = 0.483$; $\eta_p^2 = 0.015$	**$F(3.2,152) = 4.50$; $p_g = 0.004^*$; $\eta_p^2 = 0.087$**	A = 33.2 (23.4) B = 49.4 (23.6) C = 72.5 (22.5)	A = 38.7 (24.5) B = 42.3 (23.4) C = 72.3 (26.0)	A = 39.8 (25.7) B = 43.7 (24.0) C = 75.4 (21.7)
10) J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(1.4, 66) = 70$; $p_g < 0.001^*$; $\eta_p^2 = 0.602$**	$F(2,92) = 0.739$; $p = 0.480$; $\eta_p^2 = 0.016$	$F(4,188) = 2.344$; $p = 0.056$; $\eta_p^2 = 0.048$	A = 21.3 (22.4) B = 34.7 (25.4) C = 66.2 (29.6)	A = 27.8 (24.1) B = 31.4 (22.2) C = 66.9 (30.0)	A = 25.4 (24.8) B = 31.0 (20.1) C = 69.2 (28.3)
Item fusionné « SENTIMENT _SECURITE »	**$F(1.6, 73) = 76$; $p_g < 0.001^*$; $\eta_p^2 = 0.619$**	$F(2, 94) = 1.22$; $p = 0.299$; $\eta_p^2 = 0.025$	**$F(3.1, 146) = 5.8$; $p_g < 0.001^*$; $\eta_p^2 = 0.110$**	A = 29.7 (18.3) B = 44.3 (20.9) C = 69.7 (22.3)	A = 35.1 (20.5) B = 37.6 (18.3) C = 71.3 (22.8)	A = 35.6 (20.6) B = 39.5 (18.9) C = 73.8 (20.2)

TABLE 5.8 – Statistiques descriptives et résultats des ANOVAs à mesures répétées des données de l'expérience en environnement virtuel pour les items relatifs au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$)

Item (0-100)	Scène A - Scène B	Scène A - Scène C	Scène B - Scène C	Interprétation visuelle
1) Sombre–Lumineux	t(47) = -1.55 p_{tukey} = 0.278	**t(47) = 17.35** p_{tukey} **< 0.001**	**t(47) = 20.81** p_{tukey} **< 0.001**	A=B > C
2) Agréable–Désagréable	t(47) = 2.26 p_{tukey} = 0.071	**t(47) = -7.60** p_{tukey} **< 0.001**	**t(47) = -7.32** p_{tukey} **< 0.001**	A = B > C
3) Chaud–Froid	**t(47) = 3.988** p_{tukey} **< 0.001**	**t(47) = -3.327** p_{tukey} **= 0.005**	t(47) = -0.476 p_{tukey} = 0.883	A < B = C
4) Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord				
5) Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord				
6) Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant	t(46) = 0.399 p_{tukey} = 0.916	**t(46) = 14.481** p_{tukey} **< 0.001**	**t(46) = 14.692** p_{tukey} **< 0.001**	A = B > C

TABLE 5.9 – Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur SCENE) hors item relatif au sentiment de sécurité

Item (0-100)	Scène A - Scène B	Scène A - Scène C	Scène B - Scène C	Interprétation visuelle
7) Je me sens en : Sécurité–Insécurité	**t(47) = 3.20** p_{tukey} **= 0.007**	**t(47) = -8.05** p_{tukey} **< 0.001**	**t(47) = -9.63** p_{tukey} **< 0.001**	A < B < C
8) Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	t(47) = 1.72 p_{tukey} = 0.210	**t(47) = -8.89** p_{tukey} **< 0.001**	**t(47) = -7.95** p_{tukey} **< 0.001**	A = B < C
9) J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**t(47) = 2.98** p_{tukey} **= 0.012**	**t(47) = -9.28** p_{tukey} **< 0.001**	**t(47) = -7.53** p_{tukey} **< 0.001**	A < B < C
10) J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**t(46) = 3.42** p_{tukey} **= 0.004**	**t(46) = -9.45** p_{tukey} **< 0.001**	**t(46) = -8.06** p_{tukey} **< 0.001**	A < B < C
Item fusionné « SENTIMENT _SECURITE »	**t(47) = 3.13** p_{tukey} **= 0.008**	**t(47) = -10.11** p_{tukey} **< 0.001**	**t(46) = -8.61** p_{tukey} **< 0.001**	A < B < C

TABLE 5.10 – Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur SCENE) pour les items relatifs au sentiment de sécurité

Item (0-100)	Chaine R_LDR - Chaine W_HDR	Chaine R_LDR - Chaine W_LDR	Chaine W_HDR - Chaine W_LDR	Interprétation visuelle
2) Agréable–Désagréable	t(47) = -2.2223 p_{tukey} = 0.078	t(47) = -0.986 p_{tukey} = 0.589	t(47) = 1.687 p_{tukey} = 0.221	R_LDR = W_LDR = W_HDR
3) Chaud–Froid	t(47) = -1.25 p_{tukey} = 0.430	**t(47) = 4.63** **p_{tukey} < 0.001**	**t(47) = 6.62** **p_{tukey} < 0.001**	R_LDR = W_HDR > W_LDR
6) Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant	**t(46) = 3.24** **p_{tukey} = 0.006**	**t(46) = 2.84** **p_{tukey} = 0.018**	t(46) = -1.44 p_{tukey} = 0.329	W_HDR = W_LDR < R_LDR

TABLE 5.11 – Résultats des tests post-hoc de Tukey (facteur CHAINE) hors item relatif au sentiment de sécurité

5.2.2.3 Comparaisons des évaluations en environnements réel et virtuel

Pour réaliser la comparaison entre les données collectées en réel et en virtuel, nous avons utilisé dans cette section les évaluations en position statique, similaire aux prises de vues. La comparaison avec les données en dynamique (après avoir marché sur site) est quand même réalisée en Annexe 7.17.

Les résultats des analyses portant sur les comparaisons entre les évaluations en environnement réel (sur site) et en environnement virtuel sont fournis dans les Tables 5.12 et 5.13. Les interactions n'ont été étudiées que pour les items où des ANOVAs pouvaient être réalisées.

Pour l'item « Sombre–Lumineux », un effet significatif du facteur ENVIRONNEMENT_EVALUATION est observé quelle que soit la chaîne d'acquisition / restitution : R_LDR ($F(1,89) = 10.9$, $p = 0.001$, $\eta_p^2 = 0.109$), W_LDR ($F(1,89) = 6.55$, $p = 0.012$, $\eta_p^2 = 0.069$) et W_HDR ($F(1,89) = 6.40$, $p = 0.013$, $\eta_p^2 = 0.067$). Une interaction entre les facteurs SCENE et ENVIRONNEMENT_EVALUATION est observée quelle que soit la chaîne d'acquisition / restitution (R_LDR : $F(2,178) = 6.10$, $p = 0.003$; W_LDR : $F(2,178) = 13.2$, $p < 0.001$; W_HDR : $F(2,178) = 8.26$, $p < 0.001$), cela est lié au fait que la scène B est jugée plus sombre sur site qu'en environnement virtuel (R_LDR : $t(89) = -3.749$, $p_{tukey} = 0.004$; W_LDR : $t(89) = -5.644$, $p_{tukey} < 0.001$; W_HDR : $t(89) = -4.571$, $p_{tukey} < 0.001$) alors qu'aucune différence n'est observée pour les scènes A et C.

Pour l'item « Agréable–Désagréable », aucun effet significatif est observé entre les évaluations sur site et en environnement virtuel ($p > 0.05$).

Pour l'item « Chaud–Froid », un effet significatif est observé entre les évaluations sur site et en environnement virtuel pour R_LDR (S : $F(1,89) = 9.70$, $p = 0.002$, $\eta_p^2 = 0.098$; D : $F(1,89) = 8.89$, $p = 0.004$, $\eta_p^2 = 0.091$) ou W_HDR (S : $F(1,89) = 11.9$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.118$; D : $F(1,89) = 11.1$, $p = 0.001$, $\eta_p^2 = 0.111$). Des interactions entre les facteurs SCENE et ENVIRONNEMENT_EVALUATION sont observées pour les chaînes R_LDR et W_LDR (R_LDR : $F(2,178) = 6.07$, $p = 0.003$; W_LDR : $F(2,178) = 4.24$, $p = 0.016$). Pour la chaîne R_LDR l'interaction s'explique par le fait que l'ambiance lumineuse de la scène C est jugée plus chaude que la scène B en environnement virtuel ($t(89) = 3.673$, $p_{tukey} = 0.005$) mais il n'y a pas de différence entre les

scènes C et A alors que le contraire est observé pour les évaluations réalisées sur site. Pour la chaîne W_LDR l'interaction s'explique par le fait que l'ambiance lumineuse de la scène B est jugée plus chaude que la scène C en environnement virtuel (t(89) = -3.836, $p_{tukey} = 0.003$) mais il n'y a pas de différence entre les scènes B et A, alors que le contraire est observé pour les évaluations réalisées sur site.

Pour l'item « Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord », d'après les tests de Mann-Whitney, une différence significative est observée entre les évaluations en environnement réel et virtuel (R_LDR, W_LDR ou W_HDR) pour la scène B ($p < 0.004$) et pour la scène A lorsqu'elle est reproduite avec la chaîne R_LDR ($p = 0.027$).

Concernant l'inconfort dû à l'éblouissement, les tests de Mann-Whitney révèlent qu'il y a, pour l'ensemble des scènes (A, B ou C), des différences significatives entre les évaluations sur site et en environnement virtuel (R_LDR, W_LDR ou W_HDR).

Concernant la satisfaction, un effet du facteur ENVIRONNEMENT_EVALUATION est observé entre les évaluations sur site et en environnement virtuel R_LDR avec une *p-value* proche du seuil de significativé et pour une taille d'effet faible ($F(1,89) = 4.20$, $p = 0.043$, $\eta_p^2 = 0.045$). Des interactions entre les facteurs SCENE et ENVIRONNEMENT_EVALUATION sont observées avec les chaînes W_LDR et W_HDR (W_LDR : $F(2,178) = 4.65$, $p = 0.011$; W_HDR : $F(2,176) = 3.26$, $p = 0.041$). Les interactions peuvent s'expliquer par le fait que la scène B est jugée plus satisfaisante que la scène A en environnement virtuel (W_LDR : M_A = 62.1, M_B = 69.1 ; W_HDR : M_A = 60.6, M_B = 64.3) alors que le contraire est observé pour les évaluations réalisées sur site (M_A = 67.3, M_B = 57.3).

Concernant les items relatifs au sentiment de sécurité, des effets significatifs entre les évaluations sur site et en environnement virtuel en utilisant la chaîne d'acquisition / restitution W_HDR sont observés pour les items relatifs à la gêne ($F(1,89) = 7.03$, $p = 0.010$, $\eta_p^2 = 0.073$), la cadence de marche ($F(1,89) = 5.09$, $p = 0.026$, $\eta_p^2 = 0.054$) et l'item fusionné SENTIMENT_SECURITE ($F(1,89) = 3.99$, $p = 0.026$, $\eta_p^2 = 0.054$). Enfin, une interaction entre les facteurs SCENE et ENVIRONNEMENT_EVALUATION est observée avec W_HDR ($F(1,89) = 4.32$, $p = 0.040$, $\eta_p^2 = 0.046$) pour l'item relatif à la gêne. Cette interaction s'explique par le fait que la scène B est jugée plus gênante que la scène A lors des évaluations sur site (t(89) = 3.810, $p_{tukey} = 0.003$) mais pas dans l'environnement virtuel W_HDR.

Concernant la tâche de performance visuelle FER, un test de χ^2 a été réalisé en confondant l'ensemble des scènes. Des différences significatives sont observées entre les résultats de la tâche FER sur site et en environnement virtuel quelle que soit la chaîne considérée (R_LDR : $\chi^2(2) = 6.88$, $p = 0.032$; W_LDR : $\chi^2(2) = 8.37$, $p = 0.015$; W_HDR : $\chi^2(2) = 13.8$, $p < 0.001$). De plus , des tests de χ^2 également réalisés pour chaque scène A, B ou C, mettent en avant que les résultats à la tâche obtenus en utilisant les chaînes d'acquisition / restitution R_LDR, W_LDR ou W_HDR sont différents des résultats obtenus sur site pour la scène C (R_LDR : $\chi^2(2) = 8.71$, $p = 0.013$; W_LDR : $\chi^2(2) = 29.1$, $p < 0.001$; W_HDR : $\chi^2(2) = 26.0$, $p < 0.001$).

Finalement, pour les tâches de perception des couleurs, l'hypothèse de normalité multivariée n'est pas validée, cependant, d'après la MANOVA effectuée, un effet du facteur ENVIRONNEMENT_EVALUATION est observé pour l'ensemble des scènes (A, B ou C), des chaînes (R_LDR, W_LDR et W_HDR) pour la couleur du sol et de l'herbe, à l'exception de la couleur de l'herbe de la scène A avec la chaîne R_LDR ($F(2,88) = 1.1984$, $p = 0.3065$).

Item (0-100)	Statique - R_LDR	Statique - W_LDR	Statique - W_HDR
1) Sombre–Lumineux	**$F(1,89) = 10.9$; $p = 0.001$; $\eta_p^2 = 0.109$**	**$F(1,89) = 6.55$; $p = 0.012$; $\eta_p^2 = 0.069$**	**$F(1,89) = 6.40$; $p = 0.013$; $\eta_p^2 = 0.067$**
2) Agréable–Désagréable	$F(1,89) = 0.149$; $p = 0.701$; $\eta_p^2 = 0.002$	$F(1,89) = 0.0213$; $p = 0.884$; $\eta_p^2 = 0.000$	$F(1,89) = 1.04$; $p = 0.311$; $\eta_p^2 = 0.012$
3) Chaud–Froid	**$F(1,89) = 9.70$; $p = 0.002$; $\eta_p^2 = 0.098$**	$F(1,89) = 0.0959$; $p = 0.758$; $\eta_p^2 = 0.001$	**$F(1,89) = 11.9$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.118$**
4) Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord*	**A : $p = 0.027$** **B : $p = 0.003$** C : $p = 0.457$	A : $p = 0.397$ **B : $p = 0.004$** C : $p = 0.128$	A : $p = 0.688$ **B : $p = 0.002$** C : $p = 0.307$
5) Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord*	**A : $p = 0.002$** **B : $p = 0.008$** **C : $p = 0.010$**	**A : $p < 0.001$** **B : $p = 0.002$** **C : $p < 0.001$**	**A : $p < 0.001$** **B : $p < 0.001$** **C : $p < 0.001$**
6) Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant	**$F(1,89) = 4.20$; $p = 0.043$; $\eta_p^2 = 0.045$**	$F(1,89) = 0.490$; $p = 0.486$; $\eta_p^2 = 0.005$	$F(1,89) = 1.73$; $p = 0.192$; $\eta_p^2 = 0.019$

TABLE 5.12 – Résultats des analyses (ANOVAs à mesures répétées ou test de Mann-Whitney par scène*) des données collectées en environnement réel et virtuel (facteur inter-sujets : ENVIRONNEMENT_EVALUATION) hors item relatif au sentiment de sécurité. Les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$)

Item (0-100)	Statique - R_LDR	Statique - W_LDR	Statique - W_HDR
7) Je me sens en : Sécurité–Insécurité	$F(1,89) = 0.215$; $p = 0.644$; $\eta_p^2 = 0.002$	$F(1,89) = 0.123$; $p = 0.726$; $\eta_p^2 = 0.001$	$F(1,89) = 1.22$; $p = 0.273$; $\eta_p^2 = 0.013$
8) Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	$F(1,89) = 3.88$; $p = 0.052$; $\eta_p^2 = 0.042$	**$F(1,89) = 4.32$; $p = 0.040$; $\eta_p^2 = 0.046$**	**$F(1,89) = 7.03$; $p = 0.010$; $\eta_p^2 = 0.073$**
9) J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	$F(1,89) = 3.87$; $p = 0.052$; $\eta_p^2 = 0.042$	$F(1,89) = 3.27$; $p = 0.074$; $\eta_p^2 = 0.035$	**$F(1,89) = 5.09$; $p = 0.026$; $\eta_p^2 = 0.054$**
10) J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	$F(1,89) = 0.383$; $p = 0.538$; $\eta_p^2 = 0.004$	$F(1,89) = 0.929$; $p = 0.338$; $\eta_p^2 = 0.010$	$F(1,88) = 0.636$; $p = 0.427$; $\eta_p^2 = 0.007$
Item fusionné « SENTIMENT _SECURITE »	$F(1,89) = 2.04$; $p = 0.157$; $\eta_p^2 = 0.022$	$F(1,89) = 2.23$; $p = 0.139$; $\eta_p^2 = 0.024$	**$F(1,89) = 3.99$; $p = 0.049$; $\eta_p^2 = 0.043$**

TABLE 5.13 – Résultats des analyses (ANOVAs à mesures répétées) des données collectées en environnement réel et virtuel (facteur inter-sujets : ENVIRONNEMENT_EVALUATION) pour les items relatifs au sentiment de sécurité. Les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$)

5.3 Expérience sur les conditions lumineuses ambiantes - expérience 5.2

5.3.1 Rappel des objectifs

Les objectifs relatifs à l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes sont :

1. étudier la possibilité d'ajuster les niveaux lumineux du dispositif d'affichage de façon à ce que les ressentis subjectifs de la qualité de l'éclairage ne soient pas différents d'une condition lumineuse ambiante à une autre ;
2. étudier la possibilité d'objectiver, via une tâche de détection des contrastes, l'ajustement des niveaux lumineux du dispositif d'affichage en fonction de l'éclairage ambiant pour garantir des ressentis subjectifs identiques d'une condition lumineuse ambiante à une autre.

5.3.2 Matériels et méthodes

5.3.2.1 Panel et dispositif expérimental

Le panel qui a passé l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes est le même que celui qui a passé l'expérience sur l'évaluation de la qualité de l'éclairage en environnement virtuel (voir section 5.2).

Le même dispositif expérimental que celui de l'expérience présentée en section 5.2 est utilisé(voir Figures 5.1 et 5.2). La condition lumineuse ambiante basse correspond à la même ambiance que dans l'expérience précédente (voir section 5.2), soit une luminance de fond moyenne de 0.79 cd/m^2. La condition lumineuse ambiante haute est obtenue en réglant le projecteur LED derrière le participant à 100 % et en allumant la source du plafond (voir Figure 5.11) de façon à avoir une luminance de fond moyenne de 50 cd/m^2 dans la boîte expérimentale. La Figure 7.55 montre les cartes de luminance obtenues dans le dispositif expérimental pour les conditions lumineuses ambiantes haute et basse.

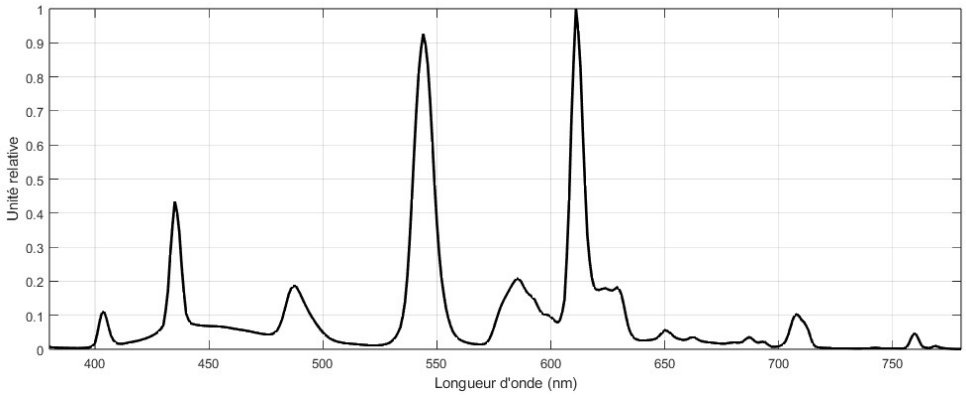


FIGURE 5.11 – Densité spectrale de la source du plafonnier. Mesure obtenue par réflexion sur un matériau type spectralon

5.3.2.2 Stimuli

Les images utilisées pour cette expérience sont celles issues de la chaîne d'acquisition R_LDR qui présentent l'intérêt de ne pas être dépendantes du réglage des niveaux lumineux de l'écran lors de leur création. En effet, l'algorithme de Reinhard et al. (2002), contrairement à l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014), ne prend pas en paramètre les niveaux lumineux maximal et minimal de l'écran, ce qui permet de modifier à la volée les niveaux lumineux de l'écran. Chaque scène se voit attribuer deux stimuli, respectivement associé à la condition lumineuse ambiante basse et ambiante haute. Ce qui est modifié par rapport à la chaîne d'acquisition / restitution R_LDR de l'expérience précédente (voir Table 5.1) est la consigne des niveaux lumineux de l'écran en fonction de la condition lumineuse ambiante (basse ou haute). Durant cette expérience, seules les scènes B et C sont utilisées, ce qui permet de faire en sorte que la passation des expériences (celle-ci et celle présentée en section 5.2) dure approximativement une heure. Les scènes B et C ont été sélectionnées car elles présentent des caractéristiques techniques propres aux scènes urbaines nocturnes (B : grande gamme de dynamique de luminance ; C : des niveaux lumineux mésopiques).

De plus, à titre exploratoire, une tâche de détection des contrastes est mise en place afin de déterminer s'il est possible, via cette tâche, d'objectiver le réglage de l'écran entre les conditions lumineuses ambiante haute et ambiante basse (voir Figure 5.12). Au centre de l'image (resp. aux bordures), une barre du nuancier correspond, dans nos conditions expérimentales, à une taille apparente de 3.6° (resp. 3.1°). Des cartes de luminances du nuancier de gris ont été réalisées à l'aide d'une caméra LMK 6-5L pour les différents réglages de l'écran et pour les conditions lumineuses basse et haute (voir Annexe 7.18).

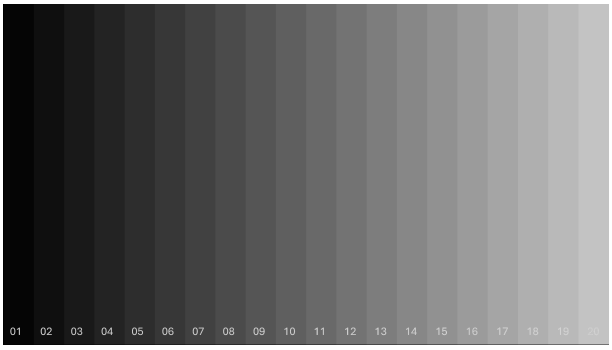


FIGURE 5.12 – Nuancier de gris utilisé pour la tâche de détection des contrastes. Note : les consignes RVB ont été multipliées par 5 pour l'impression du manuscrit

5.3.2.3 Protocole expérimental

Une session expérimentale est conçue pour faire passer un participant à la fois. Le recueil des évaluations est fait via un questionnaire papier (voir Annexe 7.19). Le questionnaire se compose de deux blocs. Au sein d'un bloc les participants doivent évaluer la scène B ou C (ordre des scènes contrebalancé entre les participants) dans deux conditions lumineuses ambiantes (haute et basse) via les items de qualité de l'éclairage : « Comment décrivez-vous l'ambiance lumineuse qui est devant vous ? Sombre–Lumineuse » et « En me projetant dans la scène, sans être accompagné(e), je me sens en : Sécurité–Insécurité ». L'ordre d'évaluation des conditions lumineuses est soit haute puis basse pour la scène n°1 et inversement pour la scène n°2 ou le contraire, l'ordre étant contrebalancé entre les participants.

Pour la condition lumineuse ambiante basse, les participants observent le stimulus B ou C issu de la chaîne d'acquisition / restitution R_LDR affiché avec un niveau lumineux maximal de l'écran fixé à 18 cd/m^2. Pour la condition lumineuse ambiante haute, les participants doivent d'abord ajuster le niveau lumineux de l'écran de façon à ce qu'ils perçoivent la même scène que celle observée en condition lumineuse ambiante basse (prise comme référence). Pour ce faire, une durée de mémorisation (durée libre) de la scène de référence est donnée aux participants puis dès qu'ils pensent avoir suffisamment l'image en mémoire ils le signalent à l'expérimentateur qui modifie l'éclairage ambiant pour atteindre la condition lumineuse ambiante haute et l'ajustement du niveau lumineux de l'écran commence. L'ajustement est réalisé d'une part, à partir du réglage minimum de l'écran en augmentant la consigne ou à partir du réglage maximum de l'écran en diminuant la consigne. L'ordre est défini en amont et contrebalancé entre tous les participants. Le protocole d'ajustement est le suivant :

1. L'expérimentateur augmente (ou diminue) les niveaux lumineux de l'écran puis lorsque les participants trouvent que l'image affichée correspond parfaitement à celle qu'ils ont en mémoire ils le signalent et l'expérimentateur note le niveau de consigne de l'écran correspondant ;
2. L'expérimentateur diminue (ou augmente) les niveaux lumineux de l'écran puis lorsque les participants trouvent que l'image affichée correspond parfaitement à celle qu'ils ont en mémoire ils le signalent et l'expérimentateur note le niveau de consigne de l'écran ;
3. Si les participants ont donné deux consignes identiques, l'ajustement est terminé et la consigne commune est prise lors de l'évaluation du stimulus en condition lumineuse ambiante haute, sinon les participants peuvent naviguer entre les deux consignes afin de déterminer celle qui correspond le mieux à l'image qu'ils ont en mémoire puis ce réglage est pris pour évaluer le stimulus en condition lumineuse ambiante haute.

Finalement, les participants ont réalisé une tâche de détection des contrastes en utilisant un nuancier de gris (voir Figure 5.12) détaillée en section 5.3.2.4.

5.3.2.4 Focus sur la tâche du nuancier

L'idée de la tâche de détection des contrastes avec le nuancier de gris est d'explorer si le réglage de luminosité de l'écran que les participants font pour retrouver en condition lumineuse ambiante haute la même scène qu'ils ont perçue en condition lumineuse ambiante basse s'appuie principalement sur la perception des contrastes. Si le contraste perçu sur le nuancier dans la condition { réglage écran bas $\oplus$ condition lumineuse ambiante basse } est la même que dans la condition { réglage écran haut $\oplus$ condition lumineuse ambiante haute} alors cette hypothèse est validée. Cela permettrait de faire ajuster un écran aux conditions lumineuses ambiantes avant l'évaluation de la qualité de l'éclairage de n'importe quelle scène grâce à la tâche de détection de contraste avec le nuancier.

Les participants devaient observer le nuancier de gris dans le sens de lecture (des barres sombres vers les barres claires), puis ils devaient renseigner le numéro de la première barre à partir de laquelle ils arrivaient à discerner parfaitement les autres barres. Par exemple, si un participant renseigne le numéro « 10 » cela signifie que le participant arrive à discerner la séparation entre les barres « 10 » et « 11 » mais pas entre « 10 » et « 9 » ni avant. L'extraction des grandeurs photométriques (luminances et contrastes physiques) à partir des résultats des participants est décrit dans l'Annexe 7.20.

Pour tester notre hypothèse, les résultats des participants nécessitent d'être convertis en différence de contraste perçu entre les conditions lumineuses ambiantes hautes ($C_{p,n}(B)$ / $C_{p,n}(C)$) et basses ($C_{p,n'}(B)$ / $C_{p,n'}(C)$ respectivement pour la scène B et C). Notre hypothèse s'exprime alors de la façon suivante :

$$\begin{cases} \Delta C_p(B) = C_{p,n}(B) - C_{p,n'}(B) = 0 & \text{(scène B)} \\ \Delta C_p(C) = C_{p,n}(C) - C_{p,n'}(C) = 0 & \text{(scène C)} \end{cases} \tag{5.4}$$

Ces différences de contrastes perçus sont obtenus grâce à des mesures de luminance réalisées à l'aide d'une caméra LMK 6-5L et des estimations de luminance de voile. Le protocole d'obtention de la différence de contraste perçu par participant est fourni en Annexe 7.20.

5.3.2.5 Procédure

La procédure de passation est décrite en Figure 5.13 (resp. Figure 5.14) lorsque l'ordre d'évaluation des conditions lumineuses ambiantes est haute puis basse (resp. basse puis haute). Un ordre d'évaluation est fourni par participant pour l'ensemble de l'expérience (deux scènes). Il est bon de noter que les participants qui commencent par l'évaluation dans la condition lumineuse ambiante basse n'ont pas besoin d'une durée d'adaptation pour le premier stimulus puisque leurs yeux étaient déjà adaptés grâce à la première expérience (décrite en section 5.2). Nous avons choisi un temps d'adaptation de 5 min pour le passage de la condition lumineuse ambiante haute vers celle basse car cela correspond au plateau d'adaptation qui dure approximativement cinq minutes ce qui laisse le temps aux participants de réaliser l'ensemble des tâches relatives à un stimulus (Alexander, 2010).

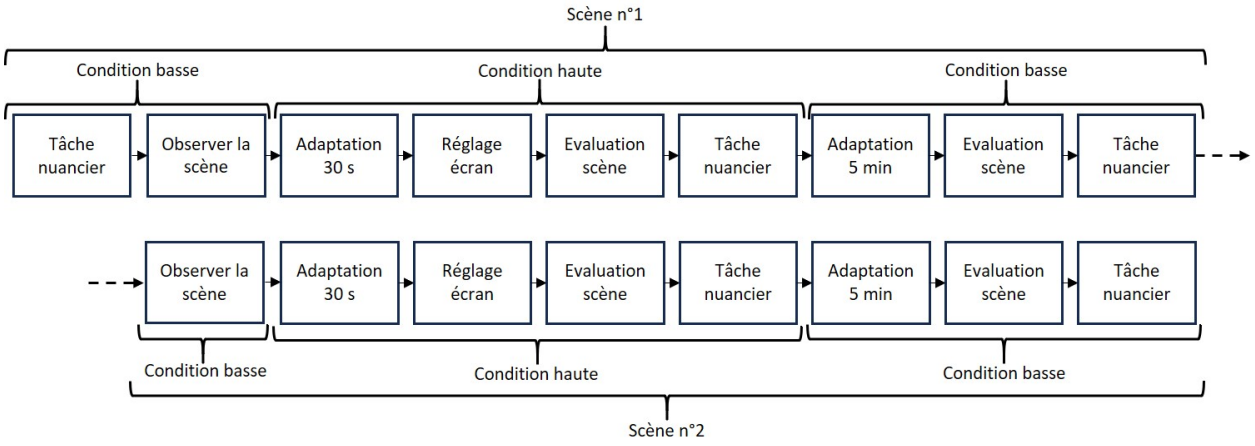


FIGURE 5.13 – Illustration de la procédure de passation de l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes - ordre : haute puis basse

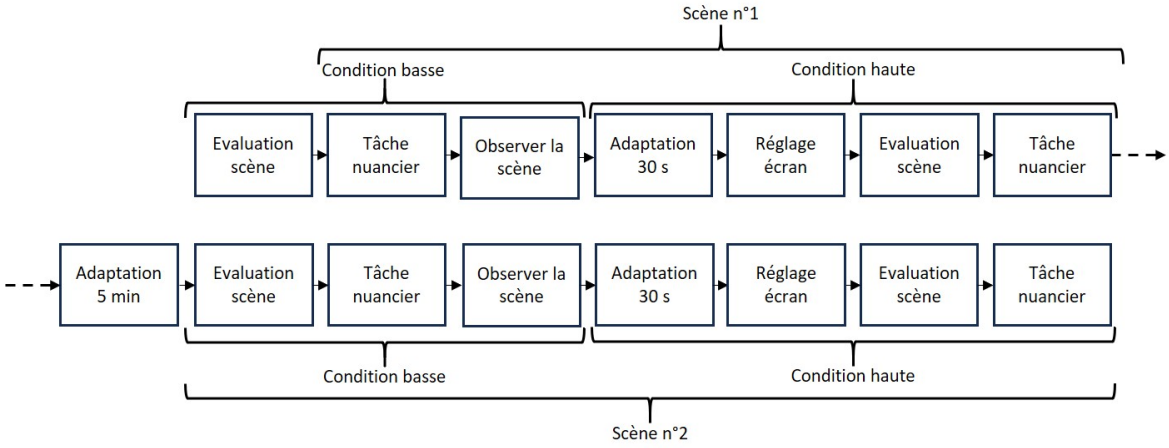


FIGURE 5.14 – Illustration de la procédure de passation de l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes - ordre : basse puis haute

5.3.2.6 Plan expérimental

Le plan expérimental est composé de deux scènes, B et C, et deux conditions lumineuses ambiantes, basse et haute. Il s'agit d'un plan à mesures répétées où tous les participants voient l'ensemble des stimuli (plan intra-sujets).

5.3.2.7 Analyses statistiques

Pour effectuer les comparaisons entre les évaluations réalisées en environnement virtuel en fonction des conditions lumineuses ambiantes, puisque les participants ont vu l'ensemble des stimuli, les variables en jeu sont de type intra-sujets. Ainsi, lorsque les hypothèses sont validées (distribution normale et sphéricité) il est possible d'utiliser une ANOVA à mesures répétées avec deux facteurs intra-sujets : a. SCENE (deux modalités : B ou C) ; b. CONDITION (deux modalités : basse ou haute). Lorsque la sphéricité n'est pas valide (test de Mauchly) la correction de Greenhouse-Geisser est appliquée. Finalement, lorsque la condition de normalité n'est pas valide (test de Kolmogorov-Smirnov), il n'est plus possible d'utiliser le test paramétrique de l'ANOVA à mesures répétées et des tests de Friedman pour échantillons appariés sont alors réalisés. Les hypothèses nulles sont :

$(\tilde{H0})_1$: « Pour un item donné, les évaluations subjectives réalisées pour les scènes B et C sont similaires » ;

$(\tilde{H0})_2$: « Pour un item donné, les évaluations subjectives réalisées avec les conditions lumineuses ambiantes basse et haute sont similaires » ;

$(\tilde{H0})_3$: « Pour un item donné, il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs SCENE et CONDITION ».

Pour étudier le lien entre les ajustements de l'écran et le contraste perçu sur le nuancier, les participants ont réalisé une tâche de performance visuelle pour l'ensemble des conditions lumineuses ambiantes (basse et haute) et après les ajustements de l'écran pour les scènes (B et C). Ainsi, si notre hypothèse est valable, la différence de contraste perçu doit être nulle entre les conditions lumi-

neuses ambiantes haute et basse (voir équation 5.4). De plus, nous souhaitons étudier la possibilité d'objectiver l'ajustement de l'écran indépendamment des scènes. Pour vérifier ces hypothèses, nous réalisons, lorsque l'hypothèse de normalité (test de Kolmogorov-Smirnov) est vérifiée, un test de Student. Lorsque l'hypothèse de normalité n'est pas validée un test non-paramétrique sur les rangs signés de Wilcoxon est appliqué. Les hypothèses nulles sont (voir Table 5.15) :

$(\tilde{H0})_4$: « La différence de contraste perçu de la scène B est nulle » ;

$(\tilde{H0})_5$: « La différence de contraste perçu de la scène C est nulle » ;

$(\tilde{H0})_6$: « La différence entre la scène B et C des différences de contraste perçu est nulle ».

5.3.3 Résultats

5.3.3.1 Statistiques descriptives

Les valeurs moyennes ainsi que les écarts-types obtenus pour les deux items pour chaque scène et condition lumineuse ambiante sont fournis dans les dernières colonnes des Tables 5.14. Les valeurs moyennes et écarts-types obtenus pour la différence de contraste perçu $\Delta C_p(B)$ / $\Delta C_p(C)$ sont fournis dans la dernière colonne de la Table 5.15. De plus, des graphiques représentant les valeurs moyennes et les intervalles de confiances à 95 % sont également fournis en Annexe 7.21.

5.3.3.2 Comparaisons entre les conditions lumineuses ambiantes en environnement virtuel

Les résultats des analyses portant sur les deux items de qualité de l'éclairage sont présentés dans la Table 5.14. Pour les deux items étudiés, un effet significatif est observé pour le facteur SCENE (resp. $F(1, 47) = 156$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.768$; $F(1, 47) = 73.8$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.611$) mais aucun effet significatif n'est observé pour le facteur CONDITION. De plus, aucune interaction entre les facteurs SCENE et CONDITION n'est observée.

Le résultats de l'analyse portant sur l'objectivité de l'ajustement du réglage de l'écran à travers une tâche de détection des contrastes (différence de contraste perçu) sont présentés dans la Table 5.15. La différence de contraste perçu entre les conditions lumineuses ambiantes haute et basse est significativement différente de la valeur nulle ($p < 0.001$) que ce soit pour la scène B ou la scène C. De plus, aucune différence significative n'est observée entre les valeurs des différences de contraste perçu à l'issue de l'ajustement de la scène B et C ($p>0.05$).

Item (0-100)	Facteur SCENE (B / C)	Facteur CONDITION (BASSE / HAUTE)	Interaction SCENE x CONDITION	Moyenne (écart-type) des évaluations BASSE	Moyenne (écart-type) des évaluations HAUTE
1) Sombre–Lumineux	**$F(1, 47) = 156$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.768$**	$F(1,47) = 3.663$; $p = 0.062$; $\eta_p^2 = 0.072$	$F(1,47) = 0.685$; $p = 0.412$; $\eta_p^2 = 0.014$	A = - (-) B = 52.2 (21.9) C = 18.6 (14.5)	A = - (-) B = 58.1 (21.7) C = 21.3 (16.4)
7) Je me sens en : Sécurité–Insécurité	**$F(1, 47) = 73.8$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.611$**	$F(1, 47) = 0.188$; $p = 0.667$; $\eta_p^2 = 0.004$	$F(1, 47) = 3.804$; $p = 0.057$; $\eta_p^2 = 0.075$	A = - (-) B = 47.3 (18.3) C = 70.8 (20.1)	A = - (-) B = 45.2 (19.8) C = 74.2 (18.7)

TABLE 5.14 – Résultats des ANOVAs à mesures répétées réalisées sur les données de l'expérience portant sur les conditions lumineuses ambiantes. Les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$)

Scène(s)	Hypothèse sur les moyennes	t-test	Moyenne (écart-type) de la différence de contraste perçu
B	$\Delta C_p(B) = 0$	**$W = 5.00$; $p < 0.001$**	$\Delta C_p(B)$ = -0.0912 (0.0614)
C	$\Delta C_p(C) = 0$	**$t(46) = -11.5$; $p < 0.001$**	$\Delta C_p(C)$ = -0.0756 (0.0451)
B et C	$\Delta C_p(B) - \Delta C_p(C) = 0$	$W = 317$; $p = 0.060$	

TABLE 5.15 – Résultats des tests de Student (scène C) et Wilcoxon signé (scène B) sur les différences de contrastes perçus. Les valeurs en gras indiquent une différence significative ($p < 0.05$)

5.4 Discussion

5.4.1 Contributions

5.4.1.1 Expérience sur l'évaluation des critères de qualité de l'éclairage en environnement virtuel

Deux expériences en environnement virtuel ont été réalisées. La première consistait à collecter les jugements de qualité de l'éclairage de trois scènes urbaines nocturnes déjà évaluées en environnement réel (évaluation sur site), reproduites selon trois chaînes d'acquisition / restitution. En comparant les évaluations statiques (position fixe) dans les scènes réelles à celles en environnement virtuel, à l'exception des items « Sombre–Lumineux », « Je vois le sol » et « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement », il y a au moins une chaîne d'acquisition / restitution où aucune différence significative est observée entre les évaluations réalisées sur site et en environnement virtuel. En considérant les évaluations dynamiques (après un déplacement de 15 m dans la scène réelle), à l'exception des items « Je vois le sol » et « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement », il y a au moins une chaîne d'acquisition / restitution où aucune différence significative n'est observée entre les évaluations réalisées sur site et en environnement virtuel. La Table 5.16 synthétise ces résultats pour chaque critère de qualité de l'éclairage.

Critère de qualité	Chaîne d'acquisition / restitution validée	Remarque
Perception de l'ambiance lumineuse	Dépend de l'item à évaluer. Sombre–Lumineux : indéterminé ; Chaud–Froid : W_LDR ; Voir le sol : dépend de la scène	Statique : Aucune chaîne ; Dynamique : Toutes les chaînes. Scène A : W_HDR et W_LDR ; Scène B : aucune chaîne ; Scène C : Toutes les chaînes
Inconfort dû à l'éblouissement	Aucune chaîne	Les participants étaient plus éblouis en environnement virtuel que sur site
Confort et satisfaction générale	Toutes les chaînes	Statique : R_LDR à confirmer
Sentiment de sécurité	Toutes les chaînes	Statique : W_HDR à confirmer
Performance visuelle	Aucune chaîne	Tâche de détection d'émotion de visage - FER

TABLE 5.16 – Synthèse des résultats portant sur les comparaisons entre les évaluations réalisées sur site et en environnement virtuel

Les conclusions différent légèrement si l'on considère les évaluations statiques ou dynamiques (après une marche de 15 m) comme vérité terrain, majoritairement sur les critères pour lesquels une différence significative était déjà présente sur site entre les évaluations statique et dynamique (« Sombre–Lumineux », « Je vois le sol » et « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène »).

Récapitulatif des résultats

Pour les items relatifs au critère de perception de l'ambiance lumineuse, nos résultats confirment ceux de la littérature (pour des scènes intérieures avec un éclairage naturel et/ou artificiel), à savoir des conclusions différentes selon les algorithmes et les scènes. Nos résultats sont notamment encourageants avec l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014). Pour les items « Je vois le sol » et « Sombre–Lumineux », nous pouvons questionner notre ajustement des paramètres des algorithmes (*key-value*) pourtant réalisé sur site en amont, en particulier pour la scène B très contrastée. Toutefois, des différences significatives sont observées avec les notes sur l'item « Sombre–Lumineux » en statique mais pas en dynamique. Cela pourrait s'expliquer par le fait que notre réglage est suffisant pour être représentatif de la luminosité du lieu parcouru quel que soit l'algorithme employé.

Pour le critère portant sur l'inconfort dû à l'éblouissement, des différences significatives sont observées entre les évaluations sur site et en environnement virtuel. Ce résultat est en adéquation avec l'état de l'art pour les chaînes LDR (R_LDR et W_LDR) mais partiellement contradictoire pour la chaîne W_HDR. En effet, dans l'état de l'art il a été mis en avant que l'usage d'environnement virtuel HDR permet d'obtenir des évaluations similaires entre les évaluations sur site et en environnement virtuel mais dans des situations diurnes avec peu d'éblouissement ressenti (Cauwerts, 2013). Étonnamment, les participants ont ressenti davantage d'inconfort dû à l'éblouissement en environnement virtuel avec W_HDR qu'en réel.

Pour le critère portant sur le confort et la satisfaction générale aucune différence significative n'est observée pour l'item « Agréable–Désagréable » entre les évaluations sur site et en environnement virtuel (à l'exception des comparaisons entre les environnements réel dynamique et virtuel W_HDR). De même aucune différence significative n'est observée pour l'item « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant » entre les évaluations sur site et en environnement virtuel (à l'exception des comparaisons entre les environnements réel statique et virtuel R_LDR). Ces résultats sont partagés avec l'état de l'art qui met en avant que les évaluations sur site et en environnement virtuel sont similaires (voir Tableau 1.10).

Pour le critère portant sur le sentiment de sécurité, pour les items « Je me sens en : Sécurité–Insécurité » et « J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » aucune différence significative n'est observée entre les évaluations sur site et en environnement virtuel. Pour l'item relatif à la projection dans la tâche de marche (cadence de marche) des différences significatives sont observées lorsque la chaîne W_HDR est utilisée. Pour l'item, « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » des différences significatives sont observées entre les évaluations réalisées sur site en position statique et dans les environnements virtuels W_LDR et W_HDR. Finalement, à l'exception des comparaisons entre les évaluations sur site en position statique et en environnement virtuel W_HDR, aucune différence significative n'est observée entre les évaluations sur site et en environnement virtuel pour l'item fusionné « SENTIMENT_SECURITE ». Ces résultats valident l'hypothèse selon laquelle les jugements subjectifs portant sur le critère relatif au sentiment de sécurité ne sont pas sensibles aux environnements d'évaluation et cela indépendamment de la qualité de reproduction physico-perceptive des environnements virtuels.

Pour le critère de performance visuelle, la tâche FER a été mise en œuvre en environnement virtuel. Des différences significatives sont observées entre les performances obtenues sur site et dans les environnements virtuels (R_LDR, W_LDR et W_HDR) pour la scène C. Ce résultat est en accord avec les résultats de la littérature qui mettent en avant que les tâches de performance visuelle ne permettent pas des résultats similaires entre les environnements réel et virtuel du fait des limites technologiques (résolution et qualité de reproduction des contrastes physiques).

Pour la perception des couleurs (du sol et de l'herbe), une tâche de perception colorée a été mise en œuvre et des différences significatives sont observées entre la perception des couleurs sur site et en environnement virtuel.

Synthèse

Nos résultats confirment en partie nos hypothèses. Pour les critères « bas niveau » (perception de l'ambiance lumineuse, perception des couleurs et performances visuelles), le choix de la chaîne d'acquisition / restitution et son paramétrage (*key-value* des algorithmes) paraît être plus important et délicat. La chaîne d'acquisition / restitution qui garantit le plus de jugements similaires sur site et en environnement réel est la chaîne W_LDR. La chaîne la plus physiquement réaliste W_HDR permet aussi d'obtenir des jugements similaires à ceux recueillis en réalité sauf pour l'item « Chaud–Froid » où seul W_LDR fonctionne. Cette différence de résultat entre W_HDR et W_LDR peut s'expliquer par les luminances saturées blanches dans les sources plus élevées dans les images W_HDR rendant la perception de l'ambiance plus froide qu'elle ne l'était en réalité. Il est bon de préciser que lors du paramétrage sur site les trois expérimentateurs ont majoritairement fixer le sol et les façades des bâtiments. De plus, nous remarquons que pour l'item « Sombre–Lumineux » notre réglage semble suffisant pour fournir une luminosité perçue équivalente à celle perçue après avoir parcouru les 15 m en réalité et ce quelle que soit la chaîne employée.

Pour les critères « haut niveau », il est possible de trouver une chaîne d'acquisition / restitution pour recueillir des évaluations similaires à celles recueillies sur site et en environnement virtuel, notamment avec la moins physiquement réaliste (R_LDR), excepté pour l'item « Je trouve que l'éclairage public est satisfaisant : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant ». Il est bon de noter que cet item était le dernier de notre questionnaire (l'ordre d'apparition des items n'était pas aléatoire), il se peut que les participants aient fait implicitement un compromis entre les différents critères évalués précédemment pour répondre à cette question générale. Or, la luminosité et la visibilité perçue étaient jugées différemment sur site et à partir des images reproduites avec R_LDR. Ce résultat reste donc a être confirmé en ne posant que la question de la satisfaction.

5.4.1.2 Expérience sur les conditions lumineuses ambiantes

Concernant l'étude portant sur les évaluations en fonction de la condition lumineuse ambiante, pour les deux items évalués « Sombre–Lumineux » et « Je me sens en : Sécurité–Insécurité », aucun effet significatif n'est observé entre les évaluations en condition lumineuse ambiante basse et haute. Notre hypothèse, selon laquelle le degré d'immersion dû aux conditions d'éclairage ambiant n'aurait pas d'impact sur les évaluations de qualité de l'éclairage, semble être validée, ce qui est encourageant pour déployer ce type d'évaluations en environnement virtuel en dehors d'un laboratoire avec une condition lumineuse ambiante haute.

Concernant l'objectivation du réglage des niveaux lumineux de l'écran à partir d'une tâche de détection des contrastes, notre étude exploratoire est encourageante mais pas concluante. En effet, les participants n'ont pas ajusté le réglage de l'écran pour compenser leur luminance de voile de façon à avoir un contraste perçu identique entre les conditions lumineuses ambiantes haute et basse. Toutefois, la différence de contrastes perçus entre les conditions lumineuses basse et haute après le réglage des niveaux lumineux de l'écran est identique d'une scène à l'autre, ce qui laisse imaginer qu'il serait possible d'objectiver le réglage de l'écran à partir de la différence de contrastes perçus entre les conditions lumineuses ambiantes. D'autres expériences sont requises pour approfondir la question.

5.4.2 Limites et perspectives

L'expérience sur les comparaisons entre les évaluations dans les environnements réel et virtuel présente diverses limites. Premièrement pour l'acquisition des scènes, des zones floues sont observables sur les photos HDR car d'une prise de photo LDR à l'autre l'appareil photographique s'est légèrement décalé et aucun algorithme de mise en correspondance géométrique a été utilisé lors de la création des images HDR. Il pourrait être bénéfique d'intégrer dans des travaux futurs ce type d'algorithme ou mettre en place un outil de prise automatique de l'ensemble des photographies. De plus, puisque certaines scènes urbaines nocturnes présentent des zones avec des niveaux lumineux faibles il est nécessaire de prendre des photographies avec des durées d'exposition longues (supérieur à la seconde) ce qui nécessite de ne pas avoir de mouvements dans la scène (*e.g.* piétons dans la scène). Or, il peut être intéressant pour certaines scènes urbaines nocturnes de capturer des éléments « en mouvement » notamment pour conserver le caractère « vivant » du lieu (*e.g.* pour l'évaluation de place publique fortement fréquentée). De par leurs niveaux lumineux faibles, les acquisitions des scènes urbaines nocturnes présentent du bruit (principalement numérique) qu'il est nécessaire de traiter dans les captures. Durant les travaux de la thèse, le choix simple de mettre des seuils d'acceptation du rapport signal/bruit a été fait. Cependant, ce choix ne permet pas de bénéficier de l'ensemble des données acquises. Il serait intéressant que dans les travaux à venir des méthodes de traitement de données soient mises en place, par exemple, en utilisant un algorithme de suppression de bruit comme celui proposé par Aguerrebere et al. (2013).

Concernant la restitution des scènes acquises, nous avons choisi d'étudier l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) dans une version revisitée (mise en place d'un paramètre libre a' et simplification de la *Contrast Sensitivity Function - CSF*). Dans des travaux futurs il pourrait être intéressant de prendre en compte la CSF des participants dans l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014), par exemple en utilisant le modèle de Mantiuk et al. (2022). De plus, plusieurs algorithmes permettant de prendre en compte la vision mésopique ont été identifiés (Mikamo et al., 2014 ; Rezagholizadeh, 2016 ; Wanat and Mantiuk, 2014). Il pourrait être intéressant de tous les étudier / comparer pour le recueil de jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage urbain nocturne. Par ailleurs, nous avons utilisé un écran miniLED avec sa dalle lumineuse mise au maximum ce qui permet d'obtenir une plage de luminance la plus réaliste au détriment de la finesse de reproduction des contrastes (dû à la quantification numérique de l'écran, 8 bits ou 10 bits). A l'avenir, il pourrait être intéressant de réaliser de nouveau l'expérience mais en fixant la luminance maximale de l'écran dans des niveaux plus bas, ce qui détériorera la dynamique de luminance mais permettra une plus grande finesse dans la restitution des niveaux sombres. De plus, les participants reportent être plus éblouis dans l'environnement virtuel que sur site, ainsi réduire les niveaux lumineux de l'écran pourrait jouer en notre faveur pour ce critère de qualité de l'éclairage. Finalement, nous avons fait le choix d'utiliser un écran « classique » et non un casque de réalité virtuelle alors que ces derniers sont de plus en plus étudiés dans les laboratoires, car nous avons voulu proposer une méthode facilement déployable dans des services de l'état (*e.g.* mise en place d'un ordinateur sur une table ou dans un totem où les participants peuvent répondre rapidement sans avoir à s'approprier un casque de réalité virtuelle). Des travaux futurs pourraient s'intéresser à ce type d'outil pour augmenter l'immersion et ainsi permettre d'approfondir les connaissances sur l'importance selon chaque critère de qualité de l'éclairage sur la nécessité du caractère immersif ou physiquement réaliste.

Lors des acquisitions sur site nous avons obtenu des données colorimétriques qui n'ont pas servi dans les chaînes d'acquisition / restitution testées. Nous avons voulu utiliser ces données colorimétriques pour réaliser des cartes de luminance à partir des données RVB de l'appareil photographique. Cependant, l'étude présentée en Annexe 7.14 met en avant qu'un étalonnage en laboratoire produit de meilleures estimations. Une des raisons à cela pourrait être que lors de l'acquisition de données colorimétriques, la dynamique de luminance comprise dans les points de référence était plus faible que celle des points de référence du jeu de données réalisé en laboratoire qui elle même était plus faible que la dynamique de luminance présente sur site. De plus, nous avons réaliser un étalonnage colorimétrique (espace CIE-XYZ 2°) entre l'appareil photographique et l'écran. Cependant les images obtenues ne nous paraissaient pas naturelles, ainsi nous avons écarté l'usage de ces données colorimétriques. Une réflexion future est requise pour approfondir cette idée.

Concernant le protocole de restitution des images, nous avons dû faire un ajustement sur site des paramètres des algorithmes (*key-value*). Ce choix a été réalisé de manière subjective (entre les trois expérimentateurs) qu'il serait intéressant d'objectiver dans le contexte de scènes urbaines nocturnes. Une façon d'objectiver ces paramètres pourrait être d'utiliser la luminance d'adaptation estimée par la zone définie par Uchida et al. (2016) sur site et en environnement virtuel puis de déterminer numériquement les valeurs des paramètres des algorithmes qui permettent d'obtenir la luminance d'adaptation la plus proche de celle présente sur site. Puis, une étude psychovisuelle pourrait permettre de confirmer ou infirmer ces méthodes d'ajustement automatique, en comparant les ajustements réalisés par les participants avec ceux prédits par le dispositif d'ajustement automatique.

De plus, concernant le mode de représentation des images, nous avons fait le choix d'utiliser une image agrandie (image représentant un champ visuel de 100° / 89° / 67° pour la diagonale / horizontale / verticale) en laissant les participants libre de naviguer dans toute l'image (simulant ainsi une méthode type QTVR). Le questionnaire portant sur l'immersion (IQP) révèle que pour les trois chaînes d'acquisition / restitution étudiées les participants étaient en immersion. Il serait intéressant de déterminer le niveau d'immersion en utilisant d'autre mode de restitution (*e.g.* image fixe). De plus, il serait intéressant de déterminer le champ visuel minimal permettant de garantir un bon niveau d'immersion permettant ainsi d'obtenir des conclusions valides pour les critères de qualité « haut niveau ».

Lors de l'expérience, nous avons fait le choix de fournir des éléments de contexte aux participants (*e.g.* « Vous êtes à Vaulx-en-Velin », « Désormais vous vous baladez le long du planétarium ») alors que pour autant les personnes qui pourront être amenées à évaluer des scènes urbaines nocturnes n'ont pas nécessairement connaissance du contexte des lieux. Ainsi, il serait intéressant d'étudier à l'avenir si l'apport de contexte impacte les jugements des scènes urbaines nocturnes. Pour ce faire, une autre étude devrait être réalisée sur un panel de participants qui ne reconnait pas les scènes et pour lequel aucun contexte ne lui a été fourni.

Nous nous sommes concentrés sur les principaux critères de qualité de l'éclairage pour les piétons (visibilité, sentiment de sécurité). Toutefois, pour étudier le lien entre ses critères fonctionnels et les impressions subjectives des ambiances nocturnes, il serait intéressant de valider à l'avenir l'utilisation d'autres questionnaires tels que celui proposé par Johansson et al. (2014), l'uniformité perçue ou encore de reprendre, par exemple, le questionnaire proposé dans les travaux de Atié (2024) pour valider son utilisation en environnement virtuel sur des espaces urbains nocturnes.

Concernant l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes, plusieurs limites peuvent être soulevées. Premièrement, les sources lumineuses utilisées afin d'obtenir des ambiances lumineuses haute et basse n'étaient pas les mêmes en terme de distribution spectrale et température de couleur. Or, il pourrait être intéressant de réaliser de nouveau une expérience similaire en utilisant un dispositif expérimental identique entre les conditions lumineuses ambiantes haute et basse, à l'exception des flux lumineux. Deuxièmement, d'un point de vue protocolaire les participants ont réglé l'écran de façon à ce que leur perception de l'espace soit la même ce qui est plutôt avantageux (voire potentiellement créateur de biais) pour obtenir ces évaluations en condition lumineuse basse identiques à celles en condition haute. De plus, nous avons fait ajuster l'écran aux participants mais il serait intéressant d'étudier avec un autre panel de participants (disjoint de celui de cette expérience) si le réglage moyen fournit par les participants de cette expérience permet de fournir les mêmes conclusions. Concernant la tâche de détection des contrastes, cette dernière a été réalisée à l'aide d'un nuancier avec une graduation relativement grossière, or une graduation plus fine aurait permis une meilleure estimation des contrastes perçus des participants. Un modèle a été généré à partir des mesures pour estimer les luminances des barres mesurées en condition haute qui a pu gommer les reflets perçus sur l'écran. Nous avons fait l'hypothèse simplificatrice que la différence d'adaptation des participants en condition haute et basse pourrait s'estimer avec l'ajout d'une luminance de voile dans le calcul du contraste perçu. Pour approfondir notre idée, il serait nécessaire d'étudier d'avantage la littérature sur l'adaptation. Enfin, d'un point de vue statistique, les participants n'ont évalué que deux scènes sous deux conditions lumineuses ambiantes différentes, il serait intéressant pour des travaux à venir de répéter cette expérience pour plusieurs scènes et d'autres conditions lumineuses ambiantes.

5.5 Conclusion

Deux expériences ont été menées en environnement virtuel (*i.e.* écran d'ordinateur) pour recueillir des jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage avec un panel de 48 participants.

La première expérience portait sur la validation de chaînes d'acquisition / restitution pour le recueil de jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage dans trois scènes urbaines nocturnes évaluées dans une salle ayant une ambiance lumineuse proche de celle présente sur site. Les scènes urbaines nocturnes ont été acquises via des images HDR puis reproduites dans un environnement virtuel en utilisant trois chaînes d'acquisition / restitution :

1. algorithme de Reinhard et al. (2002) $\oplus$ écran LDR ;
2. algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) revisité $\oplus$ écran LDR ;
3. algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) revisité $\oplus$ écran HDR.

L'étude portant sur le recueil de jugements subjectifs pour évaluer la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel met en avant que peu importe le critère de qualité de l'éclairage, il est possible d'identifier un environnement virtuel qui permet de recueillir des jugements subjectifs identiques à ceux collectés sur site (excepté la visibilité perçue pour la scène B, l'inconfort dû à l'éblouissement et les performances visuelles). En effet, il y a encore des limitations technologiques qui freinent l'évaluation des performances visuelles de perception des couleurs (liée à la capacité de reproduction physico-perceptif de l'écran utilisé) et d'inconfort dû à l'éblouissement sur écran. De plus, nos résultats n'ont permis d'identifier aucune méthode parmi celles testées permettant de recueillir l'ensemble des critères de qualité de l'éclairage en environnement virtuel. Néanmoins, dans le cas d'une démarche participative nous recommandons d'utiliser l'algorithme de Reinhard et al. (2002) qui permet d'obtenir des jugements similaires sur site (en considérant les données statiques et / ou dynamiques) en environnement virtuel pour les critères de confort, luminosité perçue, satisfaction et de sentiment de sécurité et dont l'algorithme a déjà été mis en place dans de nombreux logiciels. Un ajustement adapté de la *key-value* devrait permettre d'obtenir également des résultats satisfaisants selon des critères perceptifs telle que la visibilité perçue. Pour la réalisation de recueils de jugements subjectifs à des fins scientifiques, il est nécessaire d'utiliser les environnements virtuels adéquats. En particulier l'utilisation de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) parait encourageante pour les critères perceptifs (visibilité, luminosité, ambiance colorée perçue).

La seconde expérience exploratoire visait à identifier s'il était possible d'une part d'obtenir des jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage similaires entre deux conditions lumineuses ambiantes différentes, et d'autre part s'il était possible d'objectiver le réglage des niveaux lumineux de l'écran via une tâche de détection des contrastes lorsque l'on passe d'une ambiance lumineuse sombre à une autre plus claire. Pour ce faire, deux critères de qualité de l'éclairage, luminosité perçue et sentiment de sécurité, ont été évalués sur deux scènes urbaines nocturnes reproduites dans un environnement virtuel (algorithme de Reinhard et al. (2002) $\oplus$ écran LDR) et pour deux conditions lumineuses ambiantes (basse = proche de l'ambiance présente sur site ; haute = des flux lumineux plus élevés que sur site).

En premier lieu pour les deux critères évalués il est possible d'identifier un réglage de l'écran permettant d'obtenir les mêmes ressentis subjectifs entre les deux conditions lumineuses ambiantes étudiées. En second lieu, le lien entre le réglage de l'écran et le contraste perçu n'est pas évident. En effet, la différence de contrastes perçus sur le nuancier de gris entre la condition lumineuse basse et après réglage de l'écran, la condition lumineuse haute, n'est pas nulle. Il est cependant possible d'affirmer que la différence de contrastes perçus est identique entre le réglage de l'écran d'une scène

à l'autre. Ce dernier point laisse apparaître une possibilité d'objectiver le réglage de l'écran à partir d'une tâche de contraste perçu mais reste à être étudié plus en détail.

Finalement, les Tables 5.17 et 5.18 fournissent un récapitulatif des résultats présentés dans ce chapitre en fonction des hypothèses soulevées en section 5.1.

Description de l'hypothèse	Validation	Remarque
(H1) Selon les résultats de Abd-Alhamid et al. (2019), Bishop and Rohrmann (2003), Cauwerts (2013), Newsham et al. (2010) et Stamps (1990, 2010), les jugements subjectifs portant sur le critère de qualité de l'éclairage « confort » ne sont pas sensibles aux environnements d'évaluation, *i.e.* sur site ou en environnement virtuel, et cela indépendamment de la qualité de reproduction physico-perceptive des environnements virtuels (écran LDR / HDR ou casque RV ou technologie type QTVR ou vidéo)	Validée	Une différence significative proche du seuil est observée entre les évaluations sur site en position statique et les évaluations en environnement virtuel avec R_LDR. Le résultat reste à être confirmé sur d'autres scènes
(H2) Selon les résultats de Abd-Alhamid et al. (2019), Cauwerts (2013), Newsham et al. (2010) et Chen et al. (2019), il n'y a pas de consensus clair sur le fait que les jugements subjectifs relatifs à la « perception de l'ambiance lumineuse » soient sensibles à la qualité de reproduction physico-perceptive des environnements virtuels	Validée	Pour l'item sombre-lumineux, utiliser n'importe quelle chaîne d'acquisition / restitution permet d'obtenir des jugements similaires comparés à ceux obtenus lors des évaluations en dynamique (le long du parcours de 15 m) ; Pour l'item chaud-froid, la chaîne W_LDR semble fournir des jugements similaires mais cela reste à être confirmé sur d'autres scènes avec d'autres températures de couleur
(H3) Selon les résultats et discussions / limites exposés par Abd-Alhamid et al. (2019) et Rockcastle et al. (2021), les tâches de « performance visuelle » sont dépendantes des limites des dispositifs d'affichage (*e.g.* résolution et gamut)	Validée	Pour la tâche FER, les performances obtenues en environnement virtuel sont différents de celles obtenues en environnement réel
(H4) Selon les résultats de Cauwerts (2013) et Newsham et al. (2010), il n'y a pas de consensus claire sur le fait que les jugements subjectifs relatifs à « l'inconfort dû à l'éblouissement » soient sensibles aux environnements d'évaluation. De plus, il semblerait qu'utiliser des dispositifs d'affichage avec une meilleure qualité de reproduction physico-perceptive (*i.e.* utiliser un écran HDR à la place d'un écran LDR) soit préférable mais cela reste à être validé sur des scènes où les personnes ressentent de l'inconfort dû à l'éblouissement	X	D'après l'étude présentée dans la thèse, aucune chaîne d'acquisition / restitution ne permet de garantir des jugements similaires à ceux obtenus sur site

TABLE 5.17 – Récapitulatif des hypothèses testées et de leurs validités - expériences en environnement virtuel

Description de l'hypothèse	Validation	Remarque
(H5) Pour le critère relatif au « sentiment de sécurité », il y a peu de travaux qui traitent de ce critère. Cependant, puisque ce critère est lié à une multitude de facteurs (*e.g.* voir l'espace et analyser le contexte du lieu), il est possible de formuler l'hypothèse selon laquelle les jugements subjectifs portant sur le critère « sentiment de sécurité » ne sont pas sensibles aux environnements d'évaluation et cela indépendamment de la qualité de reproduction physico-perceptive des environnements virtuels	Validée	
(H6) Les évaluations en environnement virtuel, après réglage des niveaux lumineux du dispositif d'affichage, ne sont pas sensibles aux conditions lumineuses ambiantes autour du dispositif d'affichage	Validée	L'hypothèse n'a été testée que pour les items « Sombre–Lumineux » et « Je me sens en : Sécurité–Insécurité »
(H7) Il est possible d'objectiver l'ajustement des niveaux lumineux du dispositif d'affichage à l'aide d'une tâche de détection des contrastes	Invalidée	

TABLE 5.18 – Récapitulatif des hypothèses testées et de leurs validités - expériences en environnement virtuel

Conclusion de la deuxième partie

Cette partie visait à lever le verrou scientifique identifié dans l'état de l'art : Quelles méthodes utilisées pour le recueil de jugements subjectifs portant sur la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel ?

Pour ce faire, nous avons proposé un plan expérimental fondé sur des comparaisons entre les évaluations de la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes sur site et en environnement virtuel. Ainsi, nous avons réalisé une expérience permettant le recueil d'une vérité terrain (voir Chapitre 4) que nous avons comparée avec les évaluations recueillies en environnement virtuel (*i.e.* scènes reproduites et affichées sur un écran d'ordinateur - voir Chapitre 5).

Lors du recueil de jugements subjectifs sur site, nous avons étudié l'impact du mode d'évaluation, notamment la différence entre l'évaluation dans un contexte écologique (évaluation après une marche de 15 m dans la scène) et en position statique (évaluation à une position fixe avec un regard libre). L'expérience menée sur 43 participants a mis en avant que, pour l'ensemble des critères de qualité de l'éclairage excepté la visibilité perçue, l'évaluation de scènes urbaines nocturnes peut se réaliser en position statique à la place de l'évaluation dynamique. En effet, il semble préférable d'engager les participants dans une tâche de déplacement quand on se concentre sur la visibilité perçue.

Dans l'objectif d'identifier des environnements virtuels permettant le recueil de jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes, des comparaisons entre le recueil sur site (en position statique - N = 43) et celui issu de trois environnements virtuels (N = 48) ont été réalisées. On en conclut qu'il est possible d'utiliser les environnements virtuels pour recueillir des jugements subjectifs de la qualité de l'éclairage. Cependant aucun environnement virtuel n'est valable pour l'ensemble des critères. L'utilisation de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) revisité fournit des résultats encourageants pour des critères relatifs à la perception de l'ambiance lumineuse (luminosité perçue, visibilité perçue, ambiance colorée perçue). Toutefois, pour des démarches participatives nous recommandons d'utiliser l'algorithme de compression de Reinhard et al. (2002) (algorithme grandement déployé dans les logiciels de traitement d'images) avec un écran LDR. En effet, il permet d'obtenir des résultats valides sur tous les critères sauf la visibilité perçue (par rapport aux données statiques et dynamiques). Néanmoins, dans un contexte scientifique il est nécessaire d'utiliser l'environnement virtuel qui permet le recueil de jugements subjectifs en fonction des critères de qualité que l'on souhaite évaluer (voir Table 5.16).

Enfin, nous avons également mené une étude exploratoire (N = 48) afin de déterminer s'il est possible d'adapter le réglage des niveaux lumineux de l'écran de façon à ce que pour deux conditions lumineuses ambiantes les jugements subjectifs soient similaires. Notre conclusion est qu'il est possible de trouver un réglage de l'écran permettant le recueil de jugements subjectifs similaires d'une condition lumineuse ambiante à une autre. En perspective, il serait intéressant d'approfondir notre recherche pour objectiver ce réglage par une tâche de perception des contrastes standardisée.

Chapitre 6

Conclusion, contributions et perspectives

6.1 Conclusion

La thèse a pour objectif de fournir des outils d'évaluation de la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes pour les piétons qui soient facilement déployables. Les scènes urbaines nocturnes se différencient des scènes diurnes par la présence de :

— grandes dynamiques de luminance ;
— contrastes élevés ;
— niveaux lumineux qui peuvent être à la fois photopiques et mésopiques ;
— plusieurs sources lumineuses présentant des distributions spectrales différentes.

Pour réaliser des évaluations de la qualité de l'éclairage pour les piétons, il est possible d'une part de conduire des évaluations s'appuyant sur des modèles perceptifs. D'autre part, il est possible de recueillir les jugements subjectifs en questionnant les usagers piétons. Néanmoins, afin de fournir des outils facilement déployables, les travaux présentés dans la thèse utilisent des observations RVB qui peuvent soit permettre l'estimation de grandeurs photométriques ou radiométriques, soit permettre d'obtenir une image qui sera ensuite reproduite dans des dispositifs d'affichage, dans l'objectif de réaliser des évaluations subjectives dans des environnements virtuels.

Compte tenu du contexte d'étude et de l'objectif de la thèse, trois questions scientifiques ont été identifiées :

1. Quelles méthodes d'étalonnage colorimétrique utiliser pour des scènes urbaines nocturnes ?
2. Quelles méthodes utiliser pour effectuer des reconstructions spectrales de scènes urbaines nocturnes ?
3. Quelles méthodes utiliser pour le recueil de jugements subjectifs portant sur la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel ?

Quelles méthodes d'étalonnage colorimétrique utiliser pour des scènes urbaines nocturnes ?

Pour répondre à cette question, deux expériences ont été réalisées. La première visait à déterminer les méthodes d'étalonnage colorimétrique à utiliser pour des observations dans les domaines visuels photopique et mésopique lorsqu'une seule source lumineuse éclaire la scène. La seconde expérience exploratoire avait pour objectif de déterminer s'il est possible de proposer une méthode d'étalonnage colorimétrique qui peut s'appliquer sur des scènes comportant plusieurs sources lumineuses de caractéristiques spectrales différentes. Les résultats suggèrent une réponse positive : dans le cas de scènes ne comportant qu'un type de source de lumière, via des outils s'appuyant sur la SVD et sur l'interpolation tri-linéaire ; pour des scènes comportant plusieurs sources lumineuses de distributions spectrales différentes, via l'interpolation par splines avec enrichissement des données RVB (*i.e.* une observation native et une autre au travers d'un filtre coloré). Ces outils nécessitent peu d'observations (un triplet RVB ou deux triplets RVB) ce qui garantit leur caractère facilement déployable.

Quelles méthodes utiliser pour effectuer des reconstructions spectrales de scènes urbaines nocturnes ?

Une expérience a visé à déterminer le nombre d'observations RVB (un triplet RVB et n triplets RVB obtenus au travers de filtres colorés) ainsi que le pas d'échantillonnage nécessaire pour obtenir des reconstructions spectrales suffisamment fidèles. L'association proposée, entre un modèle de distribution spectrale fondé sur les splines cubiques de Hermite et une méthode matricielle de résolution rapide, fournit des reconstructions spectrales fidèles, pour un rapport signal sur bruit n'excédant pas 3 % dans les données d'observations. De plus, plus le rapport signal sur bruit est élevé plus il est nécessaire d'exploiter un pas d'échantillonnage élevé (40 nm pour des données comportant 10 % de bruit crête à crête). Enfin, concernant le caractère facilement déployable, les reconstructions spectrales sont d'autant plus fidèles que le nombre d'observations RVB augmente. Cependant, les résultats suggèrent qu'utiliser cinq triplets RVB peut suffire.

Quelles méthodes utiliser pour le recueil de jugements subjectifs portant sur la qualité de l'éclairage de scènes urbaines nocturnes en environnement virtuel ?

Pour répondre à cette question, deux expériences psychovisuelles ont été réalisées. La première consistait à recueillir le ressenti subjectif lié à la qualité de l'éclairage (N = 43) dans trois scènes urbaines nocturnes sur site, présentant des caractéristiques variées (température de couleur, uniformité, niveaux lumineux) afin de constituer une vérité terrain. La deuxième expérience avait pour objectif de recueillir les ressentis subjectifs (N = 48) de ces trois scènes reproduites dans trois environnements virtuels (utilisant l'algorithme de Reinhard et al. (2002) ou celui de Wanat and Mantiuk (2014)) puis de comparer les ressentis subjectifs sur site avec ceux obtenus dans les environnements virtuels. Il en ressort que pour les critères relatifs à la perception de l'ambiance lumineuse, il est préférable d'utiliser l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) afin d'obtenir des jugements subjectifs similaires à ceux obtenus sur site. Pour le critère relatif à l'inconfort dû à l'éblouissement, aucun des environnements virtuels étudiés ne permet d'obtenir des jugements similaires à ceux obtenus sur site confirmant la nécessité d'études terrain pour ce critère. Enfin, pour les critères relatifs au confort et la satisfaction générale de l'éclairage public et pour le sentiment de sécurité, l'ensemble des environnements virtuels convient pour obtenir des ressentis subjectifs similaires à ceux obtenus sur site. Vis-à-vis du caractère facilement déployable, utiliser l'algorithme de Reinhard et al. (2002) qui est largement utilisé dans des logiciels de traitement d'images est suffisant pour de nombreux critères de qualité de l'éclairage ; cependant pour des applications scientifiques il est nécessaire d'utiliser le bon environnement virtuel en fonction du critère que l'on souhaite évaluer.

6.2 Contributions scientifiques

6.2.1 Expériences sur les outils d'étalonnage colorimétrique

Contribution méthodologique

Une approche permettant l'utilisation des méthodes locales (par interpolation tri-linéaire ou splines) a été proposée de façon à être applicable dans le domaine des extrapolations. Elle s'appuie sur l'estimation des coordonnées colorimétriques d'un hyper-rectangle qui englobe l'ensemble des données à étalonner (triplets RVB). Les estimations colorimétriques de l'hyper-rectangle sont obtenues à partir d'un étalonnage par SVD. De plus, utiliser des données synthétiques pour estimer la précision des étalonnages colorimétriques (indicateur ΔE^*_{00}) ne permet pas de fournir des résultats similaires à des étalonnages réalisés avec des données réelles acquises à l'aide d'une caméra numérique.

Utiliser un jeu de données provenant de la capture d'une même palette éclairée à deux niveaux lumineux améliore les résultats dans la mesure où le domaine de l'interpolation s'agrandit par rapport à celui de l'extrapolation, qui présente des résultats moins fidèles.

Enfin, une méthode d'étalonnage colorimétrique avec enrichissement des données (triplets RVB, natif, et obtenu au travers d'un filtre coloré) a été proposée. Les résultats des premières évaluations suggèrent un intérêt dans le cas de scènes comportant plusieurs sources lumineuses de caractéristiques spectrales différentes.

Contribution aux connaissances scientifiques

Dans le cas de scènes comportant des sources lumineuses de mêmes caractéristiques spectrales, des connaissances relatives à la quantification des méthodes d'étalonnage colorimétrique ont été apportées, selon le domaine d'usage (interpolation ou extrapolation), et ceci tant pour des niveaux lumineux photopiques que mésopiques. Dans le cas d'une scène comportant plusieurs sources lumineuses présentant des distributions spectrales différentes, les différences colorimétriques obtenues en s'appuyant sur des données enrichies (deux triplets RVB) ont été estimées.

Contribution liée à l'acquisition de données

Une base de données comportant les coordonnées de 150 patchs colorés éclairés par quatre sources lumineuses à 11 niveaux lumineux, dans les espaces CIE-XYZ (2°) et LMSR, ainsi que les triplets RVB associés provenant d'une caméra numérique, et obtenus de façon synthétique, a été bâtie.

Une base de données relative à 150 patchs colorés éclairés par trois sources lumineuses à trois niveaux lumineux, comportant leurs coordonnées dans l'espace CIE-XYZ (2°), ainsi que les triplets RVB associés provenant d'une caméra numérique obtenus nativement, et au travers de deux filtres colorés, a été bâtie.

6.2.2 Expérience sur l'outil de reconstruction spectrale

Contribution méthodologique

Une approche associant la méthode de reconstruction par splines cubiques de Hermite avec une méthode de résolution matricielle a été proposée, permettant la détermination du minimum global du problème inverse sous-jacent et la réduction du temps de calcul (environ 3200 fois plus rapide que des méthodes itératives d'optimisation).

Contribution aux connaissances scientifiques

Des connaissances ont été apportées sur le nombre de filtres colorés (triplets RVB enrichis) et le pas d'échantillonnage à utiliser en fonction du bruit crête à crête présent dans les données d'observation.

Contribution liée à l'acquisition de données

Une base de données comprenant des luminances spectriques associées à des triplets RVB enrichis (21 filtres colorés), obtenus de façon synthétique, correspondant à l'observation de 54 patchs colorés éclairés par trois sources lumineuses, a été bâtie, pour des niveaux lumineux photopiques et mésopiques. La base de données intègre des données RVB sans bruit, et comportant un bruit dont l'amplitude crête à crête est de 1 %, 3 %, 5 % et 10 %.

6.2.3 Expériences sur le recueil de ressentis subjectifs de la qualité de l'éclairage

Contribution méthodologique

Un questionnaire pouvant servir dans le recueil de la qualité de l'éclairage a été proposé dans la thèse. En outre, des comparaisons sur site ont permis de mettre en avant que les ressentis portant sur la qualité de l'éclairage obtenus après un déplacement de 15 m dans la scène et en position statique au milieu du parcours sont similaires pour une majorité des critères de qualité de l'éclairage. Ce résultat est une première brique dans la recherche d'un protocole adapté pour recueillir le ressenti le plus proche de celui des piétons se déplaçant dans une rue éclairée.

Enfin, nos expériences ont permis d'identifier des chaînes d'acquisition / restitution à utiliser en fonction du critère de qualité de l'éclairage que l'on souhaite évaluer (voir Table 5.16).

Contribution aux connaissances scientifiques

Nos expériences ont permis de confirmer et d'étendre les résultats de la littérature connus pour des scènes d'éclairage diurnes à des scènes urbaines nocturnes, à savoir la possibilité d'utiliser une chaîne d'acquisition usuelle (algorithme de Reinhard et al. (2002) avec un écran HDR) pour recueillir des évaluations sur des critères haut-niveau tels que la satisfaction et le confort, mais aussi le sentiment de sécurité (pour lequel nous n'avions identifié aucun travail antérieur de validation). En outre, nous avons apporté une première brique en validant l'utilisation de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) revisité pour les critères de perception des ambiances lumineuses.

Enfin, la mise en œuvre de la tâche FER sur site a révélé les limites de cette proposition (Yang and Fotios, 2015) à être transposée sur site pour discriminer des installations d'éclairage et être prédictive du sentiment de sécurité.

Contribution liée à l'acquisition de données

Une base de données comprenant la description photométrique et les jugements de 43 participants sur la qualité de l'éclairage de trois scènes urbaines nocturnes présentant des caractéristiques variées (température de couleur, uniformité et niveau lumineux) a été réalisée. Les données comprennent des notes comprises entre 0 et 100 sur plusieurs critères de qualité de l'éclairage (perception de l'ambiance lumineuse, inconfort dû à l'éblouissement, confort et satisfaction générale, sentiment de sécurité) et les résultats d'une tâche de performance visuelle (tâche FER, d'après Yang and Fotios (2015)), recueillis après avoir marché 15 m dans la scène, ou en position statique au milieu du parcours. Les données photométriques comprennent des cartes de luminance, des mesures d'éclairement horizontal au sol et vertical le long du parcours.

Une base de données comprenant les jugements de 48 participants sur la qualité de l'éclairage des trois scènes reproduites dans les environnements virtuels (algorithme de Reinhard et al. (2002) $\oplus$ écran LDR ; algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) revisité $\oplus$ écran LDR ; algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) revisité $\oplus$ écran HDR) correspondant à la position statique a été bâtie. Les données comprennent des notes comprises entre 0 et 100 sur la qualité de l'éclairage recueillies via le même questionnaire que celui utilisé lors du recueil sur site et des items du questionnaire IPQ de Schubert (2025). De plus, des cartes de luminances associées au dispositif expérimental ont été acquises dans les mêmes conditions que les participants.

6.3 Perspectives

L'ensemble des expériences menées présentent des limites et / ou soulèvent des perspectives.

6.3.1 Expériences sur les outils d'étalonnage colorimétrique

Premièrement, concernant les jeux de données, il serait intéressant de vérifier si les résultats obtenus dans les conditions expérimentales présentées (caméra Nikon D850 et source lumineuse LED) sont généralisables à d'autres conditions d'observation (pour d'autres caméras numériques), et pour d'autres sources lumineuses et / ou autres matériaux. S'appuyer sur des matériaux représentatifs des scènes urbaines nocturnes pourrait améliorer les estimations colorimétriques.

Plutôt que de considérer un pixel indépendamment des autres, l'usage de réseaux de neurones par convolution ou mécanisme d'attention permettrait d'exploiter des corrélations entre la luminance spectrique d'un pixel et de celle de ses voisins, ou même d'autres parties de l'image.

6.3.2 Expérience sur l'outil de reconstruction spectrale

Le bruit crête à crête ajouté aux données a permis d'estimer les résultats qu'il serait possible d'obtenir à partir d'observations réelles. La caractérisation des profils de bruit numérique de caméras permettrait d'obtenir des résultats plus représentatifs. Des expériences à partir de données réelles seraient complémentaires.

Par ailleurs, il pourrait être intéressant d'étudier des outils hybrides entre résolution du problème inverse et connaissance *a priori*, s'appuyant par exemple sur des techniques d'interpolation à partir de données de référence représentatives des scènes urbaines : en plus des diverses observations RVB, l'impact de la prise en compte de données XYZ ou LMSR issue d'un étalonnage colorimétrique au

sein de la méthode de résolution du problème inverse pourrait être évalué.

Enfin, les réseaux de neurones convolutifs ou fondés sur des mécanismes d'attention représentent aussi une piste d'investigation intéressante.

6.3.3 Expériences sur le recueil de ressentis subjectifs de la qualité de l'éclairage

Premièrement, concernant le recueil de données subjectives, un questionnaire portant sur la qualité de l'éclairage a été mis en place. Toutefois, pour étudier le lien entre les critères fonctionnels et les impressions subjectives des ambiances nocturnes, il serait intéressant de valider l'utilisation d'autres questionnaires tel que le POLQ, d'ajouter un item sur l'uniformité perçue ou encore de reprendre par exemple le questionnaire proposé par M. Atie dans sa thèse pour valider son utilisation en environnement virtuel sur des espaces urbains nocturnes.

De plus, lors des analyses des jugements subjectifs, aucune étude sur le lien entre les critères relatifs à la qualité de l'éclairage n'a été réalisée. Il pourrait être intéressant d'analyser si des items peuvent s'exprimer à partir d'autres items ou s'il est possible de définir des catégories d'items. Ce dernier point permettrait en outre de continuer notre catégorisation des critères de qualité de l'éclairage. En complément, il serait intéressant d'étudier la hiérarchisation de ces critères en fonction des usages, des usagers et des espaces éclairés.

En complément, la base de données recueillie notamment sur le terrain pourra servir à étudier dans de futures recherches le lien entre grandeurs photométriques et ressentis subjectifs des scènes urbaines nocturnes, pour établir des recommandations ou déterminer des modèles à des fins prénormatives. Une exploitation de ces données a déjà été réalisée en ce sens, dans l'article présenté à la conférence CIE 2025 qui étudie les performances à la tâche FER en fonction de la luminance des visages et du sentiment de sécurité.

En outre, l'expérience sur site a permis de soulever plusieurs questions qui ont commencé à être explorées dans cette thèse et pourraient être approfondies en perspective. En particulier, nos comparaisons statique / dynamique soulèvent la question plus générale du meilleur protocole pour accéder au ressenti que les usagers piétons auraient lors d'un déplacement dans une rue éclairée.

— Est-ce qu'un chemin de 15 m est suffisant pour juger les installations d'éclairage et obtenir des données d'une qualité suffisante au regard du ressenti des usagers piétons se déplaçant dans une rue éclairée ? ;
— Est-ce que réaliser une étude similaire avec des parcours de longueurs différentes modifie les évaluations subjectives de la qualité de l'éclairage ?

Deuxièmement, l'étude exploratoire avec l'évaluation d'un second point statique (en fin de parcours) pour une des trois scènes montre qu'il n'est pas évident de déterminer un point statique qui permet d'obtenir des jugements similaires entre l'évaluation dynamique (en marchant) et statique. Ainsi, de manière générale, pour un parcours donné existe-t-il une position statique équivalente (en terme de ressentis de la qualité de l'éclairage) ? Si oui, peut-on s'appuyer sur des mesures photométriques pour la déterminer ?

En ce qui concerne la validation des évaluations en environnement virtuel, d'autres chaînes d'acquisition / restitution pourraient être testées notamment en changeant l'algorithme de mise en correspondance tonale, en particulier pour les critères pour lesquels nos résultats sont mitigés, à savoir la visibilité perçue, la luminosité perçue et l'ambiance colorée perçue. Par ailleurs, il pourrait être intéressant d'étudier ces chaînes d'acquisition / restitution avec des casques de réalité virtuelle, ou d'introduire d'autres stimulations sensorielles, par exemple en incorporant des stimuli auditifs pour explorer le degré d'immersion requis. Pour approfondir ce travail, il serait intéressant d'étudier

le lien entre immersion et reproduction physique, à savoir lorsque le dispositif d'affichage permet aux participants d'être suffisamment en immersion, comment est-il possible de dégrader la qualité de reproduction physique pour garantir des jugements subjectifs similaires ?

Enfin, dans le prolongement des résultats de la thèse et notamment de l'étude exploratoire sur l'impact des conditions lumineuses ambiantes, on peut se demander si en conditions incontrôlées (*e.g.* test psychovisuel en ligne) il est possible d'obtenir des jugements similaires sur les critères de qualité de l'éclairage, notamment liés à la satisfaction et au sentiment de sécurité.

6.3.4 Réflexion finale

Il reste nécessaire de préciser qu'une hypothèse implicite de ce travail - selon laquelle des images affichées plus fidèlement aux grandeurs physiques devraient engendrer une meilleure corrélation avec les évaluations *in situ* - n'a pas pu être confirmée de façon significative. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette observation : d'une part, la nature des questions posées était de niveau général (par exemple, l'appréciation de l'ambiance lumineuse plutôt que la comparaison directe d'une image affichée avec la scène réelle) ; d'autre part, il se pourrait qu'il faille s'appuyer sur des modèles d'apparence colorée, notamment dans le contexte des scènes urbaines nocturnes ; enfin, la caractérisation de la sensibilité spectrale individuelle des observateurs pourrait être un préalable requis avant de réaliser des expériences sur la perception des couleurs.

Des travaux complémentaires restent à engager afin d'élucider les critères de ressemblance à la réalité les plus pertinents pour l'affichage d'images sur écran, ce qui concerne notamment les scènes urbaines nocturnes.

Production scientifique

ACTI - Communications avec actes dans un congrès international

— Legrand, B. and Villa, C. (2025). Static and dynamic assessments of lighting quality : a field experiment. *CIE 2025 Midterm meeting* ;
— Villa, C., Peter, L., Legrand, B., Brémond, R., and Eymond, F. (2025). Investigating Facial Emotion Recognition : two field experiments. *CIE 2025 Midterm meeting* ;
— Da Costa, N., Dessenne, E., Legrand, B., and Labayrade, R. (2024). 6D to 3D Camera colorimetric calibration for assessment of lighting scenes. *IEEE Sustainable Smart Lighting Conference*. doi.org/10.1109/LS2463127.2024.10881745 ;
— Legrand, B. and Labayrade, R. (2023). Colorimetric calibration between RGB and LMSR spaces. *CIE 2023-30th quadrennial session of the CIE*. doi.org/10.25039/x50.2023.PO060.

Bibliographie

Abboushi, B., Fotios, S., and Miller, M. S. (2023). Predicting discomfort from glare with pedestrian-scale lighting : A comparison of candidate models using four independent datasets. *Lighting Research & Technology*, 56(3) :225–246.

Abd-Alhamid, F., Kent, M., Benett, C., Calautit, J., and Wu, Y. (2019). Developing an innovating method for visual perception evaluation in a physical-based virtual environment. *Building and Environment*, 162(106278) :1–13.

Aguerrebere, C., Delon, J., Gousseau, Y., and Musé, P. (2013). Simultaneous hdr image reconstruction and denoising for dynamic scenes. *IEEE/ICCP International Conference on Computational Photography*, 1 :1–11.

Akhavan, T. (2017). Applications of high dynamic range imaging - stereo matching and mesopic rendering.

Alexander, K. (2010). Information processing : Retinal adaptation. *Encyclopedia of the Eye*, 1 :379–386.

Ashraf, M., Mantiuk, R. K., Finlayson, G., Kucuk, A., and Wuerger, S. (2022). Colour difference formula for the photopic and mesopic vision incorporating cone and rod responses. *London imaging meeting*, pages 79–83.

Ashraf, M., Sztrajman, A., Hammou, D., and Mantiuk, R. (2024). Color calibration methods for oled displays. *Electronic Imaging*, 166 :1–7.

Atié, M. (2024). Perception des ambiances lumineuses d'architectures remarquables : analyse des impressions en situation réelle et à travers des photographies omnidirectionnelles dans un casque immersif.

Atié, M., Drozd, C., Vigier, T., and Siret, D. (2023). Method for evaluating fidelity of restitution of subjective impressions in immersive virtual reality in daylit interior scenes. *CIE 2023-30th quadrennial session of the CIE*, 1.

Atié, M., Vigier, T., Eymond, F., Drozd, C., Labayarade, R., Siret, D., and Sutter, Y. (2022). Towards a calibrated 360° stereoscopic hdr image dataset for architectural lighting studies. *PIES-ME '22 : Proceedings of the 1st workshop on Photorealistic Image and Environment Synthesis for Multimedia Experiments*, 1 :19–25.

Barlow, H. B. (1957). Purkinje shift and retinal noise. *Nature*, 179 :255–256.

Bishop, I. D. and Rohrmann, B. (2003). Subjective responses to simulated and real environments : a comparison. *Landscape and Urban Planning*, 65(4) :261–277.

Bookstein, F. (1989). Principal warps : Thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine inteligence*, 11(6) :567–585.

Bowmaker, J. K. and Dartnall, H. J. (1980). Visual pigments of rods and cones in a human retina. *The Journal of Physiology*, 298(1) :501–511.

Boyce, P. R. (2014). *Human Factors in Lighting*. CRC Press.

Brauers, J. and Aach, T. (2006). A color filter array based multispectral camera. In Group, G. C., editor, *12. Workshop Farbbildverarbeitung*, Ilmenau.

Buck, S. L., Knight, R. F., and Bechtold, J. (2000). Opponent-color models and the influence of rod signals on the loci of unique hues. *Vision Research*, 40 :3333–3344.

Bullough, J., Derlofske, J., Fay, C., and Dee, P. (2003). Discomfort glare from headlamps : Interactions among spectrum, control of gaze and background light level. *Society of Automative Engineers*, 01(0296).

Cao, D., Pokorny, J., Smith, V. C., and Zele, A. J. (2008). Rod contributions to color perception : Linear with rod contrast. *Vision Research*, 48(26) :2586–2592.

Cauwerts, C. (2013). Influence of presentation modes on visual perceptions of daylit spaces.

Cerda-Company, X., Parraga, C. A., and Otazu, X. (2018). Which tone-mapping operator is the best ? a comparative study of perceptual quality. *Journal of the Optical Society of America A*, 35(4) :626–638.

CEREMA (2025). Les chiffres de l'éclairage public : le cerema contribue à l'enquête de l'association française de l'eclairage. https://www.cerema.fr/fr/actualites/chiffres-eclairage-public-cerema-contribue-enquete. Consulté le : 08 octobre 2025.

Chamilothori, K., Wienold, J., and Andersen, M. (2019). Adequacy of immersive virtual reality for the perception of daylit spaces : Comparison of real and virtual environments. *LEUKOS*, 15(2-3) :203–226.

Chen, Y., Cui, Z., and Hao, L. (2019). Virtual reality in lighting research : Comparing physical and virtual lighting environments. *Lighting Research and Technology*, 51 :820–837.

CIE (1924). Cie : Commission internationale de l'Éclairage - proceedings, 1924. *CIE*.

CIE (2019a). *The basis of physical photometry, 3rd edition*. CIE 018 :2019.

CIE (2019b). *The basis of physical photometry, 3rd edition*. CIE 018 :2019.

CIE (2019c). *Colorimetry Part 1 : CIE standard colorimetric observers*. ISO/CIE 11664-1.

CIE (2019d). *Colorimetry Part 4 : 1976 L*a*b* Colour Space, 2nd Edition*. ISO/CIE 11664-4.

CIE (2019e). *Lighting for pedestrians : a summary of empirical data*. CIE 236 :2019.

CIE (2022). *Colorimetry Part 6 : CIEDE2000 Colour-Difference Formula*. ISO/CIE 11664-6.

Dacey, D. M. (2000). Parallel pathways for spectral coding in primate retina. *Annual Review of Neuroscience*, 23 :743–775.

de Boer, J. and Schreuder, D. (1967). Glare as a criterion for quality in street lighting. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 32 :117–135.

Debevec, P. E. and Malik, J. (1997). Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *SIGGRAPH*, 1 :369–378.

Deschaintre, V. (2019). Acquisition légère de matériaux par apprentissage profond.

Devlin, K., Chalmers, A., and Reinhard, E. (2006). Visual calibration and correction for ambient illumination. *ACM Transactions on Applied Perception*, 3(4) :429–452.

DiLaura, D., Houser, K., Mistrick, R., and Steffy, G. (2011). *The lighting handbook*. Illuminating Engineering Society.

Drago, F., Myszkowski, T., Annen, T., and Chiba, N. (2003). Adaptative logirthmic mapping for displaying high contrast scenes. *EUROGRAPHICS*, 22(3) :1–9.

Ebner, N., Riediger, M., and Lindenberger, U. (2010). Faces - a database of facial expressions in young, middle-aged, and older women and men : Development and validation. *Behavior Research Methods*, 42(1) :351–362.

Eloholma, M. and Halonen, L. (2006). New model for mesopic photometry and its application to road lighting. *LEUKOS*, 4(2) :263–293.

EN13201 (2015). European standard 13201-2 : Road lighting. part 2 : Performance requirements. *Brussels : CEN*.

Foster, D. H., Amano, K., Nascimento, S. M. C., and Foster, M. J. (2006). Frequency of metamerism in natural scenes. *Journal of the Optical Society of America A*, 23(10) :2359–2372.

Fotios, S., Castelon, H., Cheal, C., and Yang, B. (2015). Investigating the chromatic contribution to recognition of facial expression. *Lighting Research and Technology*, 49 :243–258.

Fotios, S. and Johansson, M. (2019). Appraising the intention of other people : Ecological validity and procedures for investigating effects of lighting for pedestrians. *Lighting Research & Technology*, 51 :111–130.

Genetten, K. D. (1993). Rgb to cmyk conversion using 3-d barycentric interpolation. *Device-Independent Color Imaging and Imaging System Integration*, 1909 :116–126.

Gordon, J. and Holub, R. (1993). On the use of linear transformations for scanner calibration. *Color Research & Application*, 18(3) :218–219.

Guild, J. (1931). The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical transactions of the royal society of London A*, 230 :681–693.

Haans, A. and de Kort, Y. A. W. (2012). Light distribution in dynamic street lighting : Two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape. *Journal of Environmental Psychology*, 32 :342–352.

Haneishi, H., Hirao, T., Shimazu, A., and Miyake, Y. (1995). Colorimetric precision in scanner calibration using matrices. *Color and Imaging Conference*, 3 :106–108.

Hankins, M. W., Peirson, S. N., and Foster, R. G. (2008). Melanopsin : an exciting photopigment. *TRENDS in Neurosciences*, 31(1) :27–36.

Hao, X., Zhang, X., Du, J., Wang, M., and Zhang, Y. (2022). Pedestrians' psychological preferences for urban street lighting with different color temperatures. *Frontiers in Psychology*.

Higuera-Trujillo, J. L., Maldonado, L.-T., and Llinares Millan, C. (2017). Psychological and physiological human responses to simulated and real environments : A comparison between photographs, 360 panoramas, and virtual reality. *Applied Ergonomics*, 65 :398–409.

Hiraoka, T., Hoshi, S., Okamoto, Y., Okamoto, F., and Oshika, T. (2015). Mesopic functional visual acuity in normal subjects. *PLoS ONE*, 10(7).

Hodgers, A. (2025). Site web de "la nuit est belle". https://www.lanuitestbelle.org/extinction-quotidienne/. Consulté le : 14 mars 2025.

Hong, G., Luo, M., and Rhodes, P. (2011). A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling. *Color Research & Application*, 26 :76–84.

Hung, P.-C. (1993). Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up table model and interpolations. *Journal of Electronic imaging*, 2 :53–61.

Imai, F. and Berns, R. (1999). Spectral estimation using trichromatic digital cameras. *International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives*, 1 :42–49.

ISO17321-2 (2012). Iso/tr 17321-2 : Technologie graphique et photographie - caractérisation de la couleur des appareils photonumériques. partie 2 : Considérations pour déterminer les transformations d'analyse de scène. *ISO/TR*.

ITU-R (2015). *Parameter values for the HDTV standards for production and international progamme exchange*. Recommendation ITU-R BT.709-6.

Johansson, M., Pedersen, E., Maleetipwan-Mattsson, P., Khun, L., and Laike, T. (2014). Perceived outdoor lighting quality (polq) : A lighting assessment tool. *Journal of Environmental Psychology*, 39 :14–21.

Kaiser, P. K. and Boynton, R. M. (1996). *Human Color Vision*. Optical Society of America.

Kirk, A. G. and O'Brien, J. F. (2011). Perceptually based tone mapping for low-light conditions. *ACM Transactions on Graphics*, 30(4) :42 :1–10.

Kline, P. (1999). *The hondbook of psychological testing*. London : Routledge.

Knight, C. (2010). Field surveys investigating the effect of lamp spectrum on the perception of safety and comfort at night. *Lighting Research & Technology*, 42(3) :313–330.

Kulikowski, J. (1976). Effective contrast constancy and linearity of contrast sensation. *Vision Research*, 16(12) :1419–1431.

Kusenbach, M. (2003). Street phenomenlogy : The go-along as ethnographic research tool. *Ethnography*, 4(3) :455–485.

Ledda, P., Chalmers, A., Troscianko, T., and Seetzen, H. (2005). Evaluation of tone mapping operators using a high dynamic range display. *ACM Transaction on Graphics*, 24(3) :640–648.

Levesque, M. and Dissanka, P. (2016). Measurment and modeling of the spectralon spectro-polarimetric bidirectional reflectance distribution function (brdf). *Report, Valcartier Research Center, Canada, November*.

Li, D., Liu, J., Yang, Y., Hou, F., Song, H., and Song, Y. (2023). Emotion recognition of subjects with hearing impairment based on fusion of facial expression and eeg topographic map. *IEEE Trans. on neural systems and rehabilitation engineering*, 31 :437–445.

Luo, M. (2024). The new preferred memory color (pmc) chart. *Color Research and Application*, 49(6) :564–576.

Luo, M. R., Cui, G., and Rigg, B. (2000). The development of the cie 2000 colour-difference formula :ciede2000. *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA*, 26(5) :340–350.

Luther, R. (1927). Aus dem gebiet der farbeizmetrik. *Zeitschrift für technische Physik*, 8 :540–558.

Mallet, S. and Comelli, C. (2017). Politiques d'éclairages public et transformations des espaces urbains : une approche critique. *Cybergeo*, 833.

Maloney, L. (1992). Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters. *Jones and Bartlett Publishers*, 1.

Malvar, H. S., He, L., and Cutler, R. (2004). High-quality linear interpolation for demosaicing of bayer-patterned color images. *IEEE International Conference on Acouostics, Speech, and Signal Processing*, (485).

Mantiuk, R., Ashraf, M., and Chapiro, A. (2022). stelacsf - a unified model of contrast sensitivity as the function of spatio-temporal frequency, eccentricity, luminance and area. *ACM Transactions on Graphics*, 44(4-145) :1–16.

Mantiuk, R., Daly, S., and Kerofsky, L. (2008). Display adaptive tone mapping. *ACM SIGGRAPH*, 1(68) :1–10.

Mao, Y. and Fotios, S. (2022). Lighting for pedestrians : Does multi-tasking affect the performance of typical pedestrian tasks ? *Lighting Research & Technology*, 54 :33–60.

Marchant, M., Zissis, G., Legal, L., and Dupuis, P. (2023). Attractivness of an ephemeroptera insect order towards artificial lights as function of cct. In *ALAN 2023*, Calgary University, Calgary,n Alberta, Canada.

Martinsons, C. and Hlayhel, R. (2022). A method to measure the spectral responsivity of a photometer using optical excitations with arbitrary spectral distributions. *Lighting Research and Technology*, 54 :311–328.

Menesatti, P., Angelini, C., Pallottino, F., Antonucci, F., Aguzzi, J., and Smoli, A. (2012). Rgb color calibration for quantitative image analysis : the 3d thin-plate spliine warping approach. *Sensors*, 12 :7063–7079.

Mikamo, M., Raytchev, B., Tamaki, T., and Kaneda, K. (2014). A tone reproduction operator for all luminance ranges considering human color perception. In Galin, E. and Wand, M., editors, *Eurographics 2014 - Short Papers*. The Eurographics Association.

Mokrzycki, W. S. and Tatol, M. (2011). Colour difference e - a survey. *Machine Graphic & Vision*, 20(4) :383–411.

Mornet, C. (2011). Reconstruction couleur sous faible éclairement pour des capteurs d'images en technologie cmos.

Morovic, P. and Haneishi, H. (2006). Estimating reflectances from multi-spectral camera responses. *Fourteenth Color Imaging Conference : Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications*, 1 :131–137.

Newsham, G., Cetegen, D., Veitch, J. A., and Whitehead, L. (2010). Comparing lighting quality evaluations of real scenes with those from high dynamic range and conventional images. *ACM Transactions on Applied Perception*, 7(2) :1–26.

Nieves, J. L., Valero, E. M., Hernandez-Andres, J., and Romero, J. (2007). Recovering fluorescent spectra with an rgb digital camera and color filters using different matrix factorizations. *Applied Optics*, 46(19) :4144–4154.

Parmar, M., Lansel, S., and Farell, J. (2012). An led-based lighting system for acquiring multispectral scenes. In VII, D. P., editor, *SPIE 8299*.

Pena-Garcia, A., Hurtado, A., and Aguilar-Luzon, M. C. (2015). Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. *Safety Science*, 78 :142–148.

Portnov, B. A., Saad, R., and Trop, T. (2021). Interactive scenario-based assessment approach of urban street lighting and its apllication to estimating energy saving benefits. *Energies*, 14(378) :1–16.

Provencio, I. and Warthen, D. M. (2012). Melanopsin, the photopigment of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Membrane Transport and Signaling*, 1(2) :113–237.

Rahm, J. and Johansson, M. (2016). Walking after dark - a systematic literature review of pedestrians' response to outdoor lighting. *Environmental Psychology Monographs*, 26.

Rahm, J. and Johansson, M. (2021). Assessment of outdoor lighting : Methods for capturing the pedestrian experience in the field. *Energies*, 14(4005).

Rea, M., Bullough, J., Freyssinier-Nova, J., and Bierman, M. (2004). A proposed unified system of photometry. *Lighting Research Technology*, 36(2) :85–111.

Rea, M. S. (2000). *IESNA Lighting Handbook*. IESNA Publishing.

Reinhard, E. (2002). Parameter estimation for photographic tone reproduction. *Journal of Graphics Tools*, 7(1) :45–51.

Reinhard, E., Heidrich, W., Debevec, P., Pattanaik, S., Ward, G., and Myszkowski, K. (2010). *High Dynamic Range Imaging*.

Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P., and Ferwerda, J. (2002). Photographic tone reproduction for digital images. *ACM Transaction on Graphics*, 21(3) :267–276.

Rezagholizadeh, M. (2016). Color measurement at low light levels.

Rham, J. and Johansson, M. (2018). Assessing the pedestrian response to urban outdoor lighting : A full-scale laboratory study. *PLOS One*, 1 :1–20.

Rockcastle, S., Danell, M., Calabrese, E., Sollom-Brotherton, G., Mahic, A., Van Den Wymelenberg, K., and Davis, R. (2021). Comparing perceptions of dimmable led lighting system between a real space and a virtual reality display. *Lighting Research and Technology*, 53(8) :701–725.

Sakar, R., Ronnberg, S., and Bollen, M. (2018). Light intensity behavior of led lamps within the thermal stabilization period. In *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Ljubljana, Slovenia.

Schubert, Thomas, R. H. F. F. (2025). Igroup presence questionnaire - site. https://www.igroup.org/pq/ipq/download.php. Consulté le : 20 juin 2025.

Scorpio, M., Carleo, D., Gargiulo, M., Navarro, PC., S. Y., Sabet, P., Masullo, M., and Ciampi, G. (2023). A review of subjective assessments in virtual reality for lighting research. *Sustainability*, 15(7491) :1–25.

Sergienko, N. (2016). New mesopic phenomenon on color vision. *New Front Ophtalmol 2*.

Shin, J., Matsuki, N., Yaguchi, H., and Shioiri, S. (2004). A color appearance model applicable in mesopic vision. *Optical review*, 11(4) :272–278.

Shrestha, R. and Hardeberg, J. Y. (2013). Multispecral imaging using led illumination and an rgb camera. In for Imaging Science, S. and Technology, editors, *21st Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings*.

Shrestha, R. and Hardeberg, J. Y. (2014). Spectrogenic imaging : A novel approach to multispectral imaging in an uncontrolled environment. *Optics Express*, 22(8) :9123–9133.

Shrestha, R., Hardeberg, J. Y., and Mansouri, A. (2011). One-shot multispectral color imaging with a stereo camera. In VII, D. P., editor, *SPIE 7876*.

Stamps, A. E. (1990). Use of photographs to simulate environments : A meta-analysis. *Perceptual and Motor Skills*, 71(3) :907–913.

Stamps, A. E. (2010). Use of static and dynamic media to simulate environments : a meta-analysis. *Perceptual and Motor Skills*, 111(2) :355–364.

Stiebel, T., Koppers, S., Seltsam, P., and Merhof, D. (2018). Reconstructing spectral images from rgb-images using a convolutional neural network. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 1 :1061–1066.

Stiles, W. and Crawford, B. (1937). The effect of a glaring lightsource on extrafoveal vision. *Proceedings in Royal Society of London*, 122(B) :255–280.

Stockman, A. (2019). Cone fundamentals and ci standards. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 30 :87–93.

Thibaud, J. P. (2022). *Psychologie environnementale : 100 notions clés*. Dunod.

Trefzeger, M., Blascheck, T., Raschke, M., Hausmann, S., and Schlegel, T. (2018). A visual comparison of gaze behavior from pedestrians and cyclists. *ETRA : Eye Tracking Research and Applications*, (104) :1–5.

Trop, T., Tavory, S. S., and Portnov, A. (2023). Factors affecting pedestrians' perception of safety, comfort, and pleasantness induced by public space lighting : A systematic literature review. *Environment and Behavior*, 55 :3–46.

Uchida, T., Ayama, M., Akashi, Y., Hara, N., Kitano, T., Kodaira, Y., and Sakai, K. (2016). Adaptation luminance simulation for cie mesopic photometry system implementation. *Lighting Research and Technology*, 48(=) :14–25.

Valero, E., Nieves, J., Nascimento, S., Amano, K., and Foster, D. (2007). Recovering spectral data from natural scenes with an rgb digital camera and colored filters. *Color research and application*, 32(5) :352–360.

Varghese, D., Wanat, R., and Mantiuk, R. (2014). Colorimetric calibration of high dynamic range images with a colorchecker chart. *International Conference and SME Workshop on HDR imaging, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 4-5 March*, 1.

Viikari, M., Ekrias, A., Eloholma, M., and Halonen, L. (2008). Modeling spectral sensitivity at low light levels based on mesopic visual performance. *Clinical Ophthalmology*, 2(1) :173–185.

Viliunas, V., Vaitkevicius, H., Stanikunas, R., Vitta, P., Bliumas, R., Auskalnyte, A., Tuzikas, A., Petrulis, A., Dabasinskas, L., and Zukauskas, A. (2014). Subjective evaluation of luminance distribution for intelligent outdoor lighting. *Lighting Research & Technology*, 46 :421–433.

Villa, C., Bremond, R., and Saint-Jacques, E. (2017). Assessment of pedestrian discomfort glare from urban led lighting. *Lighting Research and Technology*, 49 :147–172.

Vos, J. (2003). Reflection on glare. *Lighting Research & Technology*, 35(2) :163–176.

Wanat, R. and Mantiuk, R. K. (2014). Simulating and compensating changes in appareance between day and night vision. *ACM Transactions on Graphics*, 33(147) :1–12.

Wandell, B. A. (1995). *Foundatations of Vision*. Sinauer Associates.

Ward, G. (2002). The radiance lighting simulation and rendering system. In IEEE, editor, *SIGGRAPH*, San Antonio, USA.

Watson, A. B. and Yellott, J. I. (2012). A unified formula for light-adapted pupil size. *Journal of Vision*, 12 :1–16.

Watson, P. (2021). Site web de l'université de cambridge. https://imaging.mrc-cbu.cam.ac.uk/statswiki/FAQ/effectSize. Consulté le : 02 juin 2025.

Wei, L., Bizjak, G., and Kobav, M. B. (2024). Evaluating the impact of road lighting on pedestrian reassurance through the day-dark approach. *Lighting Research and Technology*, XX :1–14.

Wen, Y.-C., Wen, S., Hsu, L., and Chi, S. (2022a). Irradiance independent spectrum reconstruction from camera signals using the interpolation method. *Sensors*, 22(8498) :1–35.

Wen, Y.-C., Wen, S., Hsu, L., and Chi, S. (2022b). Spectral reflectance recovery from the quadcolor camera signals using the interpolation and weighted principal component analysis methods. *Sensors*, 22(6288) :1–27.

Wright, W. D. (1929). A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Transactions of the Optical Society*, 30(4) :141–164.

Yang, B. and Fotios, S. (2015). Lighting and recognition of emotion conveyed by facial expressions. *Lighting Research and Technology*, 47 :964–975.

Ye, M., Zheng, S. Q., Wang, M. L., and Luo, M. R. (2017). The effect of dynamic correlated colour temperature changes on alertness and performance. *Lighting Research and Technology*, 50 :1070–1081.

Yoshida, A., Blanz, V., Myszkowski, K., and Seidel, H.-P. (2005). Perceptual evaluation of tone mapping operators with real-world sceness. In Vision, H. and X, E. I., editors, *SPIE 5666*.

Zaatour, R. (2021). Réduction de la haute dimensionnalité des images hyperspectrales pour l'étude des occupations de sol.

Chapitre 7

Annexes

7.1 Notions de géométrie

7.1.0.1 Angle solide

L'angle solide correspond à la généralisation de la notion d'angle plan (deux dimensions) dans l'espace (trois dimensions). Pour ce faire, et en se référant à la Figure 7.1 l'angle solide noté Ω d'une aire A observée en O et située à la distance $\frac{d}{2}$ de O est définie comme l'aire de la projection de la surface (S) sur une sphère de rayon $\frac{d}{2}$ et de centre O. L'unité de l'angle solide est le stéradian (sr) et est défini par :

$$\Omega = \frac{S}{(\frac{d}{2})^2} \qquad [sr] \tag{7.1}$$

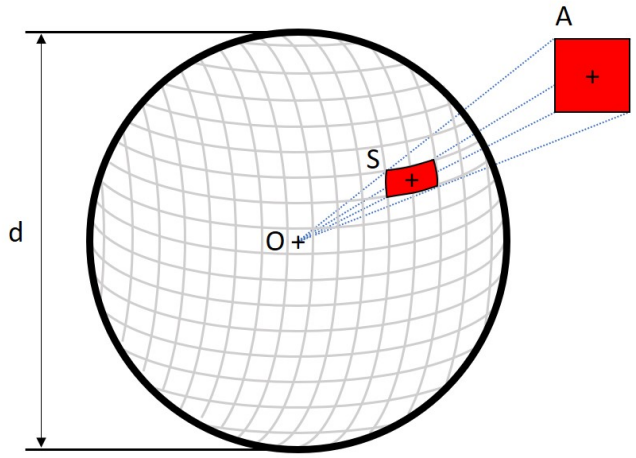


FIGURE 7.1 – Illustration d'un angle solide

En partant de la grandeur macroscopique Ω, il est possible de définir un angle solide élémentaire (illustré en Figure 7.2) associé à une surface orientée élémentaire $\vec{dS} = dS.\vec{n}$ (où : $\vec{n}$ correspond au vecteur unitaire de direction la normale à la surface) observée dans la direction portée par le vecteur unitaire $\vec{u}$ comme :

$$\begin{aligned} d\Omega &= \frac{< d\vec{S}, \vec{u} >}{(\frac{d}{2})^2} \\ &=< \vec{n}, \vec{u} > .\frac{dS}{(\frac{d}{2})^2} \\ &= cos(\alpha).\frac{dS}{(\frac{d}{2})^2} \qquad [sr] \end{aligned} \tag{7.2}$$

où : $< .,. >$ désigne le produit scalaire usuel ; α correspond à l'angle entre les vecteurs $\vec{n}$ et $\vec{u}$; $cos(\alpha) =< \vec{n}, \vec{u} >$.

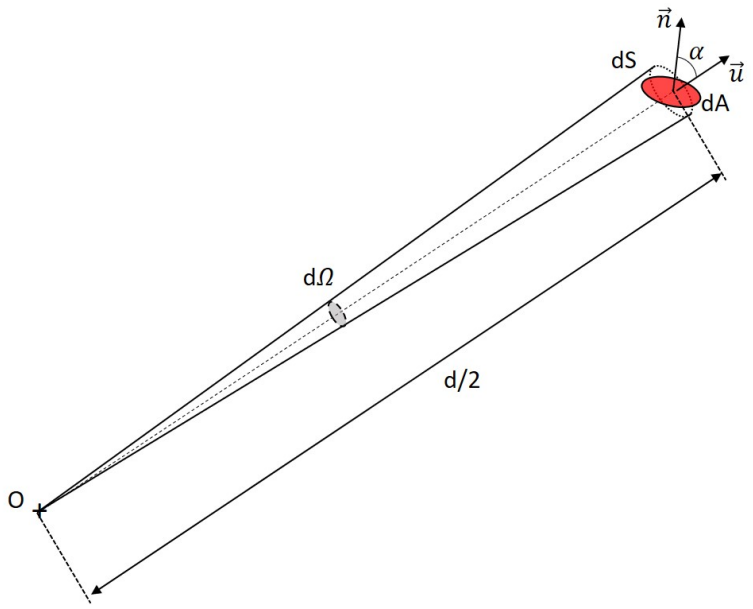


FIGURE 7.2 – Illustration d'un angle solide élémentaire

7.1.0.2 Étendue géométrique

L'étendue géométrique correspond au faisceau géométrique de rayons reliant une source lumineuse S et un récepteur R. L'étendue géométrique est définie à partir de la grandeur élémentaire noté d^2G, d'unité le mètre carré stéradian ($m^2.sr$). L'étendue géométrique élémentaire, définie dans le repère de la source, correspond à la quantité géométrique qui caractérise le faisceau lumineux élémentaire reliant une surface élémentaire de la source $\vec{dS} = dS.\vec{n_s}$ à une surface élémentaire du récepteur ($\vec{dR} = dR.\vec{n_r}$). L'étendue géométrique mesure l'aire apparente de la surface du récepteur observé depuis la source, ou inversement, et s'exprime en mètres carrés stéradians ($m^2.sr^{-1}$). La Figure 7.3 illustre l'étendue géométrique élémentaire qui peut s'écrire :

$$\begin{aligned} d^2G &= dS.cos(\alpha_s).d\Omega_s && \text{(dans le repère de la source)} \\ &= dR.cos(\alpha_r).d\Omega_r && \text{(dans le repère du récepteur)} \\ &= \frac{dS.dR.cos(\alpha_r).cos(\alpha_s)}{(\frac{d}{2})^2} \qquad [m^2.sr] \end{aligned} \tag{7.3}$$

où : α_s (resp. α_r) correspond à l'angle compris entre le vecteur unitaire qui relie les deux surfaces élémentaires orientées $\vec{dS}$ et $\vec{dR}$ et la normale $\vec{n_s}$ (resp. $\vec{n_r}$) ; $d\Omega_s$ (resp. $d\Omega_r$) correspond à l'angle solide élémentaire de la surface élémentaire de la source (resp. du récepteur) observé par le récepteur (resp. la source) ; $\frac{d}{2}$ correspond à la distance entre les deux surfaces élémentaires $\vec{dS}$ et $\vec{dR}$.

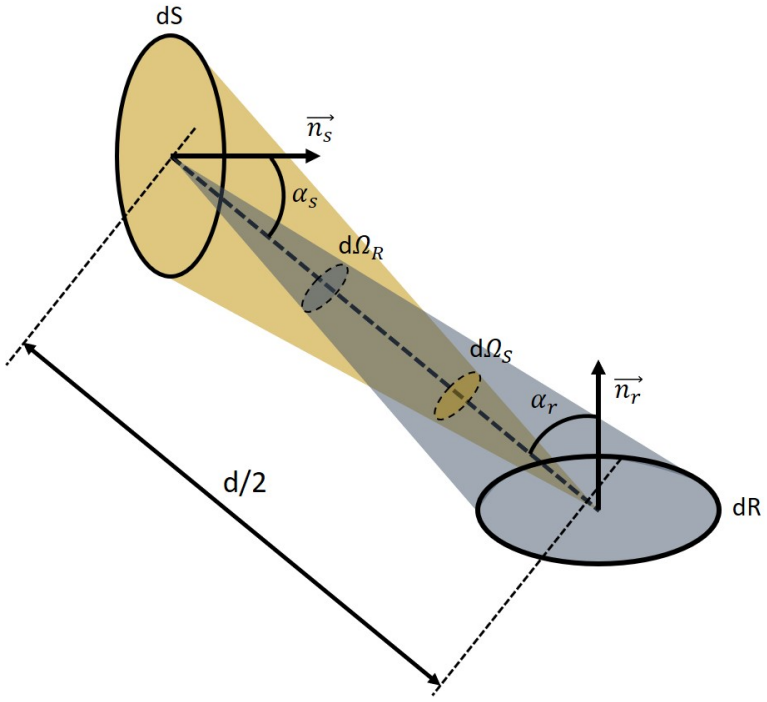


FIGURE 7.3 – Illustration de l'étendue géométrique élémentaire

7.2 Différence colorimétrique ΔE^*_{00}

Soit deux couleurs $[C_1] = [L^*_1, a^*_1, b^*_1]$ et $[C_2] = [L^*_2, a^*_2, b^*_2]$ décrites dans l'espace colorimétrique CIE-L*a*b*. La différence colorimétrique ΔE^*_{00} entre ces deux couleurs est définie par :

$$\Delta E^*_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C}\frac{\Delta H'}{k_H S_H}} \tag{7.4}$$

où : k_L, k_C et k_H sont trois paramètres libres permettant de pondérer les écarts de luminance (k_L), de chrominance (k_C) et de teinte (k_H) (généralement ces paramètres sont pris égaux à l'unité) ; le reste des termes est défini par :

$$\begin{aligned}
&\Delta L' = L^*_2 - L^*_1 \\
&C^*_1 = \sqrt{(a^*_1 + b^*_1)^2}, \quad C^*_2 = \sqrt{(a^*_2 + b^*_2)^2} \\
&\bar{L} = \frac{L^*_1 + L^*_2}{2}, \quad \bar{C} = \frac{C^*_1 + C^*_2}{2} \\
&a'_1 = a^*_1 + \frac{a^*_1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right), \quad a'_2 = a^*_2 + \frac{a^*_2}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right) \\
&C' = \frac{C'_1 + C'_2}{2}, \quad \Delta C' = C'_2 - C'_1, \quad C'_1 = \sqrt{a'^2_1 + b'^2_1}, \quad C'_2 = \sqrt{a'^2_2 + b'^2_2} \\
&h'_1 = \operatorname{atan2}(b'_1, a'_1) \bmod 360^\circ, \quad h'_2 = \operatorname{atan2}(b'_2, a'_2) \bmod 360^\circ \\
&\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2}\sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right), \quad \bar{H}' = \begin{cases} \frac{(h'_1 + h'_2 + 360^\circ)}{2}, & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \\ \frac{(h'_1 + h'_2)}{2}, & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \end{cases} \\
&T = 1 - 0.17\cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24\cos(2\bar{H}') + 0.32\cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20\cos(4\bar{H}' - 63^\circ) \\
&S_L = 1 + \frac{0.015(L-50)^2}{\sqrt{20 + (L-50)^2}}, \quad S_C = 1 + 0.045\bar{C}', \quad S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T \\
&R_T = -2\sqrt{\frac{\bar{C}'}{\bar{C}'^7 + 25^7}}\sin\left(60^\circ \cdot \exp\left[-\left(\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25^\circ}\right)^2\right]\right)
\end{aligned} \tag{7.5}$$

où : $(x, y) \mapsto atan2(x, y)$ correspond à la fonction arc tangente généralisée à deux vecteurs ($\forall (x, y) \in]-\infty; \infty[^2, atan2(x, y) = arg(x + iy)$, renvoi l'argument du complexe $x + iy$).

7.3 Description de l'algorithme de Reinhard et al. (2002)

L'algorithme de Reinhard et al. (2002) peut se décomposer en une partie globale et une partie locale. La partie globale de l'algorithme de Reinhard et al. (2002) vise à modifier la carte de luminance de l'image de façon à fixer la valeur seuil au-delà de laquelle un pixel RVB de l'image devra apparaître blanc (paramètre libre L_{white} ; *i.e.* $RVB_{8bits} = [255, 255, 255]$ est associé avec la luminance L_{white}) et applique un profil de compression entre les deux valeurs RVB (8 bits) [0, 0, 0] et [255, 255, 255] (paramètre libre a, aussi appelé *key-value*). La partie locale de l'algorithme local de Reinhard et al. (2002) utilise une différence de flous gaussiens sur la carte de luminance en introduisant un paramètre libre d'accentuation des contrastes locaux ϕ.

Dans l'algorithme de Reinhard et al. (2002), les calculs sont réalisés à partir d'une carte de luminance qui n'est généralement pas fournie avec l'image RVB. Cependant, lorsque l'on utilise un espace colorimétrique standard (e.g. sRGB ou Adobe-RGB) il est possible de calculer une carte de luminance. En effet, la recommandation ITU-R Recommendation 709 ITU-R (2015) permet d'estimer, dans le cas d'usage de l'espace colorimétrique sRGB, une carte de luminance à partir de l'image d'entrée (et sortie) par :

$$L = 0.2126.R_{lin} + 0.7152.V_{lin} + 0.0722.B_{lin} \tag{7.6}$$

où : R_{lin}, V_{lin} et B_{lin} sont les composantes RVB linéarisées. En effet, dans l'espace sRGB une étape de compression non-linéaire est opérée, dont l'opération inverse est définie par :

$$R_{lin} = \begin{cases} \frac{R}{12.92} & \text{si } R \leq 0.04045 \\ \\ (\frac{R+b}{1+b})^{2.4} & \text{sinon} \end{cases} \tag{7.7}$$

où : b vaut 0.055. De façon similaire il est possible de linéariser V et B.

Lorsqu'une image HDR est utilisée, l'étape de linéarisation n'est pas nécessaire car l'image HDR représente une capture physique de la scène. Ainsi, l'image est déjà linéaire par rapport aux luminances.

Finalement, l'algorithme global de Reinhard et al. (2002) modifie la luminance de l'image au pixel (x, y) $L(x, y)$ en une luminance cible $\tilde{L}(x, y)$ définie par :

$$\begin{cases} RVB(x,y) \propto L(x,y) \\ R\tilde{V}B_{TMO}(x,y) \propto \tilde{L}(x,y) \\ \tilde{L}(x,y) = \dfrac{l(x,y).(1 + \frac{l(x,y)}{L^2_{white}})}{1 + l(x,y)} \\ l(x,y) = a.\dfrac{L(x,y)}{\bar{L}} \\ \bar{L} = exp(\dfrac{1}{Nx.Ny}.\sum\limits_{(x,y)} log(\delta + L(x,y))) \end{cases} \tag{7.8}$$

où : $\bar{L}$ correspond à la moyenne logarithmique de la carte de luminance ; Nx et Ny correspondent aux dimensions de l'image suivant les axes « x » et « y » ; δ correspond à une constante positive de valeur absolue très peu élevée de façon à éviter les valeurs infinies que peut faire intervenir le logarithme.

De plus, à l'algorithme global de Reinhard et al. (2002) (voir équation 7.8) s'ajoute une correction locale de la luminance de façon à accentuer les contrastes locaux de l'image. Pour ce faire, l'algorithme local de Reinhard et al. (2002) utilise une différence de flous gaussiens sur la carte de luminance en introduisant un paramètre libre d'accentuation ϕ. Ainsi, cela peut s'apparenter à calculer un Laplacien sur la carte de luminance (davantage de détails sur la méthode sont disponibles dans l'article de Reinhard et al. (2002)).

Ainsi, il est possible de convertir les pixels RVB d'une image en une image compressée $R\tilde{V}B_{TMO}$ selon les étapes suivantes :

1. Si besoin, convertir l'image $(RVB(x,y))_{(x,y)}$ en une image $(RVB_{lin}(x,y))_{(x,y)}$ linéaire en fonction de la luminance ;
2. Si non fournie, déterminer une carte de luminance $((L(x,y))_{(x,y)})$ à partir des valeurs $(RVB_{lin}(x,y))_{(x,y)}$;
3. Appliquer un algorithme de conversion (e.g. Reinhard et al. (2002)) sur la carte de luminance initiale $(L(x,y))_{(x,y)}$ afin d'obtenir une carte de luminance cible $(\tilde{L}(x,y))_{(x,y)}$;
4. Convertir l'image $(RVB_{lin}(x,y))_{(x,y)}$ en une image $(R\tilde{V}B_{lin}(x,y))_{(x,y)}$ dont la carte de luminance vaut $(\tilde{L}(x,y))_{(x,y)}$ en utilisant la relation :

$$R\tilde{V}B_{lin}(x,y) = RVB_{lin}(x,y).\frac{\tilde{L}(x,y)}{(L(x,y)+\delta)} \tag{7.9}$$

   où : *delta* est constante positive de valeur absolue très peu élevée.
5. Au besoin, convertir l'image linéaire $(R\tilde{V}B_{lin}(x,y))_{(x,y)}$ en une image non-linéaire $(R\tilde{V}B(x,y))_{(x,y)}$.

7.4 Synthèse des travaux présentés dans l'état de l'art sur les comparaisons entre les évaluations en environnements réel et virtuel

Critère de qualité	Synthèse de la littérature
Perception de l'ambiance lumineuse	Il n'y a pas de consensus dans la littérature. Il est possible d'utiliser les environnements virtuels pour le recueil des températures de couleurs perçues.
Performance visuelle	Les résultats dépendent de la tâche de performance visuelle et de l'écran utilisé (résolution, gamme de luminance et gamut coloré).
Inconfort dû à l'éblouissement	Avant tout, il est bon de noter que dans la majorité des stimuli, les participants n'ont pas (ou quasiment pas) ressentis de l'inconfort dû à l'éblouissement. Pour les écrans HDR, il n'y a pas de consensus mais cela semble fonctionner partiellement. Pour une scène à forts contrastes (sombre + LEDs éblouissantes) (resp. scène sombre), l'inconfort est jugé moindre (resp. supérieur) en environnement virtuel qu'en réel.
Confort et satisfaction générale	Il est possible de recueillir les jugements subjectifs via l'usage d'environnement virtuel.
Sentiment de sécurité	Il n'y a que peu de travaux, ce qui ne permet pas d'en tirer une conclusion sur l'usage d'environnement virtuel pour le recueil de jugements subjectifs.
Impression de l'espace éclairé	Il est possible d'utiliser les environnements virtuels pour évaluer la complexité de la scène et la directivités des sources. Néanmoins, le caractère « enfermé » des lieux n'est pas retranscrit identiquement entre environnements réel et virtuel.

TABLE 7.1 – Synthèse de l'état de l'art sur les comparaisons entre évaluations en environnements réel et virtuel

7.5 Estimation des transmittances spectrales de la caméra Nikon D850

Pour estimer les transmittances spectrales (filtres « rouge », « vert » et « bleu ») de la caméra un outil de reconstruction spectrale est utilisé. L'outil vise à estimer la transmittance spectrale d'un filtre (« rouge », « vert » ou « bleu ») à partir d'observation de ce canal. En d'autres termes, l'outil vise à déterminer la quantité spectrale qui permet de résoudre le problème suivant :

$$\begin{cases} R_{rec}(k) = \int L_e(k,\lambda).T_R(\lambda).d\lambda, & k \in \{1,...,N\} \\ \\ min\{E((R_{rec}(k))_{k\in\{1,...,N\}}, (R_{obs}(k))_{k\in\{1,...,N\}}), \lambda \mapsto T_R(\lambda)\} \end{cases} \tag{7.10}$$

où : $R_{obs}(k)$ correspond à la valeur du canal R de la k-ième observation ; $L_e(k,\lambda)$ correspond à la k-ième luminance spectrique incidente à la caméra ; $\lambda \mapsto T_R$ correspond à la transmittance spectrale du filtre « rouge » que l'on souhaite déterminer ; $E(.,.)$ correspond à une erreur (*e.g.* erreur quadratique moyenne) ; $min\{x, \lambda \mapsto T_R(\lambda)\}$ signifie « trouver la valeur $\lambda \mapsto T_R(\lambda)$ qui minimise la quantité x ». Note : le problème est adapté de façon à obtenir des estimations des transmittances spectrales des filtres « vert » et « bleu ».

Ce type de problème peut être résolu de plusieurs façons notamment en fonction de l'échelle de précision recherché. Par exemple, résoudre le problème pour chaque nm compris entre 380 et 780 nm revient à trouver 401 valeurs (par transmittance spectrale) alors que résoudre le problème tous les 4 nm revient à trouver 100 valeurs. De plus, il est possible de conserver la même échelle de résolution (par exemple 380 à 780 nm par pas de 1 nm) en utilisant des outils de régularisation par exemple des splines. Les splines sont des courbes qui passent entre plusieurs nœuds (généralement uniformément répartis sur la plage de résolution souhaitée) qui ont des propriétés mathématiques intéressantes dont la possibilité d'effectuer des dérivées du second ordre. Par exemple, une luminance spectrique mesurée peut être estimée par des splines ayant 14 nœuds, voir Figure 7.4, ce qui revient à trouver 14 valeurs (les nœuds). L'usage de splines pour déterminer des données spectrales a déjà été utilisé dans la littérature (*e.g.* Kirk and O'Brien, 2011).

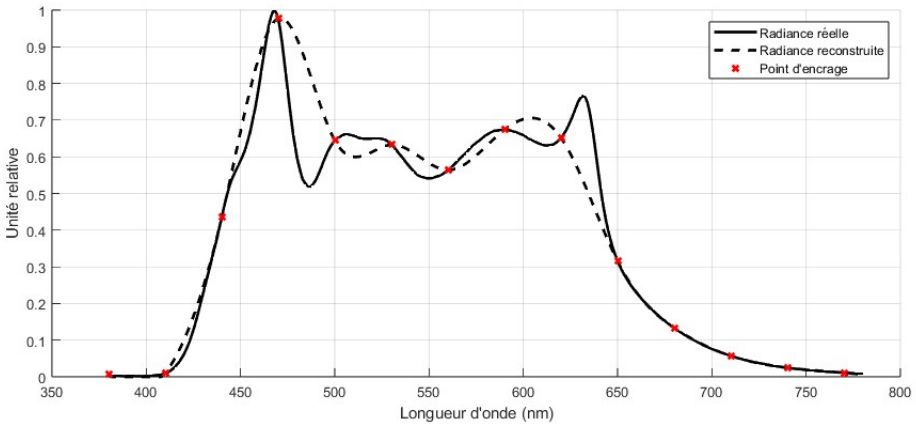


FIGURE 7.4 – Illustration d'estimation d'une luminance spectrique mesurée par des splines - 14 nœuds

Afin de déterminer les transmittances spectrales des filtres colorés de la caméra nous avons décidé de résoudre le problème (7.10) pour une échelle de résolution de 13 nm pour des valeurs comprises entre 380 et 770 nm en appliquant une régularisation par spline à 11 nœuds répartis régulièrement, ce qui fait qu'il est nécessaire de déterminer / estimer 11 valeurs.

Maintenant que la méthode de résolution est déterminée il est nécessaire d'acquérir des observations RVB dont les luminances spectriques incidentes à la caméra sont connues. Pour ce faire, des acquisitions de deux palettes de 256 patchs colorés éclairées par dix sources lumineuses sous cinq niveaux lumineux (voir Figures 7.5 et 7.6) ont été réalisées., en utilisant le même protocole (et outils de mesure) que celui détaillé en section 2.2.1.1 du chapitre 2. La caméra était configurée avec un ISO fixe (100) et une ouverture constante (f/4.5) dont les durées d'exposition étaient fixées à : 1/40, 1/20, 1/10, 1/5, 1/2, 0.77, 1.6, 3 et 6 secondes. Enfin, une image HDR est construite à partir des images LDR en utilisant l'algorithme de Reinhard et al. (2010). En tout 5120 acquisitions ont été réalisées (triplets RVB et luminances spectriques incidentes à la caméra connues).

Pour déterminer le minimum du problème (7.10), la fonction Matlab « lsqcurvefit » est sollicitée avec comme paramètre :

1. valeur initiale : le vecteur nul, c'est-à-dire que les points d'ancrage ont tous des valeurs nulles lors de l'initialisation ;
2. contrainte du vecteur : les points d'ancrage ne peuvent pas avoir des valeurs inférieures à zéro ;
3. algorithme de recherche du minimum : algorithme à régions de confiance ;
4. erreur minimisée : différence quadratique (distance euclidienne).

Les résultats obtenus lors des reconstructions spectrales permettant de fournir les transmittances spectrales des filtres « rouge », « vert » et « bleu » (F_R, F_V et F_B) sont fournis en Figure 7.7.

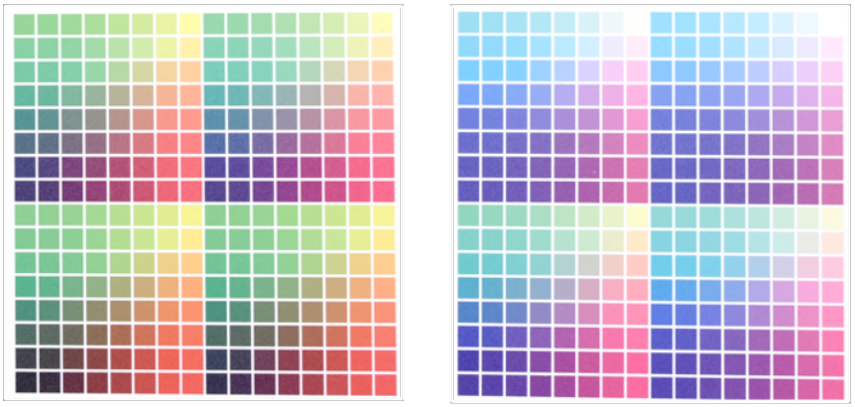
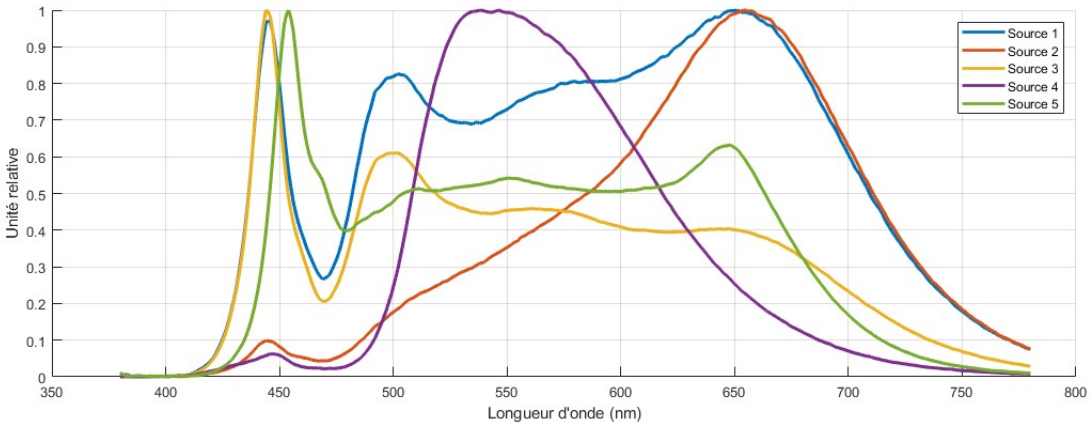
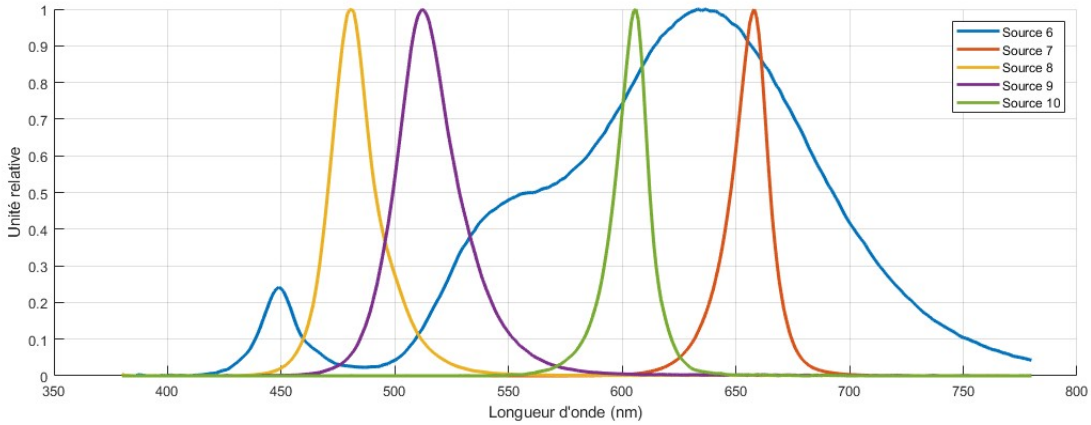


FIGURE 7.5 – Palettes de patchs colorés utilisées lors de la création du jeu de données servant à la caractérisation des transmittances spectrales des filtres colorés de la caméra



(a) Sources 1 à 5



(b) Sources 6 à 10

FIGURE 7.6 – Sources utilisées lors de l'acquisition des données qui ont servi à l'estimation des transmittances spectrales de la caméra en utilisant l'outil de reconstruction spectrale

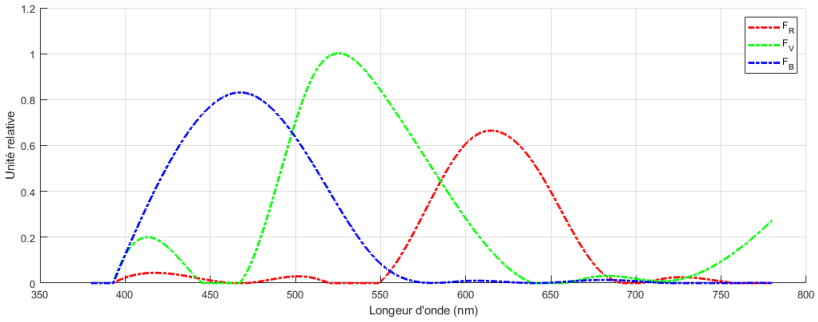


FIGURE 7.7 – Transmittances spectrales de la caméra estimées en utilisant la méthode de reconstruction spectrale

Afin de consolider ce résultat, d'autres acquisitions ont été réalisées à l'aide d'un monochromateur (modèle Cornerstone 130 (200 - 1600 nm, FWHM = 20 nm) équipé d'une lampe Hg-Xénon 200 W) de façon à estimer avec une autre méthode les transmittances spectrales de la caméra. Les acquisitions sont réalisées en utilisant le protocole suivant :

1. un matériau type Spectralon est disposé de façon à être éclairé par la source fournie en sortie du monochromateur dont la normale est confondue avec la direction du flux lumineux de la source ;
2. la caméra et le spectroradiomètre (modèle specbos spectraval 1501) sont mis d'une façon à être le symétrique de l'autre par rapport à la normale du matériau type Spectralon ;
3. puis plusieurs acquisitions sont réalisées (images LDR et mesures de luminance spectrique).

La caméra avait les mêmes paramètres que ceux utilisés pour former le jeu de données utilisé lors des estimations des transmittances en utilisant l'outil de reconstruction spectrale, à l'exception que les durées d'expositions étaient de : 3s, 13s et 30s. Les durées d'expositions sont nettement supérieures à celles utilisées lors des estimations par reconstructions spectrales car les niveaux énergétiques en jeu sont plus faibles dans cette expérience.

Finalement, pour estimer les transmittances spectrales des filtres le protocole suivant est mis en place :

1. pour chaque source quasi-monochromatique (indicée k) identifier la longueur d'onde $\lambda_{max}(k)$ où le maximum énergétique est atteint ;
2. pour la source k, déterminer la valeur du triplet $RVB(k)$ moyen capturé par la caméra au niveau du matériau type Spectralon éclairé par la source (qui correspond à la zone de mesure du spectroradiomètre) ;
3. fixer de manière arbitraire un triplet de référence RVB_{ref}, par exemple le triplet unitaire [1,1,1] ;
4. associer à chaque longueur d'onde maximale $\lambda_{max}(k)$ les valeurs de transmittances spectrales $F_R(\lambda_{max}(k)) = \frac{R(k)}{R_{ref}}$, $F_V(\lambda_{max}(k)) = \frac{V(k)}{V_{ref}}$ et $F_B(\lambda_{max}(k)) = \frac{B(k)}{B_{ref}}$.

Les courbes de transmittances spectrales ainsi déterminées en utilisant ce protocole sont tracées en Figure 7.8. De plus, en Figure 7.8 les courbes ont été lissées de façon à enlever le bruit qui est présent au sein de ces courbes de transmittances spectrales. Finalement, les transmittances spectrales obtenues en utilisant l'outil de reconstruction spectrale et les transmittances lissées obtenues à l'aide d'un monochromateur sont tracées en Figure 7.9. D'après la Figure 7.9 les courbes relatives aux transmittances spectrales des filtres « rouge », « vert » et « bleu » sont relativement similaires (RMSE de 4.6 %, 7.6 % et 8.1 %).

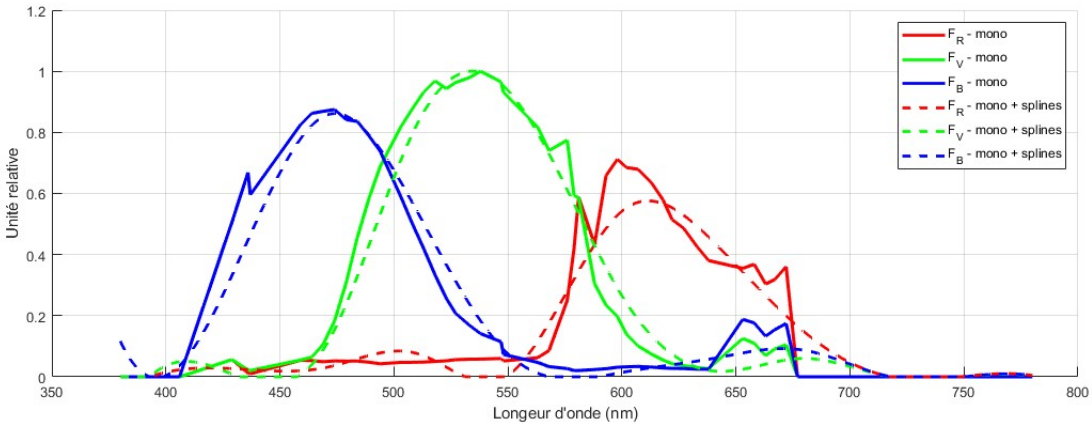


FIGURE 7.8 – Transmittances spectrales de la caméra estimées en utilisant le monochromateur (mono) et après lissage par splines (mono + splines)

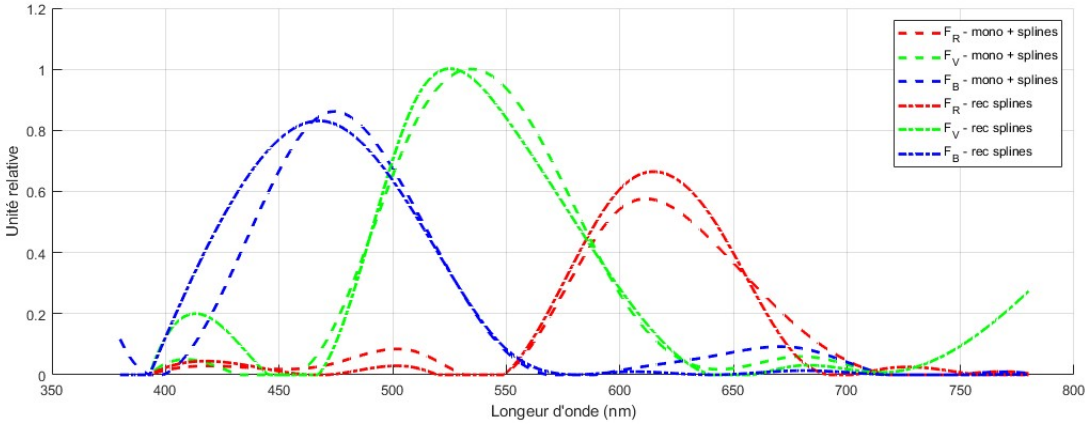


FIGURE 7.9 – Comparaison des transmittances spectrales de la caméra estimées en utilisant le monochromateur (mono + splines) et l'outil de reconstruction spectrale (rec splines)

7.6 Fonction matlab et exemple d'utilisation de la forme matricielle des splines cubiques de Hermite

La fonction Matlab (fournie dans cette Annexe) ayant le prototype [M_Hermite, wvl] = model_Spline_Hermite(pas) permet de déterminer la matrice des splines cubiques de Hermite (variable « M_Hermite ») ainsi que le domaine de résolution (en nm) (variable « wvl ») ayant des nœuds répartis régulièrement tous les « pas » nm entre 380 et 780 nm.

Un exemple d'utilisation de cette fonction est de lisser la courbe relative à l'efficacité lumineuse spectrale en vision photopique lorsque les données connues sont fournies tous les 30 nm (voir Figure 7.10 pour voir la figure fournie par le code) :

```
close all; clear variables; clc;

%% Chargement des valeurs initiales que
%% l'on souhaite interpoler
Y = [3.9e-05, 0.00012, 0.000396, 0.00121, ...
 0.004, 0.0116, 0.023, 0.038, 0.06, ...
 0.09098, 0.139, 0.208, 0.323, 0.503, ...
 0.71, 0.862, 0.954, 0.995, 0.995, 0.952, ...
 0.87, 0.757, 0.631, 0.503, 0.381, 0.265, ...
 0.175, 0.107, 0.061, 0.032, 0.017, 0.00821, ...
 0.004102, 0.002091, 0.001047, 0.00052, ...
 0.000249, 0.00012, 6.0e-05, 3.0e-05, 1.5e-05]';
% longueurs d'onde associees aux valeurs de Y
wvl = 380:10:780;

%% Lissage par splines pour un pas de 30 nm
pas = 30;
[M_Hermite, wvl_r] = model_Spline_Hermite(pas);
Y_splines = M_Hermite*Y(1:3:end);

%% Affichage
figure('Color','White'); hold on;
plot(wvl(1:3:end),Y(1:3:end),'rx','MarkerSize',10);
plot(wvl_r,Y_splines,'k--','LineWidth',1.5);
hold off;
xlabel("Longueur d'onde (en nm)");
ylabel('Unite relative');
grid on;
legend('Donnees de references', 'Lissage par splines',...
    'Location','northeast');
```

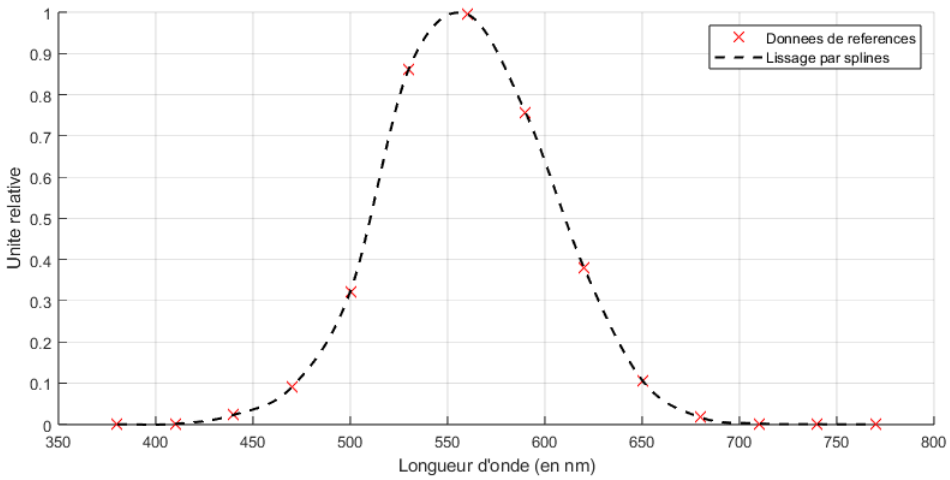
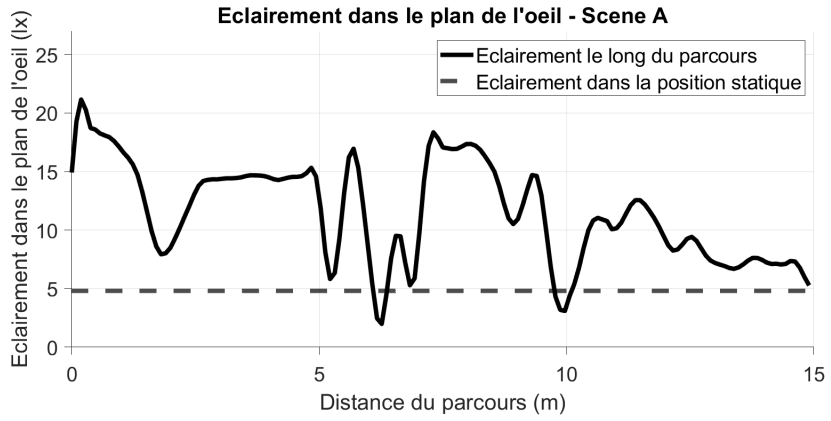


FIGURE 7.10 – Résultat de l'exemple d'utilisation du code de lissage par splines cubiques de Hermite

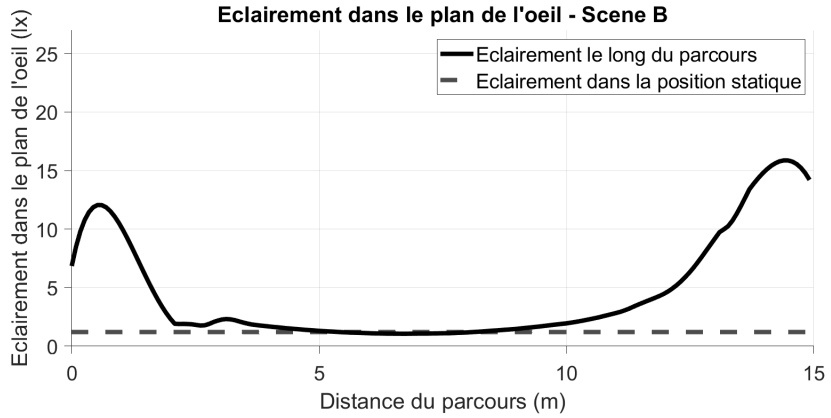
```
function [M_Hermite, wvl] = model_Spline_Hermite(pas)
        %% Definition des polynomes de Hermite
        h00 = @(t) 2*(t.^3) - (3.*t.*t) + 1;
        h10 = @(t) (t.^3) - (2*t.*t) + t;
        h01 = @(t) -2*(t.*t.*t) + (3.*t.*t);
        h11 = @(t) (t.^3) - (t.*t);

        %% Initialisation des variables
        wvl_resol = 380:pas:780;
        taille = length(wvl_resol);
        x = wvl_resol(1):wvl_resol(2);
        t = (x - wvl_resol(1))/pas;

        H00 = zeros((taille-1)*pas,taille);
        H01 = zeros((taille-1)*pas,taille);
        H10 = zeros((taille-1)*pas,(taille-1)*pas);
        H11 = zeros((taille-1)*pas,(taille-1)*pas);

        Z0 = zeros((taille-1)*pas,taille);
        Z1 = zeros((taille-1)*pas,taille);

        %% Definition des matrices relatives aux evaluations des
        %% polynomes de Hermite
        for k = 1:(taille-1)
                H00( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k) = h00(t(1:(end-1)))';
                H01( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k+1) = h01(t(1:(end-1)))';
                H10( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,((k-1)*pas +1):(k*pas)) = ...
                        repmat(h10(t(1:(end-1)))',1,pas);
                H11( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,((k-1)*pas +1):(k*pas)) = ...
                        repmat(h11(t(1:(end-1)))',1,pas);
        end
```

```
        %% Definition des matrices relatives aux calculs des
        %% derivees numeriques
        for k = 2:(taille-2)
                Z0( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k+1) = 1;
                Z0( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k-1) = -1;

                Z1( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k+2) = 1;
                Z1( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k) = -1;
        end

        % Gestion des bords
        k = 1;
        Z0( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k+1) = 2;
        Z0( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k) = -2;
        Z1( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k+2) = 1;
        Z1( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k) = -1;

        k = (taille-1);
        Z0( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k+1) = 1;
        Z0( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k-1) = -1;
        Z0 = Z0/(2*pas);
        Z1( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k+1) = 2;
        Z1( ((k-1)*pas +1):(k*pas) ,k) = -2;
        Z1 = Z1/(2*pas);

        wvl = interp1(1:401,380:780,1:size(H00,1));

        M_Hermite = H00 + H01 + H10*Z0 + H11*Z1;
end
```

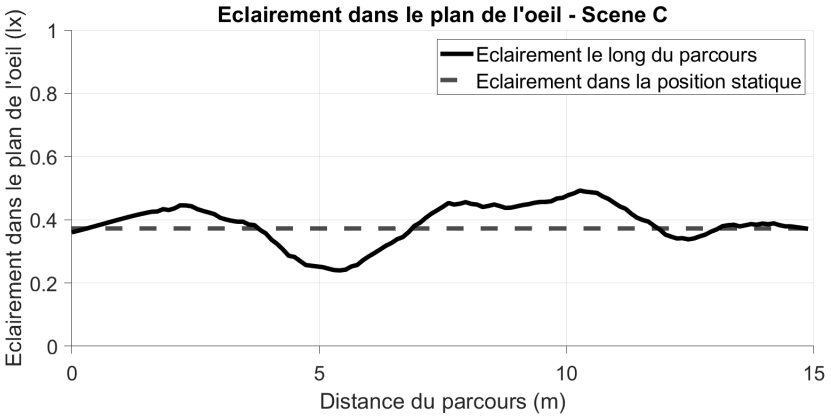
7.7 Éclairement dans le plan de l'œil le long des parcours - mesures sur site



(a) Scène A



(b) Scène B



(c) Scène C

FIGURE 7.11 – Éclairements verticaux dans le plan de l'œil le long du parcours de 15 m pour les scènes de l'expérience en environnement réel

7.8 Comparaison sur site incluant la position statique bis de la scène B

Pendant le recueil de jugements subjectifs sur site portant sur la qualité de l'éclairage, les participants ont évalué trois scènes (A, B et C), une fois en étant en position statique et une autre fois après avoir effectué un déplacement de 15 m dans la scène (dynamique). Cependant, pour une des scènes, de grandes variations photométriques sont observées entre la position d'évaluation statique et la fin du parcours (voir Figure 7.12 et section 4.2). Ainsi, lors de la passation de l'expérience nous avons invité les participants à effectuer une seconde évaluation en position statique à la fin du parcours de la scène B (statique bis). Afin de ne pas impacter le plan expérimental initial, l'évaluation en position statique bis a été réalisée en dernier (après les évaluations en position statique et dynamique de la scène B).

Pour analyser les résultats, lorsque les hypothèses sont validées (normalité : test de Kolmogorov-Smirnov ; sphéricité : test de Mauchly), des ANOVAs à mesures répétées sont réalisées (par items de qualité de l'éclairage) avec un facteur POSITION à trois modalités : « statique », « dynamique » et « statique bis ». Lorsque la sphéricité n'est pas validée, la correction de Greenhouse-Geisser est appliquée. Dans le cas où la condition normalité n'est pas remplie, un test non paramétrique de Friedman est réalisé. Puisque les données comportent un biais d'ordre, les résultats des analyses statiques sont à prendre avec précaution.

Les résultats des ANOVAs à mesures répétées et tests de Friedman, ainsi que les tests post-hoc de Tukey entre les modalités « statique bis » et « statique », et « statique bis » et « dynamique » sont présentés dans les Tables 7.2 et 7.3. Pour l'ensemble des items, un effet significatif est observé sur le facteur POSITION, à l'exception de l'item « J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord » (voir Table 7.3). Mise à part cet item, les tests post-hoc de Tukey révèle qu'il y a des différences significatives entre la position « statique bis » et « statique » ($p < 0.031$). Une différence significative est également observée entre les modalités « statique bis » et « dynamique » pour l'ensemble des items à l'exception des items « Agréable–Désagréable » ($t(42) = 1.81$, $p = 0.178$) et « Je me sens en : Sécurité–Insécurité » ($t(42) = 2.02$, $p = 0.120$). Pour l'item « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord », le test de Friedman et les tests post-hoc non paramétrique, mettent en avant qu'il y a une différence significative entre la position « statique bis » et les positions d'évaluation « statique » et « dynamique » (resp. $p < 0.001$ et $p < 0.001$).



(a) Scène B (b) Scène B bis

FIGURE 7.12 – Photographie de la scène statique bis en comparaison avec la scène statique de la scène B utilisée lors de l'expérience en environnement réel. La photographie statique bis a été prise à la fin du parcours de 15 m

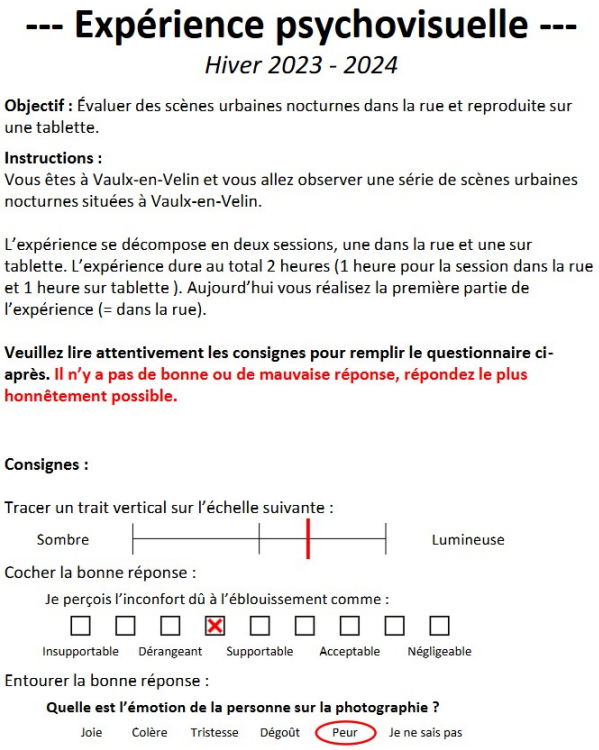
Item (0-100)	POSITION (Statique bis / Statique / Dynamique)	Statique bis (Sb) - Statique (S)	Statique bis (Sb) - Dynamique (D)	Moyenne des évaluations Sb/S/D
1) Sombre–Lumineux	**$F(2,84) = 67.2$** **$p < 0.001$** **$\eta_p^2 = 0.615$**	**$t(42) = -10.7$** **$p_{tukey} < 0.001$**	**$t(42) = -8.37$** **$p_{tukey} < 0.001$**	Sb = 77.6 S = 42.8 D = 52.1
2) Agréable–Désagréable	**$F(2,84) = 3.96$** **$p = 0.023$** **$\eta_p^2 = 0.086$**	**$t(42) = 2.63$** **$p_{tukey} = 0.031$**	$t(42) = 1.81$ $p_{tukey} = 0.178$	Sb = 36.7 S = 46.8 D = 42.6
3) Chaud–Froid	**$F(2,84) = 14.6$** **$p < 0.001$** **$\eta_p^2 = 0.258$**	**$t(42) = 3.74$** **$p_{tukey} = 0.002$**	**$t(42) = 4.83$** **$p_{tukey} < 0.001$**	Sb = 37.6 S = 47.3 D = 50.6
4) Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(2,84) = 12.8$** **$p < 0.001$** **$\eta_p^2 = 0.234$**	**$t(42) = -4.26$** **$p_{tukey} < 0.001$**	**$t(42) = -4.12$** **$p_{tukey} < 0.001$**	Sb = 90.1 S = 74.2 D = 73.0
5) Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$\chi^2(2) = 28.5$** **$p < 0.001$**	**$p < 0.001$**	**$p < 0.001$**	Sb = 44.3 S = 20.5 D = 22.1
6) Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant	**$F(2,84) = 13.3$** **$p < 0.001$** **$\eta_p^2 = 0.240$**	**$t(42) = -4.16$** **$p_{tukey} < 0.001$**	**$t(42) = -4.17$** **$p_{tukey} < 0.001$**	Sb = 73.9 S = 57.3 D = 58.2

TABLE 7.2 – Résultats des analyses statistiques hors items relatifs au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$)

Item (0-100)	POSITION (Statique bis / Statique / Dynamique)	Statique bis (Sb) - Statique (S)	Statique bis (Sb) - Dynamique (D)	Moyenne des évaluations Sb/S/D
7) Je me sens en : Sécurité–Insécurité	**$F(2,84) = 4.54$** **$p = 0.013$** **$\eta_p^2 = 0.098$**	**$t(42) = 2.88$** **$p_{tukey} = 0.017$**	$t(42) = 2.02$ $p_{tukey} = 0.120$	Sb = 34.8 S = 43.9 D = 42.1
8) Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(2,84) = 6.88$** **$p = 0.002$** **$\eta_p^2 = 0.141$**	**$t(42) = 2.66$** **$p_{tukey} = 0.029$**	**$t(42) = 3.24$** **$p_{tukey} = 0.007$**	Sb = 37.7 S = 44.1 D = 48.5
9) J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	**$F(1.7,73) = 16.4$** **$p_g < 0.001$*** **$\eta_p^2 = 0.281$**	**$t(42) = 4.49$** **$p_{tukey} < 0.001$**	**$t(42) = 5.12$** **$p_{tukey} < 0.001$**	Sb = 26.6 S = 35.9 D = 41.7
10) J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	$F(2,84) = 1.05$ $p = 0.355$ $\eta_p^2 = 0.024$	$t(42) = 1.18$ $p_{tukey} = 0.470$	$t(42) = 1.23$ $p_{tukey} = 0.441$	Sb = 27.0 S = 30.2 D = 31.0
Item fusionné « SENTIMENT _SECURITE »	**$F(2,84) = 8.95$** **$p < 0.001$** **$\eta_p^2 = 0.176$**	**$t(42) = 3.50$** **$p_{tukey} = 0.003$**	**$t(42) = 3.48$** **$p_{tukey} = 0.003$**	Sb = 29.5 S = 36.6 D = 39.0

TABLE 7.3 – Résultats de l'ANOVA à mesures répétées des items relatifs au sentiment de sécurité. * : après correction de Greenhouse-Geisser ; les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$)

7.9 Exemple de questionnaire utilisé lors de l'expérience en environnement réel



--- Expérience psychovisuelle ---

Hiver 2023 - 2024

Objectif : Évaluer des scènes urbaines nocturnes dans la rue et reproduite sur une tablette.

Instructions :
Vous êtes à Vaulx-en-Velin et vous allez observer une série de scènes urbaines nocturnes situées à Vaulx-en-Velin.

L'expérience se décompose en deux sessions, une dans la rue et une sur tablette. L'expérience dure au total 2 heures (1 heure pour la session dans la rue et 1 heure sur tablette). Aujourd'hui vous réalisez la première partie de l'expérience (= dans la rue).

Veuillez lire attentivement les consignes pour remplir le questionnaire ci-après. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse, répondez le plus honnêtement possible.

Consignes :

Tracer un trait vertical sur l'échelle suivante :

Sombre — Lumineuse

Cocher la bonne réponse :

Je perçois l'inconfort dû à l'éblouissement comme :

☐ ☐ ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Insupportable Dérangeant Supportable Acceptable Négligeable

Entourer la bonne réponse :

Quelle est l'émotion de la personne sur la photographie ?

Joie Colère Tristesse Dégoût (Peur) Je ne sais pas

FIGURE 7.13 – Questionnaire expérience en environnement réel - page de garde

FIGURE 7.14 – Questionnaire expérience en environnement réel - questionnaire principal pour une scène lors de l'évaluation en position statique avec les items de perceptions colorées et l'item de la tâche FER

FIGURE 7.15 – Questionnaire expérience en environnement réel - questionnaire principal pour une scène lors de l'évaluation en position dynamique avec les items de perceptions colorées et l'item de la tâche FER

--- Questionnaire final ---

Age : .....

Sexe : .....

Correction(s) visuelle(s) : .....

Généralement, lorsque je marche dans la rue, à Vaulx-en-Velin, quand il fait nuit :

Je me sens en :

Sécurité — Insécurité

Généralement, lorsque je marche dans la rue, à Vaulx-en-Velin, le jour :

Je me sens en :

Sécurité — Insécurité

Généralement, lorsque je marche dans la rue quand il fait nuit :

Je me sens en :

Sécurité — Insécurité

Généralement, lorsque je marche dans la rue le jour :

Je me sens en :

Sécurité — Insécurité

Je trouve que l'éclairage publique me permet de garantir un niveau de sécurité satisfaisant :

Pas du tout d'accord — Tout à fait d'accord

A remplir par l'examinateur :

Ordre des scènes : .....

Participant n° : .....

Groupe n° : .....

FIGURE 7.16 – Questionnaire expérience en environnement réel - questionnaire final

7.10 Statistiques descriptives supplémentaires - expérience en environnement réel

Dans cette annexe les moyennes et intervalles de confiance à 95 % par scène et pour les modes d'évaluations statique (S) et après avoir marché (dynamique - D) sont présentés pour l'ensemble des items évalués lors de l'expérience en environnement réel (Figure 7.17 à 7.26).

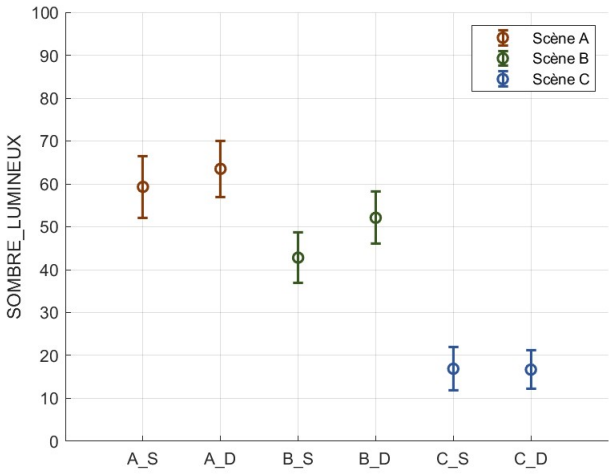


FIGURE 7.17 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Sombre–Lumineuse »

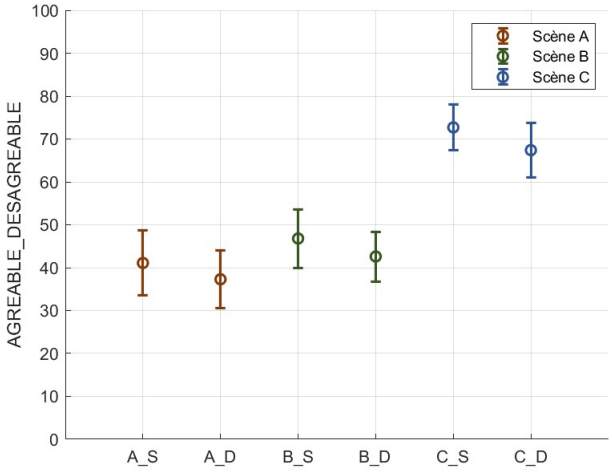


FIGURE 7.18 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Agréable–Désagréable »

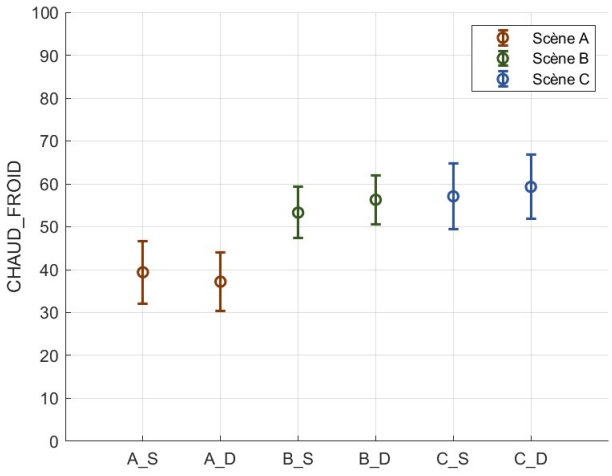


FIGURE 7.19 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Chaude–Froide »

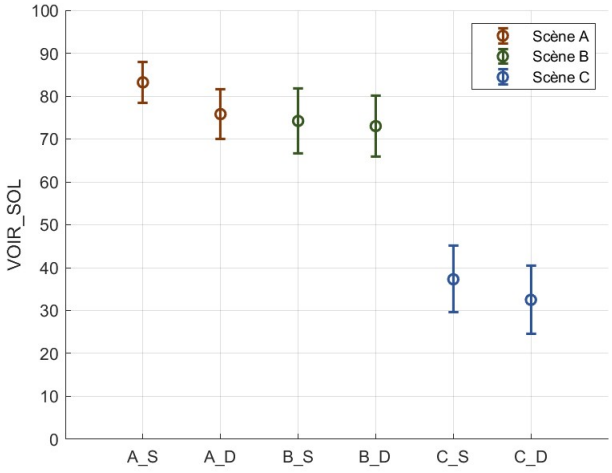


FIGURE 7.20 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

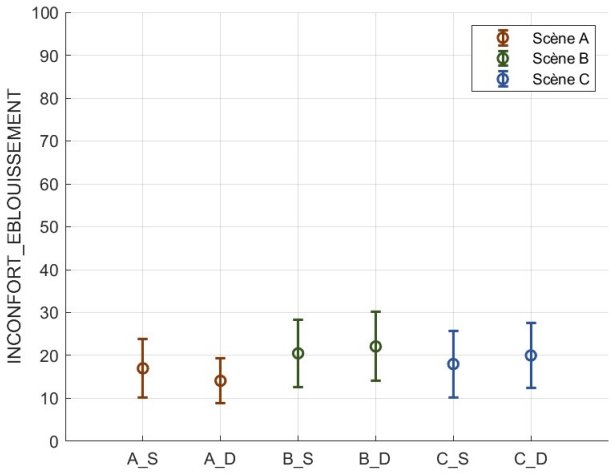


FIGURE 7.21 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

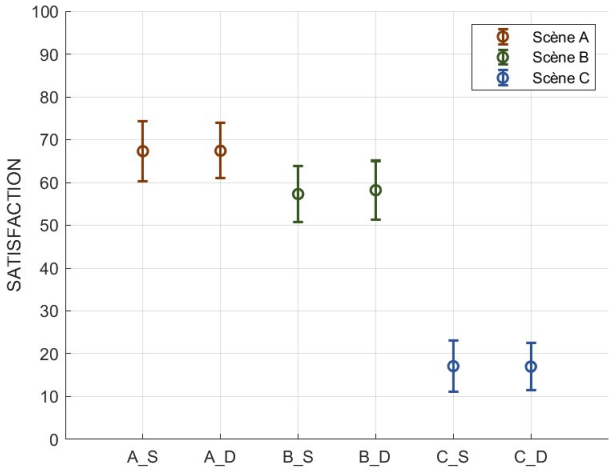


FIGURE 7.22 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Totalement satisfaisant »

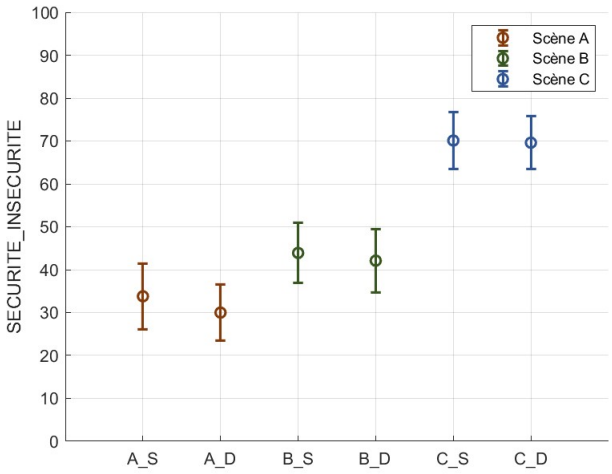


FIGURE 7.23 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité »

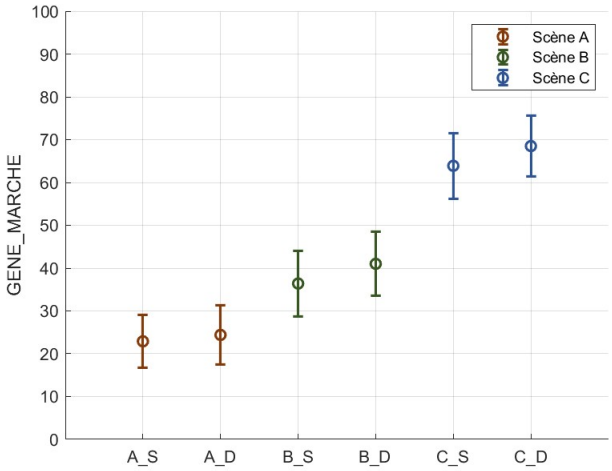


FIGURE 7.24 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

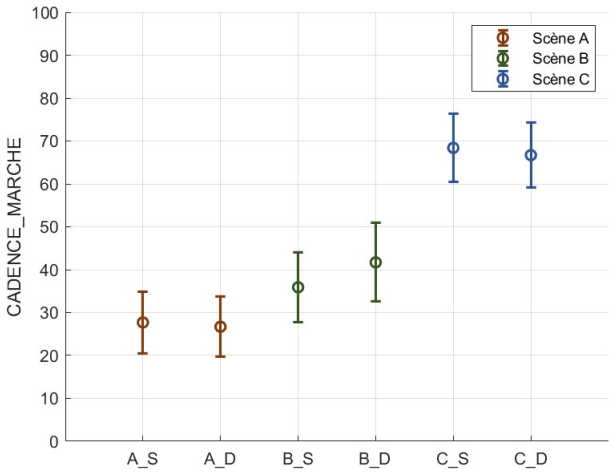


FIGURE 7.25 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

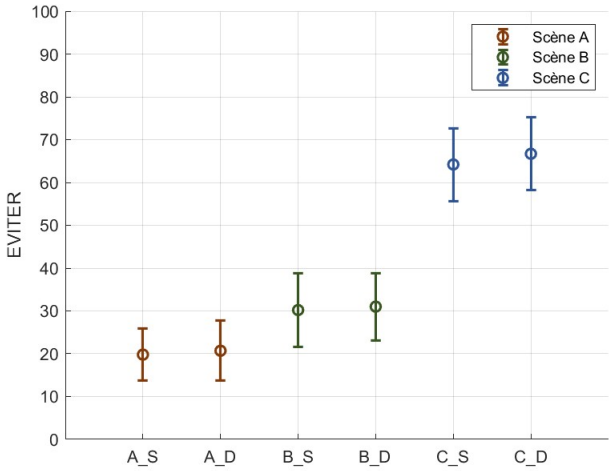


FIGURE 7.26 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

7.11 Méthode pour l'analyse des données de la tâche de perception des couleurs

Avant tout, il est utile de comprendre ce que les participants ont observé lors des évaluations en environnements réel et virtuel. Lors de l'expérience sur site, un matériau (mat) était positionné soit sur le sol soit sur l'herbe pour l'ensemble des scènes S (A , B et C), que l'on peut caractériser par la luminance spectrique moyenne incidente au niveau des yeux des participants $\lambda \mapsto \bar{S}_{mat,S}(\lambda)$ (pour le matériau mat de la scène S). De même, lors de l'expérience en environnement virtuel, la luminance spectrique moyenne incidente au niveau des yeux des participants provenait de la partie de l'image correspondante au sol ou à l'herbe (*i.e.* mat) dans les scènes A, B et C (*i.e.* S) en utilisant différents algorithmes de reproduction A (R, WH et WL), que l'on peut noter $\lambda \mapsto \bar{S}_{mat,S,A}(\lambda)$ (pour le matériau mat de la scène S reproduit par l'algorithme A).

Les participants devaient reporter les couleurs qu'ils percevaient sur une échelle colorée (voir Figure 7.27). Cette dernière peut être caractérisée par sa réflectance moyenne obtenue dans les configurations géométriques moyennes d'observation de la feuille, *i.e.* position de la source et de l'observateur relativement à la feuille de réponse, $(x, \lambda) \mapsto \bar{\rho}(x, \lambda)$ (où : x correspond à une couleur imprimée au niveau de la barre colorée). La barre colorée était éclairée soit par les sources présentes dans les scènes A, B et C (notées source 1, 2 et 3), pour les évaluations sur site, soit par la source du spot utilisé en environnement virtuel (noté source 4), que l'on peut noter $\lambda \mapsto \bar{Source_i}(\lambda)$ (pour la source i). Ainsi, pour chaque couleur x de la barre colorée, la luminance spectrique moyenne incidente au niveau des yeux des participants vaut $\lambda \mapsto \bar{\rho}(x, \lambda).\bar{Source_i}(\lambda)$.

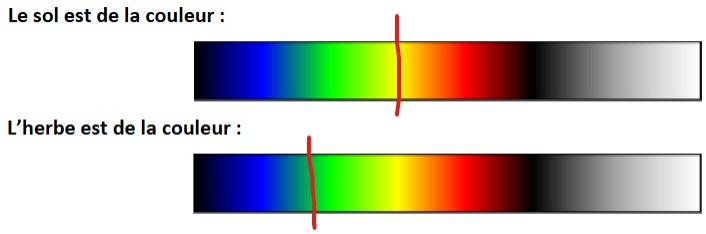


FIGURE 7.27 – Nuancier coloré utilisé pour la tâche de perception colorée du sol et de l'herbe. Les traits rouges illustrent les réponses d'un participant

En résumé, les luminances spectriques spectrales incidentes au niveau des yeux des participants lors de l'expérience en environnement réel sont les suivantes :

— $\lambda \mapsto \bar{S}_{mat,S}(\lambda)$ - provenant de la scène réelle ;

— $\lambda \mapsto \bar{\rho}(x, \lambda).\bar{Source_i}(\lambda)$ - provenant de la barre colorée éclairée dans la scène réelle.

Et lors de l'expérience en environnement virtuel :

— $\lambda \mapsto \bar{S}_{mat,S,A}(\lambda)$ - provenant de l'image ;

— $\lambda \mapsto \bar{\rho}(x, \lambda).\bar{Source_4}(\lambda)$ - provenant de la barre colorée éclairée par la source de l'environnement virtuel.

Les participants ont observé sur site la couleur du matériau mat dans la scène S $[C_{mat,S}]$ ou via des images en utilisant l'algorithme A $[C_{mat,S,A}]$, qu'ils ont reportée sur le nuancier coloré à la couleur $[C_{x,i}]$. Ainsi, par définition de la tâche, les participants ont reporté par métamérisme :

— $[C_{mat,S}] \equiv [C_{x,i}]$ - expérience en environnement réel ;

— $[C_{mat,S,A}] \equiv [C_{x,4}]$ - expérience en environnement virtuel.

Pour effectuer des comparaisons entre les couleurs perçues (*i.e.* les couleurs reportées sur la barre colorée), il est nécessaire de définir un espace de calcul (*e.g.* CIE-XYZ (2°) ou espace LMSR - voir section 1.1.5.5). Lors de l'expérience sur site, les participants étaient libres d'orienter leurs feuilles de réponse (pour mieux voir la barre colorée, surtout sur le site C). Ainsi, les participants ont observé la barre colorée sous des niveaux lumineux et d'éclairements différents qui n'ont pas été mesurés. Or, pour utiliser des espaces colorimétriques prenant en compte la vision mésopique, il est nécessaire de connaître le niveau d'éclairement (modèle de Shin et al. (2004)) ou de luminance (modèle de Cao et al. (2008)). Ainsi, nous proposons d'effectuer les calculs de cette tâche de perception colorée dans l'espace colorimétrique CIE-XYZ (2°). De plus, puisqu'il s'agit d'une tâche visant à déterminer les couleurs perçues, nous utiliserons les composantes chromatiques normalisées x et y qui sont définies par :

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \end{cases} \tag{7.11}$$

où : X, Y et Z correspondent aux coordonnées chromatiques d'une couleur $[C] = [X, Y, Z]$ dans l'espace CIE-XYZ (2°).

Maintenant que l'espace de calcul est fixé, il reste à déterminer ce que les participants ont vu par métamérisme. Pour ce faire, il est nécessaire de caractériser les grandeurs spectrales $\lambda \mapsto \bar{Source}_i(x, \lambda)$ et $(x, \lambda) \mapsto \bar{\rho}(x, \lambda)$. Il n'est pas nécessaire de déterminer ces grandeurs en absolu. En effet, puisque nous utilisons les grandeurs relatives x et y, si une grandeur spectrale est déterminée à un facteur multiplicatif prêt, ce dernier sera compensé dans le calcul de x et y (car apparaissant au numérateur et au dénominateur).

Pour obtenir les luminances spectriques des sources lumineuses, des mesures sont réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre et d'un matériau de type spectralon, ou via la case blanche du color checker 24 cases (voir section 2.2.1.1). De plus, les géométries complexes des environnements réel et virtuel ne permettent pas d'appliquer un modèle de réflectance simple, *i.e.* une source ponctuelle qui éclaire le matériau pour une configuration géométrique où la réflectance du matériau de référence est connue. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle les matériaux sont parfaitement diffusant est utilisée. Cela permet de faire l'hypothèse qu'une mesure spectrale réalisée avec un matériau de référence blanc, caractérise à une constante multiplicative prêt, la densité spectrale de la source dans le plan du matériau. Les mesures des densités spectrales normalisées des sources lumineuses qui éclairaient la barre colorée lors des expériences en environnements réel et virtuel sont représentées en Figure 7.28.

Concernant la détermination des réflectances spectrales des couleurs présentes dans la barre colorée ($(x, \lambda) \mapsto \bar{\rho}(x, \lambda)$), des mesures ponctuelles des couleurs de la barre colorée ont été réalisées. Pour ce faire, la barre colorée est décomposée en six sections : « bleu », « bleu–vert », « vert–orange », « orange–rouge », « rouge » et « gris » (voir Figure 7.29). Dans chacune des sections

colorées 16 consignes (RVB) régulières sont extraites, et ont été imprimées sous forme d'un patch rectangulaire (voir Figure 7.30) permettant de réaliser la mesure à l'aide d'un spectroradiomètre (specbos 1211UV-2). Les mesures ont été réalisées dans la même configuration géométrique et avec la même source lumineuse que l'expérience en environnement virtuel (voir section 5.2.1.2), en utilisant un protocole similaire à la section 2.2.1.1 mais en appliquant l'hypothèse selon laquelle la mesure radiométrique au niveau du matériau de type spectralon caractérise, à un facteur multiplicatif prêt, la densité spectrale de la source. Finalement, les réflectances spectrales de l'ensemble des couleurs présentes dans la barre colorée ($(x, \lambda) \mapsto \bar{\rho}(x, \lambda)$) sont déterminées en réalisant des interpolations linéaires entre deux mesures réalisées (ce qui est similaire à la méthode par interpolation tri-linéaire de Wen et al. (2022b)).

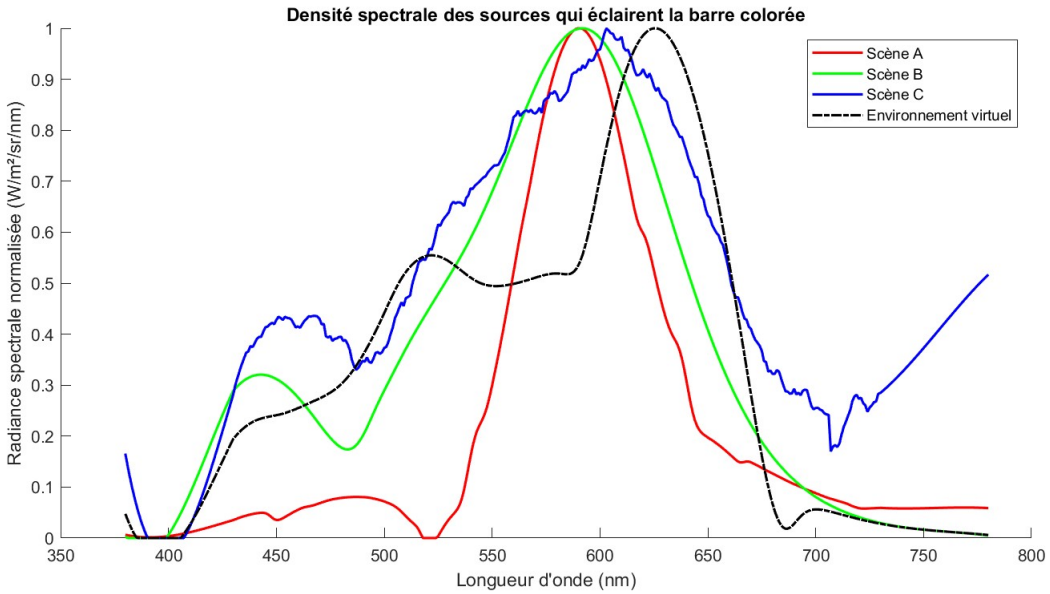


FIGURE 7.28 – Densités spectrales normalisées des sources lumineuses qui éclairaient la barre colorée. Note : les densités spectrales ont été lissées en utilisant un filtre de Savitzky-Golay à l'ordre 3 avec une fenêtre de 100 nm

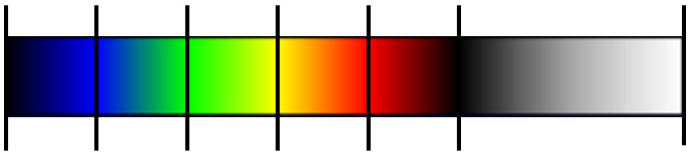


FIGURE 7.29 – Illustration des différentes sections colorées

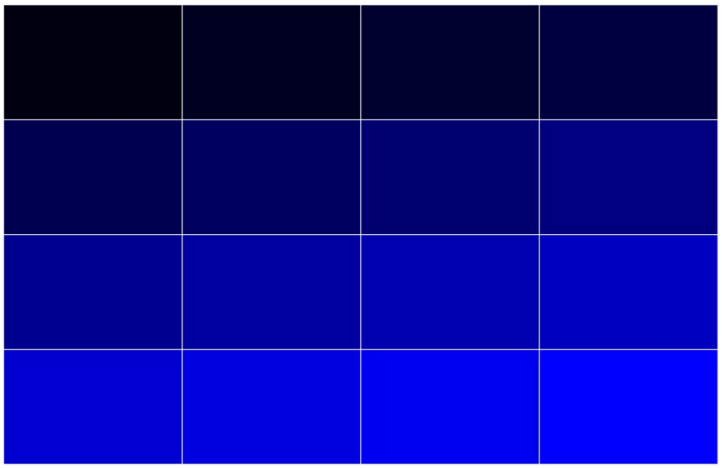


FIGURE 7.30 – Exemple de patchs rectangulaires imprimés sur une feuille pour réaliser les mesures correspondantes à la section « bleu » de la barre colorée

Les réponses des participants sont encodées, lors du traitement de données, comme le taux de complétion de la barre colorée (de gauche à droite) entre 0 et 100. Une évaluation valant 0 correspond au début (dans le sens de lecture usuel) et 100 pour la fin de la barre colorée. Ainsi, il est possible d'identifier les couleurs que chaque participant a perçu par métamérisme, et par conséquent la réflectance du papier pour lesdites couleurs identifiées. Finalement, connaissant les caractéristiques spectrales des sources lumineuses, il est possible de calculer leurs coordonnées colorimétriques, à un facteur multiplicatif prêt, dans l'espace CIE-XYZ (2°). Par conséquent, nous avons déterminé les coordonnées chromatiques normalisées x et y qui correspondent « aux couleurs » perçues par métamérisme par les participants, sur site, et lors de l'expérience en environnement virtuel. La Figure 7.31 illustre l'extraction des données colorimétriques de la perception du sol pour un participant.

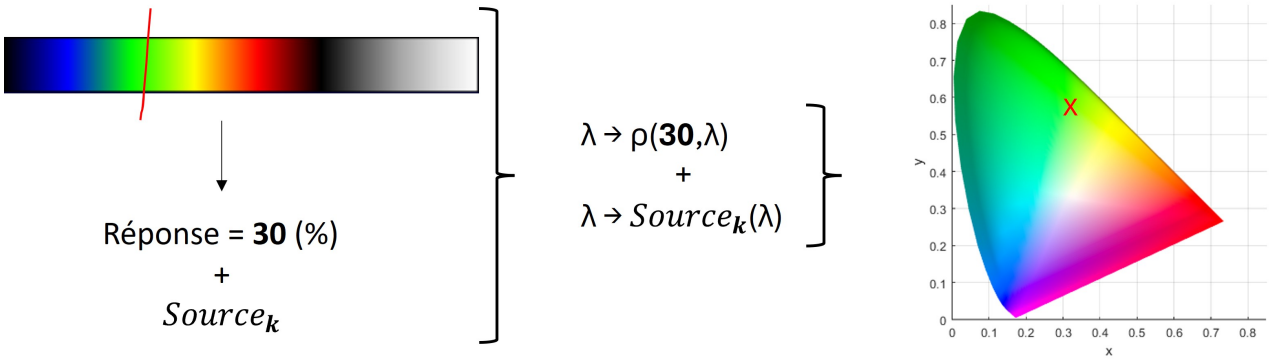


FIGURE 7.31 – Illustration de la conversion des données recueillies via la barre colorée en données colorimétriques x et y

7.12 Caractérisation en luminance de l'écran utilisé lors de l'expérience en environnement virtuel

Pour caractériser en luminance l'écran utilisé lors de l'expérience en environnement virtuel, des mesures spectrales sont réalisées dans le noir avec un spectroradiomètre specbos 1211UV-2 en incidence normale par rapport au centre de l'écran entre 380 nm et 1000 nm avec un pas d'échantillonnage de 1 nm pour un temps d'intégration correspondant à dix mesures. Puis à partir du logiciel du spectroradiomètre les valeurs de luminance sont extraites.

Des mesures de luminance d'un carré gris uniforme sont réalisées pour le niveau lumineux maximal de l'écran en mode LDR. Le carré gris uniforme est situé au milieu de l'écran et représente 1.93 % de la surface totale de l'écran permettant d'afficher le carré en mode LDR et HDR (le même carré uniforme sera utilisé pour la caractérisation de l'écran en fonctionnement HDR). En effet, comme la majorité des écrans HDR, l'écran utilisé en fonctionnement HDR ne peut pas délivrer suffisamment d'énergie pour avoir un fonctionnement HDR à son maximum lumineux pour l'ensemble de la surface de l'écran mais peut le faire pour des zones localisées. Finalement, les consignes du carré gris uniforme vont (sur 8 bits) : de 10 à 250 par pas de 10 et la valeur maximale 255. La courbe reliant les consignes avec les niveaux de luminance est tracée en Figure 7.32. Nous remarquons qu'un profil en gamma 2.2 permet de modéliser le profil consigne–luminance de l'écran (fonctionnement LDR) :

$$L = L_{max}(C/255)^{2.2} \tag{7.12}$$

où : L correspond à la luminance estimée par le modèle ; L_{max} correspond à la luminance maximale de l'écran (consigne valant 255) ; C correspond à la consigne grise [C, C, C] (triplet RVB) encodée sur 8 bits.

La valeur de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE - *root-mean-square error*) entre les valeurs de luminances mesurées (références) et celles estimées par le modèle en gamma 2.2 vaut 2.00 cd/m^2. De plus, l'erreur relative entre les luminances mesurées et celles estimées vaut 2.89 %.

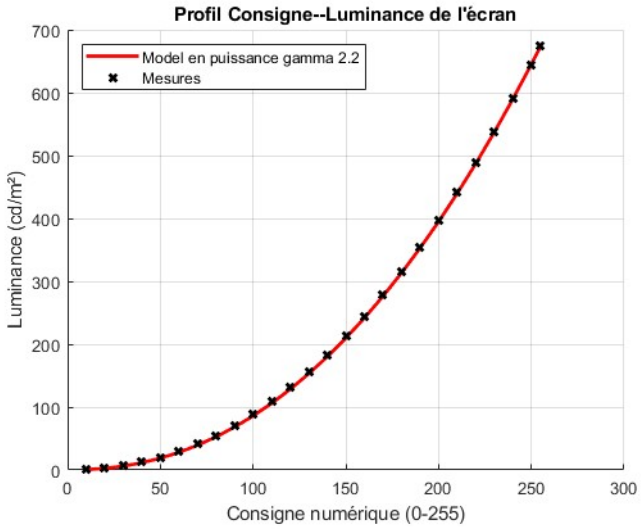


FIGURE 7.32 – Profil Consigne–Luminance de l'écran (mode LDR) utilisé lors des expériences en environnement virtuel

Pour caractériser en luminance l'écran en mode HDR (pour le réglage du niveau lumineux maximal de l'écran), les mesures de luminance sont réalisées pour les consignes suivantes (sur 10 bits) : 13, 26, 40, 52, 62, 72, 80, 88, 95, 102, 109, 115, 121, 126, 131, 137, 141, 146, 151, 155, 296, 467, 548, 637, 815, 853, 922, 1023. La courbe reliant les consignes avec les niveaux de luminance est tracés en Figure 7.33. La valeur de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les valeurs de luminances mesurées (références) et celles estimées par le modèle en gamma 2.2 vaut 18.53 cd/m^2. De plus, l'erreur relative entre les luminances mesurées et celles estimées vaut 23.7 %.

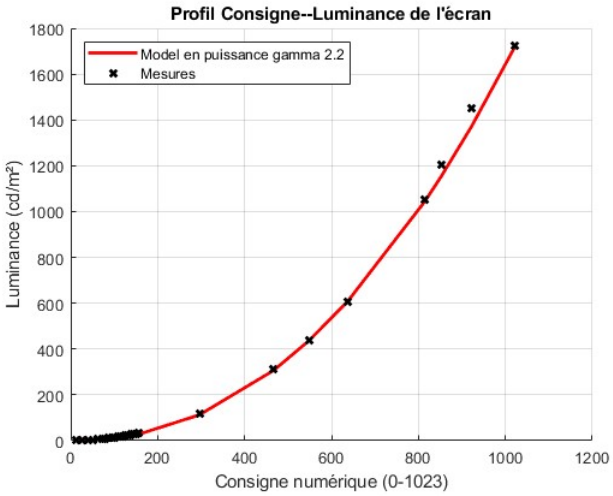


FIGURE 7.33 – Profil Consigne–Luminance de l'écran (mode HDR) utilisé lors des expériences en environnement virtuel

Finalement, les niveaux lumineux du point blanc (consigne : [255, 255, 255] - écran LDR sur 8 bits ; [1023, 1023, 1023] - écran HDR sur 10 bits) pour les différents réglages des niveaux lumineux de la dalle miniLED de l'écran sont fournis dans la Table 7.4.

Niveau de la dalle miniLED	Luminance maximale (cd/m^2)	
	Écran LDR	Écran HDR
1	1.032	6.158
2	2.123	11.27
3	4.269	20.62
4	8.714	38.23
5	**17.65**	70.16
6	35.63	129.3
7	72.88	235.9
8	146.6	422.3
9	176.4	508.5
10	211.8	609.5
11	253.8	729.7
12	302.6	879.1
13	362.2	1053
14	433.2	1269
15	518.8	1534
16	**673.7**	**1723**

TABLE 7.4 – Niveaux lumineux de la dalle miniLED de l'écran utilisé pour les expériences en environnement virtuel. Les valeurs en gras indiquent les réglages utilisés pour les expériences psychovisuelles (hors ajustement du réglage de l'écran par les participants lors de l'expérience sur les conditions lumineuses ambiantes)

7.13 Caractérisation colorimétrique de l'écran utilisé lors des expériences en environnement virtuel

La caractérisation colorimétrique de l'écran a été réalisée entre les espaces RVB de l'écran et l'espace CIE-XYZ (2°) ou LMSR (espace des cônes et bâtonnets). Pour ce faire des mesures spectrales (entre 380 nm et 1000 nm avec un pas d'échantillonnage de 1 nm) ont été réalisées dans le noir avec un spectroradiomètre specbos 1211UV-2 en incidence normale par rapport au centre de l'écran, pour un temps d'intégration correspondant à dix mesures. Puis les données provenant des espaces CIE-XYZ (2°) et LMSR sont estimées par calcul en utilisant les courbes colorimétriques associées à chaque espace dont les fonctions colorimétriques sont fournies dans le chapitre 1 en sections 1.1.1 et 1.1.5.2.

Les mesures de luminance ont été réalisées sur une image représentant un carré uniforme pour le niveau lumineux maximal de l'écran en mode HDR. Le carré uniforme est situé au milieu de l'écran et représente 3.41 % de la surface totale de l'écran permettant d'afficher le carré en mode HDR. Finalement, les consignes du carré uniforme sont des triplets RVB dont la consigne rouge, verte, bleue ou grise (*i.e.* même consigne R, V et B) vaut (sur 10 bits) : 41, 82, 123, 164, 205, 246, 286, 327, 368, 409, 450, 491, 532, 573, 614, 655, 696, 737, 777, 818, 859, 900, 941, 982, 1023. Les triplets RVB sont de la forme :

$$\begin{cases} [k,0,0] \text{ - carré rouge} \\ [0,k,0] \text{ - carré vert} \\ [0,0,k] \text{ - carré bleu} \\ [k,k,k] \text{ - carré gris} \end{cases} \tag{7.13}$$

où : k correspond à une valeur entière comprise entre 0 et 1023 (sur 10 bits).

Enfin, d'après l'Annexe 7.12 il est possible de linéariser les données RVB par rapport à la luminance en utilisant un profil en puissance $\gamma = 1/(2.2)$. Ainsi, ce profil est appliqué sur l'ensemble des canaux (rouge, vert et bleu) de façon à linéariser les données RVB. Finalement, un total de 100 triplets RVB (linéarisés) ainsi que leurs coordonnées associées dans les espaces CIE-XYZ (2°) et LMSR sont acquis pour réaliser les étalonnages colorimétriques de l'écran.

Concernant les étalonnages colorimétriques, d'après l'étude présentée dans le chapitre 2 en section 2.3, les outils d'étalonnage colorimétrique ont des comportements similaires dans le domaine des interpolations lors des étalonnages entre les espaces RVB (associé à une caméra) et CIE-XYZ (2°) ou LMSR. Ainsi, l'outil d'étalonnage colorimétrique par SVD est utilisé. Les relations des modèles d'étalonnage par SVD sont explicitées ci-après :

$$\begin{cases} X = 24.13 * R + 20.98 * V + 11.34 * B \\ Y = 12.44 * R + 42.74 * V + 4.384 * B \\ Z = 1.052 * R + 6.971 * V + 59.38 * B \end{cases} \tag{7.14}$$

$$\begin{cases} L = 17.08 * R + 41.48 * V + 4.496 * B \\ M = 5.351 * R + 42.24 * V + 6.636 * B \\ S = 0.5414 * R + 3.314 * V + 31.41 * B \\ Rods = 4.889 * R + 81.23 * V + 50.78 * B \end{cases} \tag{7.15}$$

où : R, V ou B correspond à une consigne linéaire du canal rouge, vert ou bleu.

7.14 Étude sur les méthodes d'estimation des cartes de luminances à partir d'images RVB dans le contexte de scènes ayant de grande gamme de dynamique et des niveaux lumineux photopiques et mésopiques

Afin d'identifier quelle méthode permet les meilleures estimations des luminances photopiques de scènes comportant une grande gamme de dynamique, avec des niveaux lumineux mésopiques et photopiques, une expérience a été mise en place. L'expérience vise à comparer plusieurs méthodes d'estimation de luminance avec des mesures physiques (spectroradiomètre specbos 1211UV-2 et caméra LMK 6-5L). Pour ce faire, la scène présentée en Figure 7.34 a été mise en place. Cette dernière est composée d'une palette de patchs colorés de 24 cases ainsi que de trois palettes de patchs colorés imprimées et éclairées par des niveaux lumineux différents. Deux sources lumineuses (sources « *Cool* » et « *Warm* », voir section 2.2.1.1) sont utilisées à trois niveaux de consignes différentes (100 %, 30 % et 10 %) afin de constituer un total de six scènes.



(a) $Texp = 10s$ (b) $Texp = 0.25s$

FIGURE 7.34 – Photographie du dispositif d'affichage - source « *Cool* »

Pour l'ensemble des scènes, les patchs colorés de la palette 24 cases sont mesurés à la fois au spectroradiomètre et via la caméra LMK. De plus, les mesures des trois palettes de patchs imprimées sont réalisées via la caméra LMK (les mesures au spectroradiomètre n'ont pas pu être réalisée dû au fait de la configuration qui faisait intervenir des ombres sur les patchs à mesurer). Finalement, des images HDR sont réalisées avec des durées d'exposition et ouverture identiques à celles réalisées lors des acquisitions sur site (voir section 5.2.1.3 - partie acquisition). Les données issues du spectroradiomètre et de la caméra LMK 6-5L sont acquises avec le même point de vue, et sont utilisées comme vérité terrain. Les valeurs des luminances des palettes de patchs colorés mesurées avec la caméra LMK sont fournis dans la Table 7.5.

Méthodes d'estimation de carte de luminance

Trois types de méthodes sont étudiées. Premièrement, il y a les outils d'étalonnage colorimétrique entre les espaces RVB de la caméra et CIE-XYZ (2°) où seule la composante en luminance est conservée. Les données qui servent de référence pour la réalisation des modèles d'étalonnage colorimétrique sont les données issues de la palette de patchs colorés 24 cases (Palette 0). Les méthodes SVD et par interpolation par splines, décrites dans le chapitre 2, sont aussi étudiés ici.

Deuxièmement, il y a les méthodes d'étalonnage automatique (*self-calibrated* ; *e.g.* Abd-Alhamid et al., 2019) qui vise à déterminer le comportement de la caméra RVB selon une CRF (*camera*

	Source « *Cool* »			Source « *Warm* »		
	100 %	30 %	10 %	100 %	30 %	10 %
Palette 0	282 - 12.44	84.8 - 3.74	27.2 - 1.19	207 - 9.04	62.5 - 2.73	20.6 - 0.90
Palette 1	304 - 82.2	91.2 - 24.8	29.3 - 6.78	224 - 62.7	67.1 - 18.8	22.2 - 6.16
Palette 2	2.74 - 0.44	0.83 - 0.13	0.26 - 0.04	1.96 - 0.32	0.59 - 0.10	0.20 - 0.03
Palette 3	1.24 - 0.18	0.37 - 0.06	0.12 - 0.01	0.90 - 0.13	0.27 - 0.04	0.09 - 0.01

TABLE 7.5 – Luminances des palettes de patchs colorées (max - min) en cd/m^2

response function) qui fournit une estimation de la luminance relative en fonction des valeurs RVB à partir des indices de lumination (*exposure value*) calculée automatiquement à partir des différentes images LDR. Dans notre cas, une image LDR se différencie des autres par sa durée d'exposition, ainsi l'indice de lumination est de la forme :

$$IL = \alpha.log(\Delta T_{exp}) \tag{7.16}$$

où : α étant un facteur qu'il n'est pas nécessaire de déterminer.

Enfin, il est nécessaire de fournir au moins une correspondance entre la valeur de la CRF et la luminance réelle, de façon à appliquer un facteur de mise à l'échelle passant d'une fonction en unité relative vers des luminances en de/m^2. Pour ce faire, nous utilisons soit le patch blanc ou noir (la méthode sera notée CRF_{blanc} ou CRF_{noir}) afin de déterminer le facteur de mise à l'échelle.

Finalement, un étalonnage a également été réalisé au laboratoire PICS-L de l'Université Gustave Eiffel avec une source étalon. Le protocole d'acquisition employé est décrit ci-après :

1. Placer les appareils dans la configuration géométrique décrite en Figure 7.35 ;
2. Fixer les paramètres de la caméra identiquement à ceux utilisés lors des acquisitions sur site d'une image LDR ;
3. Réaliser, pour une configuration lumineuse donnée, l'acquisition de la luminance avec un spectroradiomètre PR740 servant de référence et treize images LDR avec chaque temps d'exposition sur site ;
4. Répéter les étapes 2 et 3 autant de fois qu'il y a de conditions lumineuses.

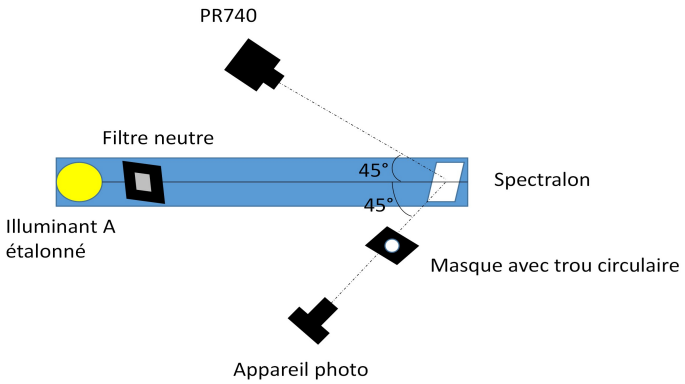


FIGURE 7.35 – Schéma du montage fourni dans le rapport du laboratoire PICS-L de l'Université Gustave Eiffel concernant le montage utilisé lors de la caractérisation de la caméra

Treize configurations lumineuses ont été mesurée avec une luminance sur le spectralon de 1.14 mcd/m^2 à 484 cd/m^2. Le niveau de gris (NDG) est estimé en fonction du triplet RVB à partir de la relation du standard sRGB :

$$NDG = 0.2126.(R - R_{off}) + 0.7152.(V - V_{off}) + 0.0722.(B - B_{off}) \tag{7.17}$$

où : R_{off} / V_{off} / B_{off} correspond à la valeur moyenne du canal R / V / B obtenue lors de la mesure à vide (illuminant éteint) ; R / V / B correspond à la valeur moyenne du canal R / V / B obtenue lors d'une mesure avec l'illuminant allumé.

À partir des données acquises, la relation d'étalonnage suivante à été obtenue :

$$L = (NDG/2199.5).\Delta T_{exp} \tag{7.18}$$

En utilisant les données acquises en laboratoire (celles qui ont servi à l'élaboration du modèle d'étalonnage) l'erreur relative moyenne est de 4%. Enfin, nous décidons de calculer la luminance d'un pixel comme la luminance moyenne obtenue par l'ensemble des pixels des images LDR en appliquant un profil de pondération triangulaire favorisant les valeurs proche de la consigne moyenne. Pour cette étude nous ferons référence à cette méthode d'estimation par « Étalonnage en laboratoire ».

Comparaisons entre les méthodes d'estimation et les mesures physiques

L'étude présentée dans cette section présente les comparaisons entre les méthodes d'estimation des luminances en fonction des domaines d'interpolation et extrapolation. C'est-à-dire que les estimations des luminances issues de la palette 1 sont séparées de celles des palettes 2 et 3. Les comparaisons entre les méthodes sont réalisées en utilisant la métrique de l'erreur relative moyenne.

Les Tables 7.6 et 7.7 fournissent les erreurs relatives moyennes (et les écarts-types) obtenues en fonction du domaine (interpolation / proche-interpolation et extrapolation dans les zones sombres).

Dans le domaine de l'interpolation / proche interpolation, les méthodes type étalonnage colorimétrique fournissent de meilleures estimations (erreur relative moyenne de 3.9 % pour la méthode SVD et 5.1 % par interpolation par splines) que les autres méthodes. De plus, la méthode par CRF avec étalonnage à partir du patch blanc et l'étalonnage en laboratoire fournissent des estimations acceptables (erreurs relatives moyennes inférieures à 20 %).

Dans le domaine de l'extrapolation dans les zones sombres, il n'y a que la méthode d'étalonnage en laboratoire qui fourni des estimations acceptables (18.4 %).

Limites, perspectives et conclusions

L'étude présentée dans cette annexe comporte de nombreuses limites. Premièrement, les estimations en luminance ne sont réalisées que pour une plage variant de 0.01 à 304 cd/m^2. Cependant, dans les scènes urbaines nocturnes il est possible d'avoir des luminances pouvant dépasser 10000 cd/m^2 ce qui n'est pas atteint avec notre étude. De plus, d'un point de vue méthodologique, nous n'avons étudié que les extrapolations dans les zones sombres pour les méthodes d'étalonnage colorimétrique et utilisant une CRF, c'est-à-dire que les données utilisées lors de la création des modèles correspondait à des matériaux plus éclairés que ceux utilisés lors des estimations ce qui peut être désavantageux pour les méthodes type étalonnage colorimétrique (voir les résultats en extrapolation fournie en chapitre 2 section 2.3.2.1). Enfin, il n'y a que deux sources lumineuses qui sont étudiées mais qu'en est-il d'autres sources (LED, autres illuminants) ? Concernant, les résultats obtenus par la méthode d'étalonnage en laboratoire de la caméra bien que l'étalonnage ait été faite en utilisant un type de source différent (illuminant A) de celles étudiées dans cette section (LED), il semblerait que l'étalonnage dans une plage plus grande que les mesures / estimations soient bénéfiques

(plage d'étalonnage : de 484 cd/m^2 à 1.14 mcd/m^2) puisque cela place la méthode en interpolation. Cependant l'impact de l'illuminant utilisé lors de l'étalonnage semble présent puisqu'ici des erreurs relatives moyennes de 12.4 % et 18.4 % sont observées alors qu'en laboratoire elles étaient en moyenne de 4 %.

En conclusion, au regard des résultats, la méthode fondée sur l'étalonnage en laboratoire de la caméra peut être utilisée afin d'estimer des luminances acceptables (erreur relative inférieure à 20 %) entre 0.01 et 304 cd/m^2. Cette méthode est donc appliquée pour estimer des cartes de luminances nécessaires aux algorithmes de mise en correspondance tonale utilisés pour restituer des scènes urbaines nocturnes dans notre dispositif d'affichage (voir chapitre 5).

	SVD	Splines	CRF_{blanc}	CRF_{noir}	Étalonnage en laboratoire
Cool 100	4.13 (3.20)	5.24 (3.86)	20.1 (7.85)	37 (12.9)	17.8 (9.80)
Cool 30	5.6 (4.84)	8.22 (6.11)	32 (9.14)	446 (45.0)	12.2 (8.60)
Cool 10	2.36 (4.84)	5.07 (3.52)	27.6 (12.7)	1200 (199)	14.8 (9.86)
Warm 100	5.35 (4.03)	3.67 (2.89)	24.4 (5.88)	21.5 (9.16)	10.1 (7.34)
Warm 30	2.88 (1.99)	3.27 (3.72)	15.9 (4.88)	608 (167)	9.70 (6.31)
Warm 10	2.95 (1.91)	5.05 (2.92)	39.1 (15.9)	1530 (441)	9.58 (8.11)
Moyenne :	3.9 %	5.1 %	26.5 %	640 %	12.4 %

TABLE 7.6 – Erreur relative moyenne (en %) (et écart-type) en fonction des méthodes d'estimation des luminances - interpolation / proche-interpolation. La référence étant les mesures effectuées avec le spectroradiomètre

	SVD	Splines	CRF_{blanc}	CRF_{noir}	Étalonnage en laboratoire
Cool 100	102 (99.2)	348 (257)	93.3 (10.7)	89.1 (17.1)	14.7 (9.71)
Cool 30	122 (128)	458 (315)	94.3 (6.74)	70.6 (23.9)	14.9 (11.1)
Cool 10	149 (169)	218 (217)	93.4 (4.06)	57 (44.3)	14.5 (9.83)
Warm 100	91.5 (88.4)	390 (274)	83.0 (23.9)	78.5 (24.3)	18.4 (13.7)
Warm 30	115 (116)	542 (359)	89.2 (11.3)	60.6 (25.0)	21.2 (13.6)
Warm 10	126 (135)	129 (103)	93.0 (3.97)	99.4 (83.3)	14.7 (9.71)
Moyenne :	118 %	348 %	91.0 %	75.9 %	18.4 %

TABLE 7.7 – Erreur relative moyenne (en %) (et écart-type) en fonction des méthodes d'estimation des luminances - extrapolation dans les zones sombres. La référence étant les mesures effectuées avec la caméra LMK 6-5L

7.15 Description de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014)

L'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) vise à transformer une image HDR d'une scène majoritairement sombre (en vision mésopique) pour l'afficher sur un écran plus lumineux à plus lumineux à partir d'une carte de luminance et des caractérisation de l'écran, en simulant les effet de la vision mésopique sur un image tone-mappée pour l'écran. La mise en correspondance tonale est centrée sur la perception des contrastes. Les étapes principales de l'algorithme sont les suivantes :

1. fournir une image HDR (notée I_{HDR}) ainsi qu'une carte de luminance (notée I_L) ;
2. fournir la caractérisation colorimétrique et la dynamique de reproduction du dispositif d'affichage ;
3. convertir la carte de luminance I_L en une autre carte de luminance qui prend en compte la dynamique du dispositif d'affichage via un algorithme de mise en correspondance tonale global et les effets relatifs à l'acuité visuelle via un algorithme local. La nouvelle carte de luminance est notée $\tilde{I}_L$;
4. en utilisant la carte de luminance $\tilde{I}_L$ appliquer le modèle de Cao et al. (2008) afin de convertir l'image I_{HDR} relative à la vision photopique en une image $\tilde{I}_{HDR}$ qui prend en compte les corrections colorimétriques liées à la vision mésopique ;
5. appliquer un modèle de saturation des couleurs sur l'image $\tilde{I}_{HDR}$ que l'on note $\tilde{\tilde{I}}_{HDR}$.

Pour la suite de cette section chaque étape clé de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) est détaillée et illustrée en utilisant une image initiale commune et dont la carte de luminance est estimée en appliquant le standard sRGB (voir Figure 7.36). La luminance maximale (resp. minimale) présente dans la scène capturée est fixée à $l_{max} = 1$ cd/m^2 (resp. $l_{min} = 0$ cd/m^2) de façon arbitraire afin de mettre en avant la correction colorimétrique du modèle de Cao et al. (2008). Pour les images servant d'exemple, la dynamique de restitution du dispositif d'affichage est fixée arbitrairement à $\delta = d_{max} - d_{min} = 200$ cd/m^2 avec $d_{min} = 0$ cd/m^2 et $d_{max} = 200$ cd/m^2. La caractérisation colorimétrique de l'écran est celle décrite en section 7.13. Finalement, les images sont calculées en utilisant les propriétés de l'écran utilisé lors de l'expérience en environnement virtuel (voir chapitre 5) et dans la même configuration que celle présentée en section 5.2.1.2. Enfin, les images sont toutes affichées avec un facteur multiplicatif qui compense les écarts énergétiques entre la luminance du dispositif d'affichage et celle présente sur site (pour l'exemple cela représente un facteur 200).



(a) Image initiale (b) Carte de luminance associée

FIGURE 7.36 – Image initiale avec sa carte de luminance estimée à partir du standard sRGB

Algorithme de mise en correspondance tonale global

L'objectif de l'algorithme de mise en correspondance tonale global est de trouver une fonction $Y \mapsto T(Y) = \tilde{Y}$ qui convertie une luminance que l'on souhaite afficher (Y) en une luminance qu'il est possible d'afficher sur l'écran $(\tilde{Y})$, tout en conservant des contrastes perceptifs similaires présents dans la scène initiale I_L et dans la scène qui sera reproduite dans le dispositif d'affichage $\tilde{I}_L$. L'algorithme se fonde sur la relation de Kulikowski (1976) (voir équation (7.19)) et vise à trouver une relation (T) qui permet d'atteindre le minimum global de la fonction objective fournie en équation (7.21). Plus de détails concernant cette fonction T peuvent être trouvés dans l'article de Wanat and Mantiuk (2014).

$$G - gt(l) = \tilde{G} - \tilde{gt}(l), \forall l \in [l_{min}; l_{max}] \tag{7.19}$$

où : $G = \frac{1}{2} log_{10}(\frac{l_{max}}{l_{min}})$ (resp. $\tilde{G} = \frac{1}{2} log_{10}(\frac{d_{max}}{d_{min}})$) correspond au contraste physique présent dans la scène initiale (resp. scène reproduite) ; $gt(l)$ (resp. $\tilde{gt}(l) = gt(T(l))$) correspond au contraste perceptif présent dans la scène initiale (resp. scène reproduite) qui s'exprime par :

$$\begin{cases} gt(La) = \frac{1}{2}.log_{10}(\frac{m_t+1}{m_t-1}) \\ \\ m_t = \frac{1}{s.CSF(La)} \end{cases} \tag{7.20}$$

où : La correspond à la luminance d'adaptation d'un participant ; CSF correspond à une fonction qui relie les seuils de sensibilité aux contrastes en fonction d'une variété de facteurs dont la luminance d'adaptation ; s est une constante de normalisation.

$$F_{obj} = \int_{log_{10}(l_{min})}^{log_{10}(l_{max})} S(l)(G - gt(l) - \tilde{G}(l) + \tilde{gt}(l)).dl \tag{7.21}$$

où : S est une fonction de pondération ; τ est une quantité positive ; $\frac{dT}{dl}.G = \tilde{G}$ et $\tilde{gt}(l) = gt(T(l))$. Il est bon de noter que par définition de la fonction objective F_{obj}, la fonction de transformation T opère dans des domaines logarithmiques.

Enfin, la carte de luminance issues de l'algorithme de mise en correspondance global est noté $P_0 = 10^{T(log_{10}(I_L))}$.

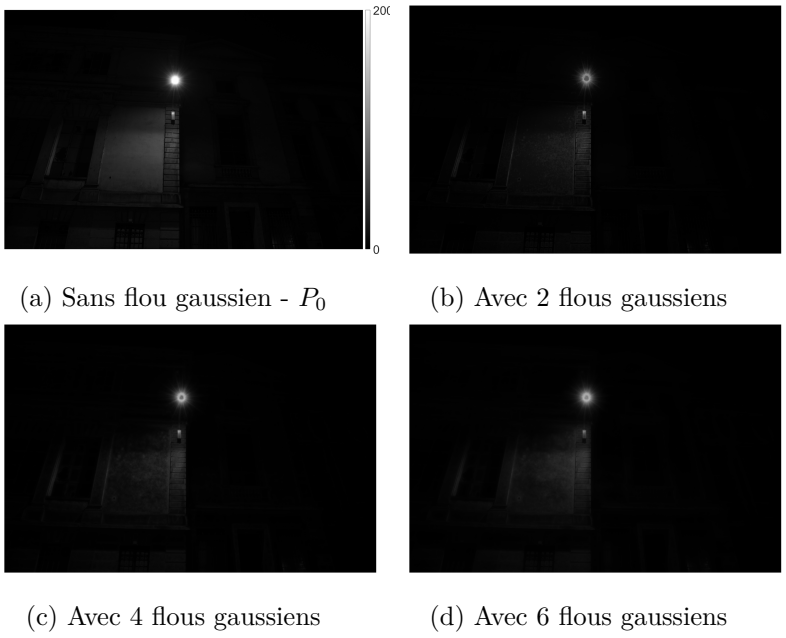
Algorithme de mise en correspondance tonale local

L'objectif de l'algorithme de mise en correspondance tonale local est de prendre en compte les contrastes locaux présent au sein de l'image $((\tilde{P}_k)_k)$, c'est-à-dire le contraste d'un élément par rapport à son fond. Pour se faire, l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) utilise des flous gaussiens avec N résolutions spatiales caractérisées par un écart-type commun aux deux dimensions de l'image σ :

$$\begin{cases} \tilde{P}_k = 10^{P_k}.m_k, \qquad k \in \{1, ...N\} \\ \\ P_k = gauss_{\sigma_k} * log_{10}(I_L) \\ \\ mk = 1 - \frac{gt - \tilde{gt}}{ck} \\ \\ ck^2 = gauss * ((log_{10}(I_L) - Pk)^2) \end{cases} \tag{7.22}$$

Finalement, à partir des deux algorithmes de mise en correspondance tonale, il est possible de déterminer une nouvelle carte de luminance $\tilde{I}_L$ qui prend en compte à la fois les caractéristiques du dispositif d'affichage et la sensibilité aux contrastes (voir Figure 7.37 pour des exemples) en utilisant la relation suivante :

$$\tilde{I}_L = P_0 + \sum_{k=1}^{N} \tilde{P}k \tag{7.23}$$



(a) Sans flou gaussien - P_0 (b) Avec 2 flous gaussiens

(c) Avec 4 flous gaussiens (d) Avec 6 flous gaussiens

FIGURE 7.37 – Cartes de luminances modifiées en fonction du nombre de flous gaussiens appliqués. Note : La fonction T est prise linéaire (dans le domaine logarithmique)

Application du modèle de Cao et al. (2008)

L'objectif de cette étape de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014) est de fournir une transformation qui permet de passer d'un triplet RVB de l'image initiale à un triplet RVB qui sera affiché dans le dispositif d'affichage en appliquant le modèle de Cao et al. (2008) de façon à garantir des sensations visuelles similaires entre l'image initiale, représentant une scène sollicitant la vision mésopique, et l'image finale, affichée dans des conditions photopiques.

En notant M_E le modèle du dispositif d'affichage permettant la conversion d'un triplet $R\tilde{V}B$ (espace du dispositif d'affichage) en un quadruplet dans l'espace des cônes et bâtonnets (LMSR) et $Mc(Y)$ la matrice associée au modèle de Cao et al. (2008) pour une luminance Y (voir section 1.1.6.2 du chapitre 1), Wanat and Mantiuk (2014) font l'hypothèse selon laquelle la relation présentée en équation 7.25 est valide. Ainsi, les auteurs peuvent « convertir » un triplet RVB, associée à la scène initiale (conditions mésopiques), en un triplet $R\tilde{V}B$, associée à la scène affichée (conditions photopiques) :

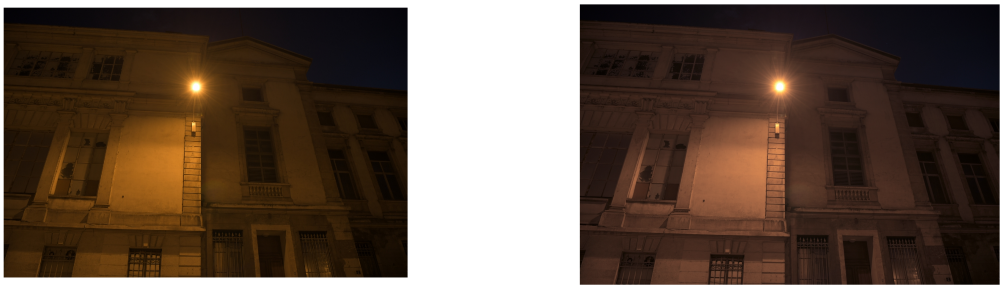
$$R\tilde{V}B = \frac{\tilde{Y}}{Y}.(Mc(\tilde{Y}).M_E)^{-1}.(Mc(Y).M_E).RVB \tag{7.24}$$

où : A^{-1} correspond à l'inverse de la matrice A lorsque cette dernière existe (*i.e.* matrice carré de déterminant non nul).

$$LMS.Y = L\tilde{M}S.\tilde{Y} \tag{7.25}$$

où : LMS (resp. $L\tilde{M}S$) est le triplet équivalent photopique obtenu à partir du modèle de Cao et al. (2008) associé à un quadruplet $LMSR$ (resp. $L\tilde{M}SR$) de la scène initiale (resp. la scène affichée) ayant une luminance Y (resp. $\tilde{Y}$).

La Figure 7.38 illustre l'application du modèle de Cao et al. (2008) en fixant le rapport $\frac{\tilde{Y}}{Y}$ à l'unité.



(a) Image initiale

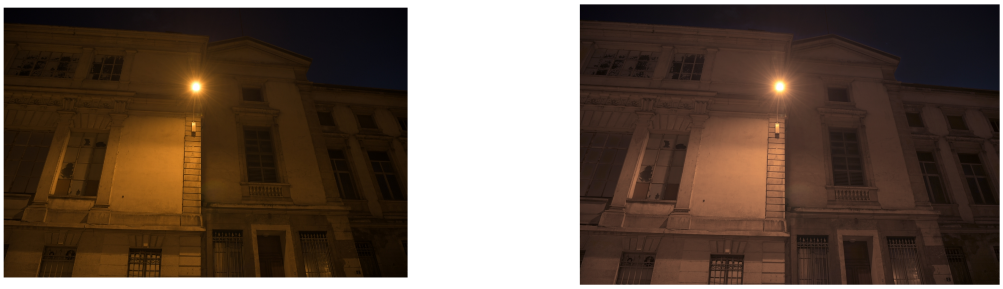
(b) Image prenant en compte les phénomènes liés à la vision mésopique

FIGURE 7.38 – Image initiale en comparaison avec l'image prenant en compte les phénomènes liés à la vision mésopique

Modèle de saturation des couleurs

Cette dernière étape vise à appliquer une correction par dessus le modèle de Cao et al. (2008). Wanat and Mantiuk (2014) ont trouvé que la correction décrite en équation (7.26) permet de fournir des images qui, d'après les auteurs, sont les meilleures. La Figure 7.39 montre l'image finale obtenue en appliquant l'ensemble des étapes de l'algorithme de Cao et al. (2008), à condition que la fonction T soit linéaire.

$$\begin{cases} R\tilde{\tilde{V}}B = \frac{R\tilde{V}B}{\tilde{Y}}^{\frac{s(Y)}{s(\tilde{Y})}}.\tilde{Y} \\ \\ s(Y) = \frac{Y}{Y+0.108} \end{cases} \tag{7.26}$$



(a) Image initiale (b) Image finale

FIGURE 7.39 – Illustration de la mise en place de l'algorithme de Wanat and Mantiuk (2014)

Modifications apportées par rapport à l'algorithme initiale

Premièrement, pour la détermination de la relation de mise en correspondance tonale globale (notée T), nous avons fait le choix d'appliquer un modèle de correction linéaire entre les espaces logarithmiques ce qui permet une bonne première approche de la relation telle que définie en équation (7.21).

Pour l'étape de saturation des couleurs, il est apparu que les pixels ayant de forts contrastes locaux (généralement entre le ciel « noir » et les contours des bâtiments ou des branches d'arbre) avaient des valeurs proche de la saturation créant des artefacts sur les images finales. Cette observation est probablement liée au fait que les cartes de luminance sont déterminées à partir d'un modèle déterminé en laboratoire et non en utilisant la relation du standard sRGB. Pour palier ce problème nous avons décidé de modifier la relation de saturation par la relation globale :

$$\begin{cases} \tilde{\tilde{RVB}} = \frac{\tilde{RVB}}{\tilde{Y}}^{\frac{Ms}{\tilde{Ms}}}.\tilde{Y} \\ s(Y) = \frac{Y}{Y+0.108} \\ Ms = max\{s(Y), Y \in I_L\} \\ \tilde{Ms} = max\{s(\tilde{Y}), \tilde{Y} \in \tilde{I}_L\} \end{cases} \tag{7.27}$$

Enfin, lors de l'affichage des images finales, ces dernières apparaissaient aux expérimentateurs plus lumineuses que sur site. Ainsi, un paramètre libre a' a été ajouté dans l'étape de saturation (voir équation (7.28)). Pour chaque scène, le paramètre libre a' a été déterminé via les expérimentateurs sur site en réalisant des comparaisons entre l'image affichée et la scène réelle.

$$\tilde{\tilde{RVB}} = (1/a').\frac{\tilde{RVB}}{\tilde{Y}}^{\frac{Ms}{\tilde{Ms}}}.\tilde{Y} \tag{7.28}$$

7.16 Statistiques descriptives supplémentaires - expérience en environnement virtuel

Dans cette annexe les moyennes et intervalles de confiance à 95 % par scène reproduite en utilisant les trois chaînes d'acquisition / restitution testées avec l'algorithme de Reinhard et al. (2002) (R_LDR) et Wanat and Mantiuk (2014) revisité (W_LDR et W_HDR) sont tracés pour chaque item évalué lors de l'expérience en environnement virtuel. Les notes de l'expérience en environnement réel (Statique - S ; Dynamique - D) ont été ajoutées à titre de comparaison.

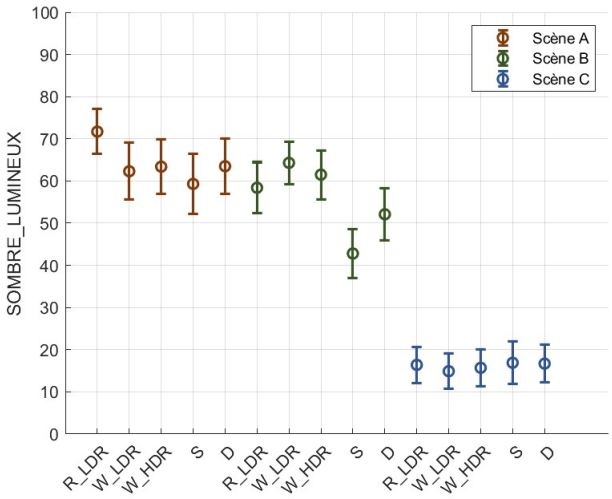


FIGURE 7.40 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Sombre–Lumineuse »

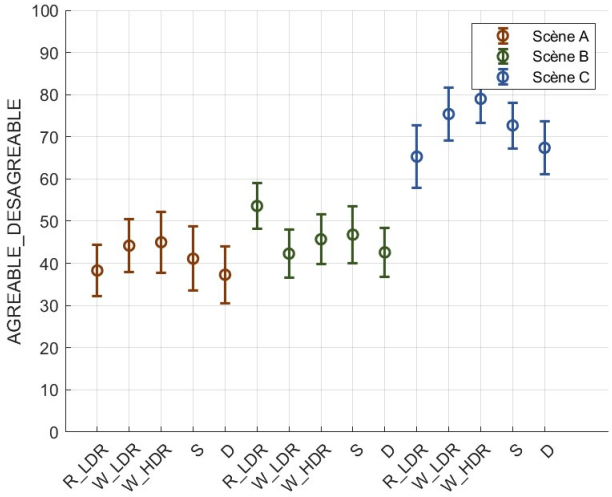


FIGURE 7.41 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Agréable–Désagréable »

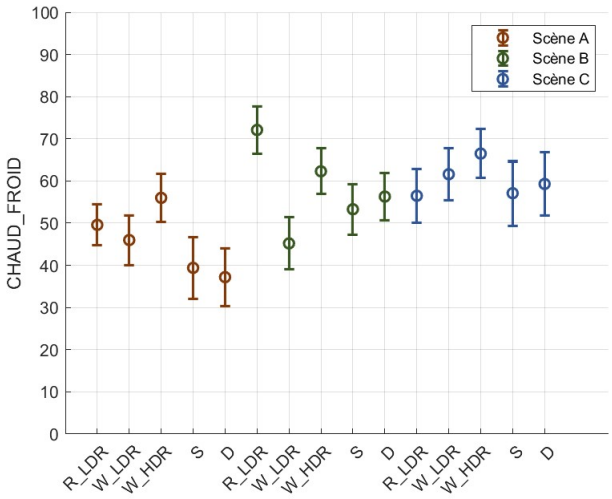


FIGURE 7.42 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Chaude–Froide »

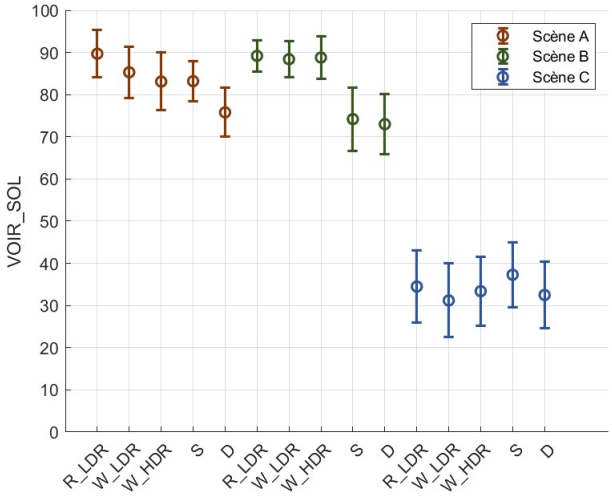


FIGURE 7.43 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

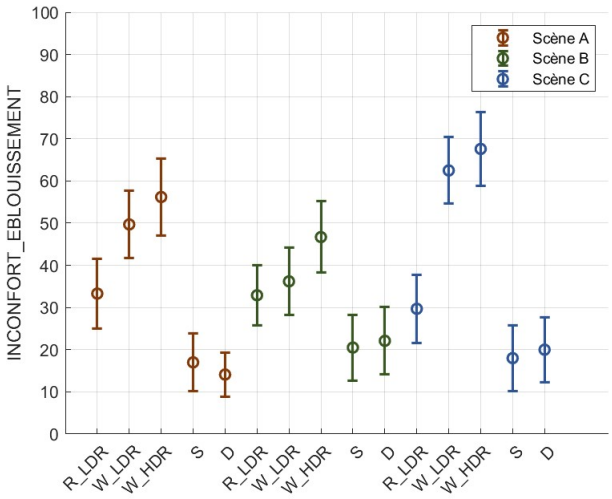


FIGURE 7.44 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

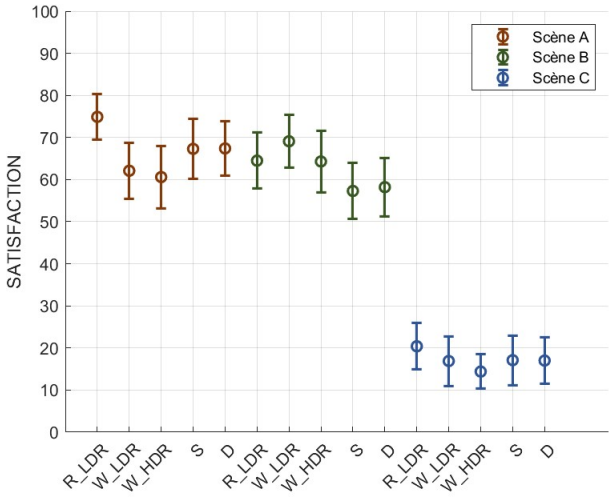


FIGURE 7.45 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Totalement satisfaisant »

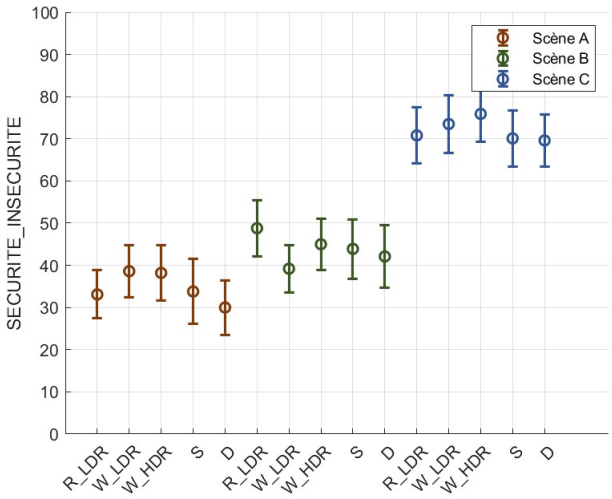


FIGURE 7.46 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité »

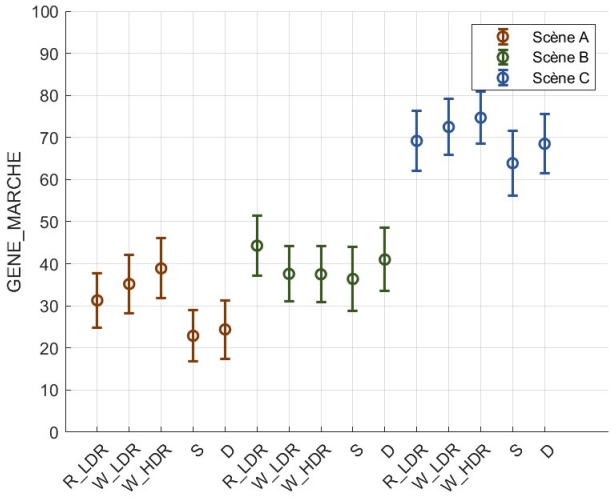


FIGURE 7.47 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

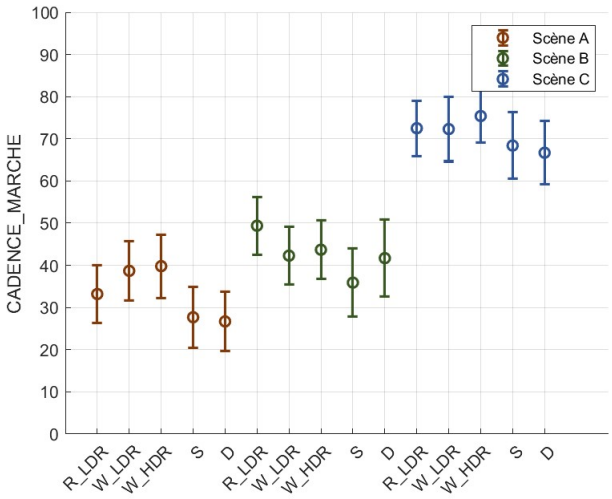


FIGURE 7.48 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

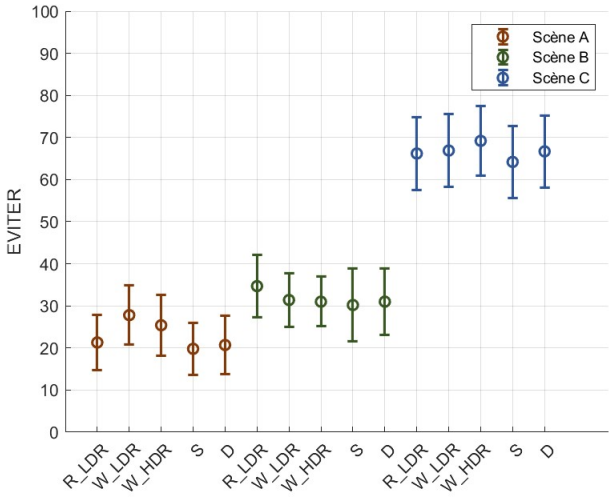


FIGURE 7.49 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

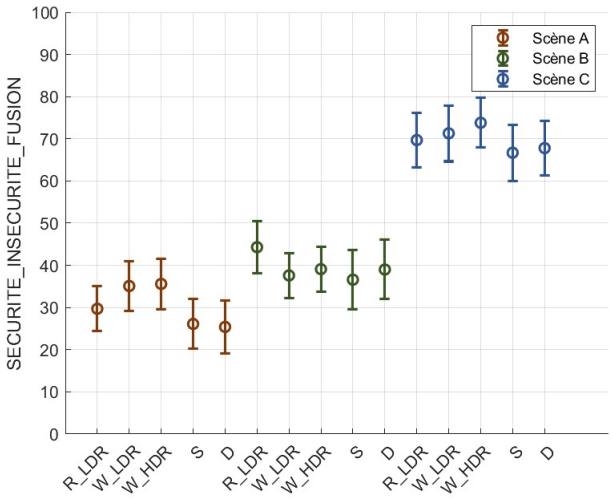


FIGURE 7.50 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item fusionné portant sur le sentiment de sécurité

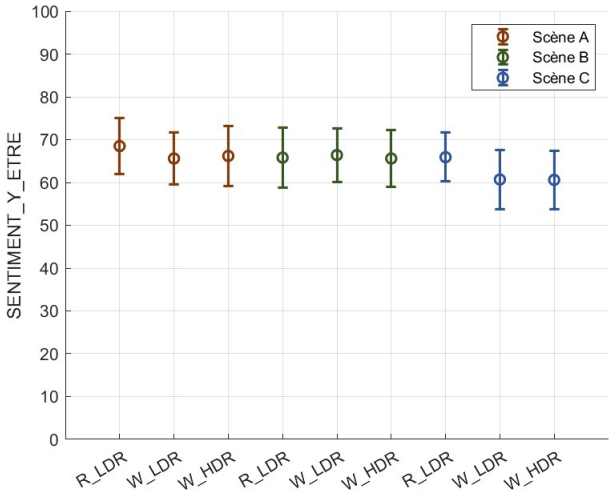


FIGURE 7.51 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Dans l'environnement virtuel, j'ai eu le sentiment "d'y être" : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

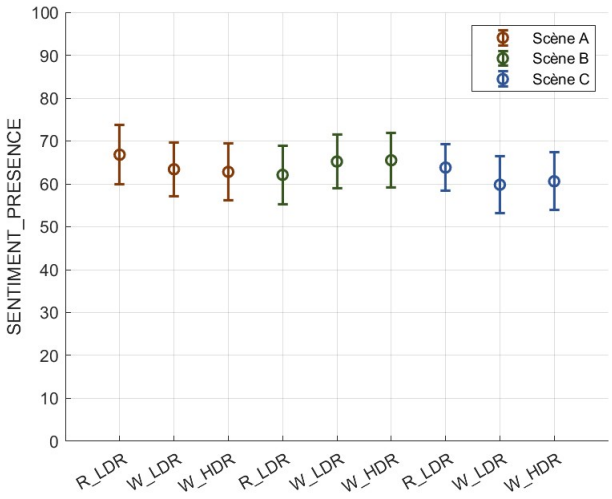


FIGURE 7.52 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je me suis senti présent(e) dans l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

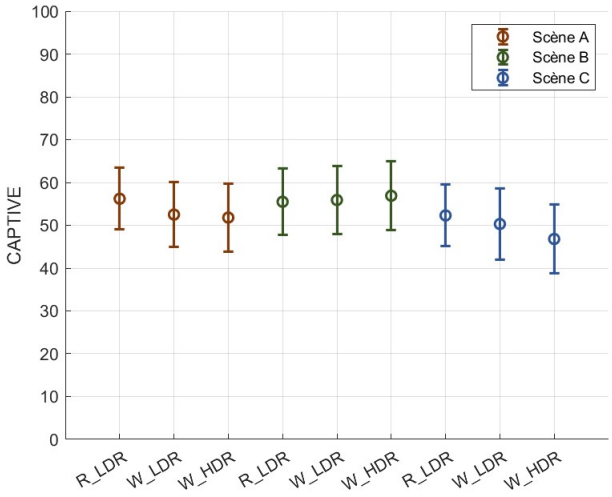


FIGURE 7.53 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « J'étais complètement captivé(e) par l'environnement virtuel : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord »

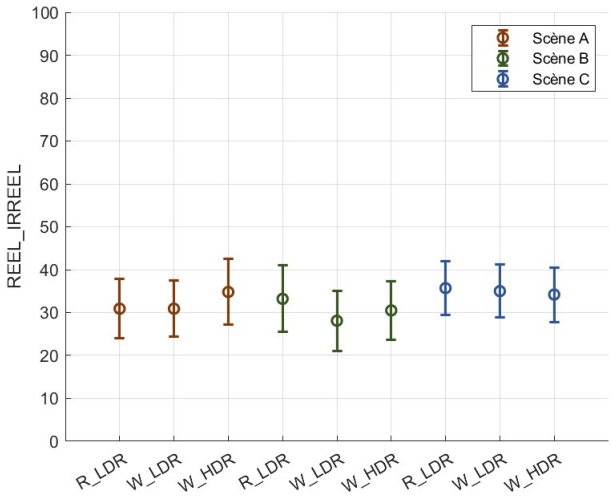


FIGURE 7.54 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Comment l'environnement virtuel vous a-t-il semblé : Complètement réel–Pas du tout réel »

7.17 Comparaison entre les évaluations sur site après une marche de 15 m et en environnement virtuel

Les évaluations sur site en position statique ont été sélectionnées afin de réaliser la comparaison entre les évaluations sur site et en environnement virtuel (voir section 5.2.2.3). Néanmoins, l'étude présentée en chapitre 4 met en avant, que pour certains critères (voir le sol et ressentir une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène), des différences significatives sont observées entre les évaluations statique et dynamique (après avoir marché 15 mètres) sur site. Ainsi, nous présentons également les résultats (voir Tables 7.8 et 7.9) de la comparaison entre les évaluations sur site après avoir marché 15 m et en environnement virtuel. L'interaction entre les facteurs SCENE (modalités : A, B ou C) et ENVIRONNEMENT_EVALUATION (modalité : REEL ou VIRTUEL) n'est étudiée que pour les items où une ANOVA à mesures répétées a été réalisée.

Pour les items « Sombre–Lumineux », « Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant » et ceux relatifs au sentiment de sécurité, à l'exception de l'item relatif à la cadence, quelle que soit la chaîne d'acquisition / restitution (R_LDR, W_LDR et W_HDR) aucun effet du facteur ENVIRONNEMENT_EVALUATION n'est observé ($p > 0.05$). Une interaction entre les facteurs SCENE et ENVIRONNEMENT_EVALUATION est observée pour l'item « Sombre–Lumineux » avec la chaîne W_LDR ($F(2,178) = 5.28$, $p = 0.006$). Cette interaction s'explique par le fait que la scène B est jugée plus sombre en environnement réel qu'en virtuel ($t(89) = -3.114$, $p_{tukey} = 0.029$) alors qu'aucune différence n'est observée pour les autres scènes (A et C). Une interaction est également observée pour l'item relatif à la satisfaction avec la chaîne W_LDR ($F(2,178) = 4.36$, $p = 0.014$), ce qui peut s'expliquer par le fait que la scène B est jugée moins satisfaisante sur site qu'en environnement virtuel W_LDR (Site : $M = 58.2$; W_LDR : $M = 64.5$). Finalement, une interaction entre les facteurs SCENE et ENVIRONNEMENT_EVALUATION est également observée pour l'item relatif à la gêne quant à l'idée de marcher avec la chaîne W_HDR ($F(2,178) = 4.15$, $p = 0.017$) qui est liée à l'évaluation de la scène A en environnement virtuel, jugée moins gênante que lors des évaluations sur site ($t(89) = -2.922$, $p = 0.049$).

Pour l'item « Agréable–Désagréable », un effet significatif est observé entre les évaluations sur site en marchant (15 m) et en environnement virtuel en utilisant la chaîne W_HDR ($F(1,89) = 6.27$, $p = 0.014$, $\eta_p^2 = 0.066$).

Pour l'item « Chaud–Froid », un effet significatif est observé entre les évaluations sur site et en environnement virtuel R_LDR ($F(1,89) = 8.89$, $p = 0.004$, $\eta_p^2 = 0.091$) ou W_HDR ($F(1,89) = 11.1$, $p = 0.001$, $\eta_p^2 = 0.111$). Une interaction entre les facteurs SCENE et ENVIRONNEMENT_EVALUATION est observée quelle que soit la chaîne (R_LDR : $F(2,178) = 6.21$, $p = 0.002$; W_LDR : $F(2,178) = 6.71$, $p = 0.002$; W_HDR : $F(2,178) = 3.96$, $p = 0.021$). Pour la chaîne R_LDR, l'interaction s'explique par le fait qu'en environnement virtuel la scène C ait été jugée plus chaude que la scène B ($t(89) = 3.7349$, $p_{tukey} = 0.004$) mais similairement à la scène A alors que le contraire est observé pour les évaluations réalisées sur site. Pour la chaîne W_LDR, l'interaction s'explique par le fait qu'en environnement virtuel la scène B ait été jugée plus chaude que la scène C ($t(89) = -3.900$, $p_{tukey} = 0.002$) mais similairement à la scène A alors que le contraire est observé pour les évaluations réalisées sur site. Pour la chaîne W_HDR, l'interaction est liée au fait que la scène A ait été jugée plus chaude lors des évaluations sur site qu'en environnement virtuel ($t(89) = -4.2706$, $p_{tukey} < 0.001$).

Pour l'item « Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord », d'après les tests de Mann-Whitney, une différence significative est observée entre les évaluations en environnement réel

et virtuel (R_LDR, W_LDR ou W_HDR) pour la scène B ($p < 0.001$) et pour la scène A lorsqu'elle est reproduite avec la chaîne R_LDR ($p < 0.001$) ou W_LDR ($p = 0.009$).

Concernant l'inconfort dû à l'éblouissement, les tests de Mann-Whitney révèlent qu'il y a, pour l'ensemble des scènes (A, B ou C), des différences significatives entre les évaluations sur site et en environnement réel (R_LDR, W_LDR ou W_HDR).

Finalement, pour l'item relatif à la cadence de marche un effet significatif est observé entre les évaluations sur site et en environnement virtuel avec la chaîne W_HDR ($F(1,89) = 4.13$, $p = 0.045$, $\eta_p^2 = 0.044$).

Item (0-100)	Dynamique - R_LDR	Dynamique - W_LDR	Dynamique - W_HDR
1) Sombre–Lumineux	F(1,89) = 3.33 ; p = 0.071 ; η_p^2 = 0.036	F(1,89) = 1.22 ; p = 0.273 ; η_p^2 = 0.013	F(1,89) = 1.07 ; p = 0.304 ; η_p^2 = 0.012
2) Agréable–Désagréable	F(1,89) = 1.31 ; p = 0.255 ; η_p^2 = 0.015	F(1,89) = 2.66 ; p = 0.106 ; η_p^2 = 0.000	**F(1,89) = 6.27 ; p = 0.014 ; η_p^2 = 0.111**
3) Chaud–Froid	**F(1,89) = 8.89 ; p = 0.004 ; η_p^2 = 0.091**	F(1,89) = $4.85e^{-5}$; p = 0.994 ; η_p^2 = 0.000	**F(1,89) = 11.1 ; p = 0.001 ; η_p^2 = 0.111**
4) Je vois le sol : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord*	**A : p < 0.001** **B : p < 0.001** C : p = 0.952	**A : p = 0.009** **B : p = 0.001** C : p = 0.467	A : p = 0.056 **B : p < 0.001** C : p = 0.971
5) Je ressens de l'inconfort dû à l'éblouissement : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord*	**A : p < 0.001** **B : p = 0.014** **C : p = 0.033**	**A : p < 0.001** **B : p = 0.003** **C : p < 0.001**	**A : p < 0.001** **B : p < 0.001** **C : p < 0.001**
6) Je trouve que l'éclairage public est : Pas du tout satisfaisant–Tout à fait satisfaisant	F(1,89) = 3.81 ; p = 0.054 ; η_p^2 = 0.041	F(1,89) = 0.360 ; p = 0.550 ; η_p^2 = 0.001	F(1,88) = 0.150 ; p = 0.699 ; η_p^2 = 0.002

TABLE 7.8 – Résultats des analyses (ANOVAs à mesures répétées ou test de Mann-Whitney par scène*) des données collectées en environnement réel et virtuel (facteur inter-sujet : ENVIRONNEMENT_EVALUATION) hors item relatif au sentiment de sécurité. Les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$)

Item (0-100)	Dynamique - R_LDR	Dynamique - W_LDR	Dynamique - W_HDR
7) Je me sens en : Sécurité–Insécurité	$F(1,89) = 1.29$; $p = 0.260$; $\eta_p^2 = 0.014$	$F(1,89) = 1.10$; $p = 0.297$; $\eta_p^2 = 0.012$	$F(1,89) = 3.51$; $p = 0.064$; $\eta_p^2 = 0.038$
8) Je ressens une gêne quant à l'idée de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	$F(1,89) = 1.29$; $p = 0.260$; $\eta_p^2 = 0.014$	$F(1,89) = 2.66$; $p = 0.106$; $\eta_p^2 = 0.029$	$F(1,89) = 3.17$; $p = 0.078$; $\eta_p^2 = 0.034$
9) J'accélérerais ma cadence de marche par rapport à ma cadence habituelle : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	$F(1,89) = 3.01$; $p = 0.086$; $\eta_p^2 = 0.033$	$F(1,89) = 2.47$; $p = 0.119$; $\eta_p^2 = 0.027$	**$F(1,89) = 4.13$; $p = 0.045$; $\eta_p^2 = 0.044$**
10) J'éviterais de marcher dans la scène : Pas du tout d'accord–Tout à fait d'accord	$F(1,89) = 0.0917$; $p = 0.763$; $\eta_p^2 = 0.001$	$F(1,89) = 0.408$; $p = 0.524$; $\eta_p^2 = 0.005$	$F(1,88) = 0.217$; $p = 0.643$; $\eta_p^2 = 0.002$
Item fusionné « SENTIMENT _SECURITE »	$F(1,89) = 1.41$; $p = 0.238$; $\eta_p^2 = 0.016$	$F(1,89) = 1.57$; $p = 0.214$; $\eta_p^2 = 0.017$	$F(1,89) = 3.16$; $p = 0.079$; $\eta_p^2 = 0.034$

TABLE 7.9 – Résultats des analyses (ANOVAs à mesures répétées) des données collectées en environnement réel et virtuel (facteur inter-sujet : ENVIRONNEMENT_EVALUATION) pour les items relatifs au sentiment de sécurité. Les valeurs en gras indiquent un effet significatif ($p < 0.05$)

7.18 Cartes de luminance pour les conditions lumineuses ambiante haute et ambiante basse - expérience 5.2

La Figure 7.55 montre les cartes de luminance obtenues dans le dispositif expérimental de l'expérience 5.2 pour les conditions lumineuses ambiante haute et ambiante basse.



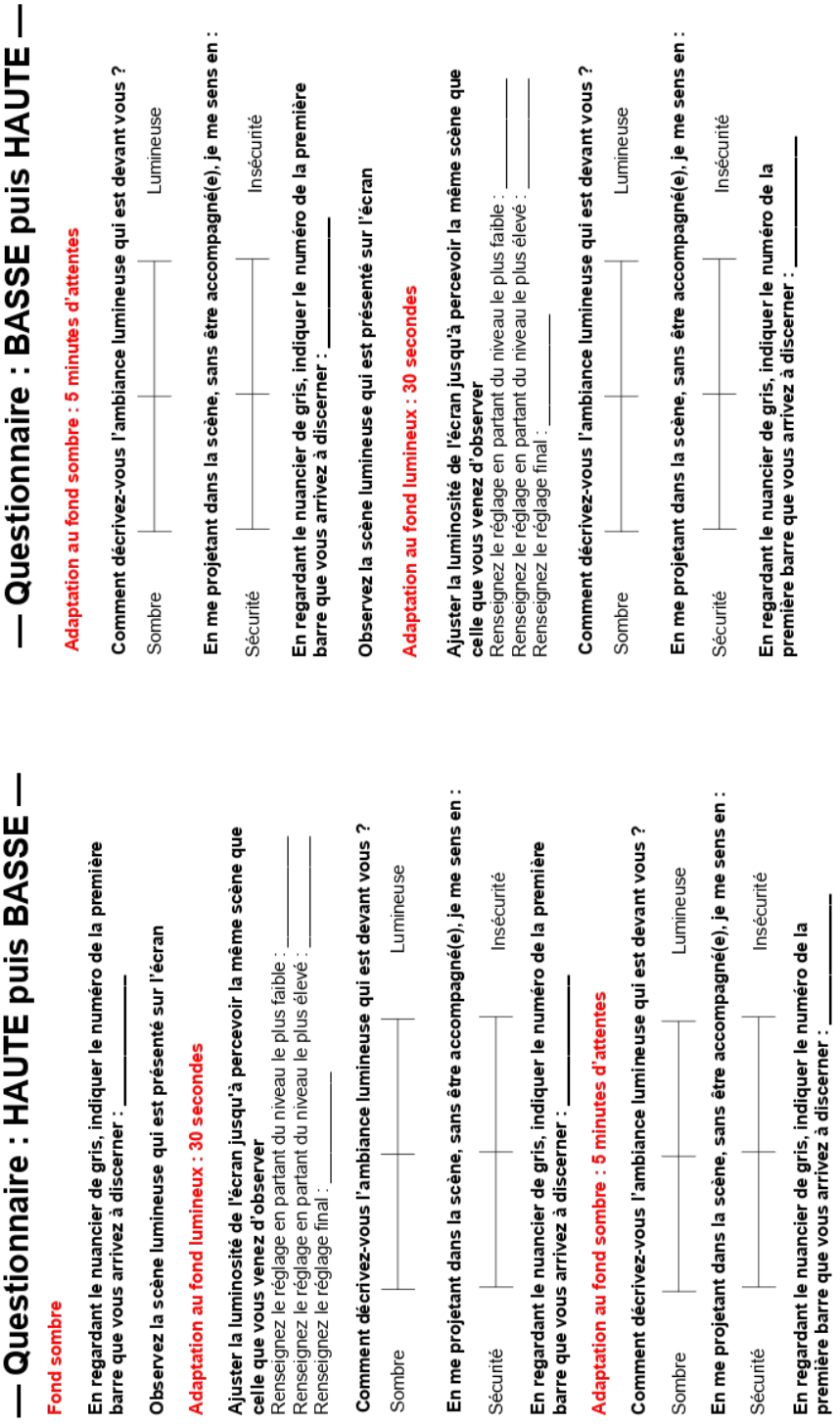
(a) Condition lumineuse ambiante basse



(b) Condition lumineuse ambiante haute

FIGURE 7.55 – Cartes de luminance dans le dispositif expérimental pour les deux conditions lumineuses ambiantes

7.19 Questionnaire pour l'expérience en environnement virtuel sur les conditions lumineuses ambiantes



— Questionnaire : HAUTE puis BASSE —

Fond sombre

En regardant le nuancier de gris, indiquer le numéro de la première barre que vous arrivez à discerner : _____

Observez la scène lumineuse qui est présenté sur l'écran

Adaptation au fond lumineux : 30 secondes

Ajuster la luminosité de l'écran jusqu'à percevoir la même scène que celle que vous venez d'observer
Renseignez le réglage en partant du niveau le plus faible : _____
Renseignez le réglage en partant du niveau le plus élevé : _____
Renseignez le réglage final : _____

Comment décrivez-vous l'ambiance lumineuse qui est devant vous ?
Sombre — Lumineuse

En me projetant dans la scène, sans être accompagné(e), je me sens en :
Sécurité — Insécurité

En regardant le nuancier de gris, indiquer le numéro de la première barre que vous arrivez à discerner : _____

Adaptation au fond sombre : 5 minutes d'attentes

Comment décrivez-vous l'ambiance lumineuse qui est devant vous ?
Sombre — Lumineuse

En me projetant dans la scène, sans être accompagné(e), je me sens en :
Sécurité — Insécurité

En regardant le nuancier de gris, indiquer le numéro de la première barre que vous arrivez à discerner : _____

— Questionnaire : BASSE puis HAUTE —

Adaptation au fond sombre : 5 minutes d'attentes

Comment décrivez-vous l'ambiance lumineuse qui est devant vous ?
Sombre — Lumineuse

En me projetant dans la scène, sans être accompagné(e), je me sens en :
Sécurité — Insécurité

En regardant le nuancier de gris, indiquer le numéro de la première barre que vous arrivez à discerner : _____

Observez la scène lumineuse qui est présenté sur l'écran

Adaptation au fond lumineux : 30 secondes

Ajuster la luminosité de l'écran jusqu'à percevoir la même scène que celle que vous venez d'observer
Renseignez le réglage en partant du niveau le plus faible : _____
Renseignez le réglage en partant du niveau le plus élevé : _____
Renseignez le réglage final : _____

Comment décrivez-vous l'ambiance lumineuse qui est devant vous ?
Sombre — Lumineuse

En me projetant dans la scène, sans être accompagné(e), je me sens en :
Sécurité — Insécurité

En regardant le nuancier de gris, indiquer le numéro de la première barre que vous arrivez à discerner : _____

FIGURE 7.56 – Questionnaire utilisé pour le recueil des jugements subjectifs lors de l'expérience en environnement virtuel sur les conditions lumineuses ambiantes

7.20 Extraction des grandeurs photométriques et contrastes perçus à partir des réponses relatives à la tâche de détection des contrastes des participants lors de l'expérience sur les comparaisons entre les conditions lumineuses ambiantes

Cette annexe décrit dans un premier temps le protocole d'extraction des luminances au niveau des nuanciers de gris présentés aux participants lors de la tâche de détection des contrastes pour l'expérience 5.2 (voir chapitre 5 section 5.3). Puis dans un second temps, l'estimation des luminances de voile des participants est décrite permettant l'estimation des contrastes perçus par les participants.

7.20.1 Extraction des grandeurs photométriques

Le nuancier de gris est composé de 20 barres uniformes grises ayant des consignes régulières (sur 8 bits - valeur maximale 255) de 2 à 40 par pas de 2. Des cartes de luminance sont réalisées à l'aide d'une caméra LMK 6-5L placée au niveau de l'œil de l'observateur pour l'ensemble des niveaux lumineux de l'écran (16 niveaux lumineux) dans la condition lumineuse ambiante haute (source du plafonnier allumée et spot au maximum - luminosité de l'écran réglée par les participants) et d'autre part dans la condition lumineuse ambiante basse (source du plafonnier éteinte et spot réglé à un faible niveau lumineux ; luminosité de l'écran fixe entre les participants).

Pour chaque carte de luminance et pour une barre du nuancier un rectangle de 233x5 pixels est défini comme la zone de mesure des luminances (voir Figure 7.57). Les luminances (normalisées) extraites pour chaque niveau lumineux de l'écran sont tracées en Figure 7.58. D'après la Figure 7.58, dans certains cas une barre plus sombre (en consigne) aurait une luminance plus élevée qu'une barre plus claire. Cela semble incohérent, pour corriger cela un modèle est proposé. Ce modèle est de la forme $L_{mod} : n \mapsto a.(n^b) + c.(n^2) + d.n + e$ (où : n correspond au numéro de la barre du nuancier ; a, b, c, d et e sont des paramètres à déterminer). Cette forme de modèle a été sélectionnée car le modèle comporte une partie exponentielle ($n \mapsto a.(n^b)$) qui permet de modéliser le comportement de l'écran (voir Annexe 7.12) et une partie polynomiale du second degré ($V \mapsto c.(V^2) + d.V + e$) qui permet de modéliser (développement limité à l'ordre 2) les luminances induites par la condition lumineuse haute qui sont réfléchies par l'écran. Il est bon de noter que l'on observe un léger sursaut des valeurs pour la barre du nuancier numéro 11 qui correspond au reflet qu'introduit la condition lumineuse ambiante dans le plan de l'écran (voir Figure 7.59).

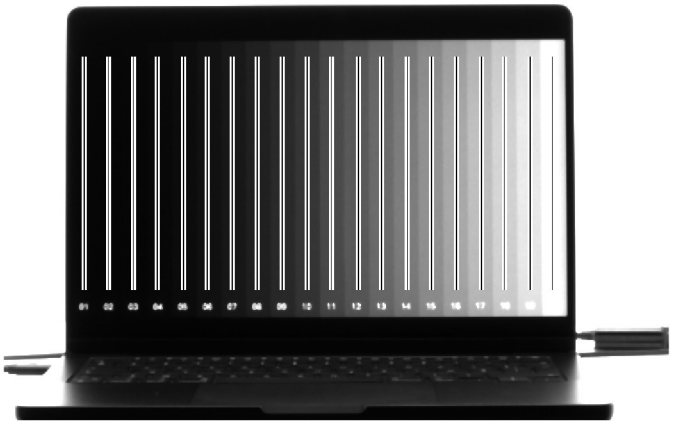


FIGURE 7.57 – Mesures de luminance sur le de nuancier gris - expérience sur les conditions lumineuses ambiantes

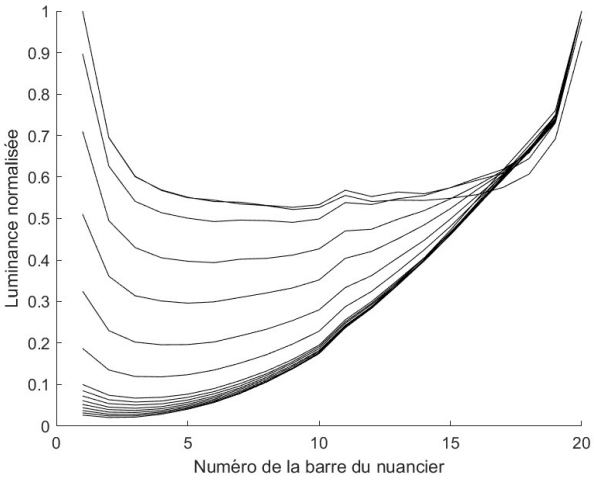


FIGURE 7.58 – Mesures des luminances moyennes sur le nuancier de gris - une courbe correspond à un niveau lumineux de l'écran

Pour déterminer les paramètres du modèle (a, b, c, d et e), il est préférable de choisir le jeu de données qui comporte le moins de variabilité dans les mesures. Ainsi, les écarts-types de l'ensemble des mesures sont calculés puis ils sont normalisés de façon à ce qu'ils puissent être comparés deux à deux ($\sigma_{k,norm} = \sigma_k / L_{k,max}$; k étant un niveau de réglage de l'écran et $L_{k,max}$ correspond à la luminance maximale mesurée sur le nuancier pour le réglage k). Enfin, pour un niveau lumineux de l'écran la moyenne des écarts-types normalisés est réalisée puis le jeu de données ayant le moins de variabilité (plus petite valeur de l'écart-type normalisé moyen) est sélectionné pour construire le modèle. Pour nos séries de mesures, le jeu de données comportant le moins de variabilité est celui correspondant au niveau lumineux maximal de l'écran (niveau 12) ayant un écart-type normalisé moyen de 0.0049 soit un écart-type moyen de 0.0591 cd/m^2. Ainsi, le modèle final (voir Figure 7.60) est obtenu pour les paramètres : a = 2.133 ; b = -0.1029 ; c = 0.02898 ; d = -0.05103 ; e = -1.801.

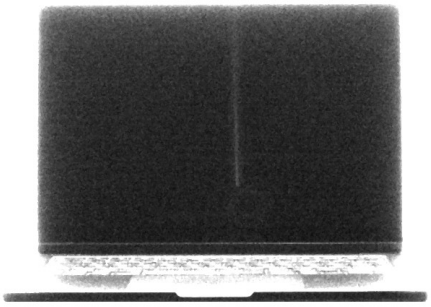


FIGURE 7.59 – Reflet induit par la condition lumineuse ambiante haute sur l'écran. En l'absence de reflet l'écran est censé être uniformément noir

La valeur de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les valeurs de luminances mesurées et celles estimées (référence) par le modèle vaut 0.085 cd/m^2. De plus, l'erreur relative entre les luminances mesurées et celles estimées vaut 5.32 %. Finalement, ce profil de luminance est appliqué pour l'ensemble des niveaux lumineux de l'écran (à un facteur de mise à l'échelle prêt).

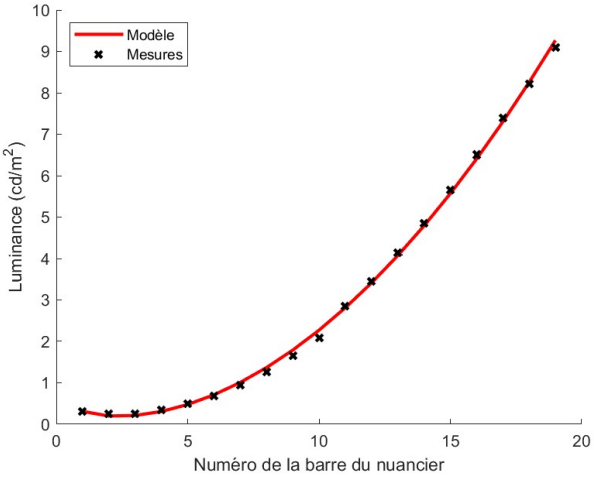


FIGURE 7.60 – Profil de luminance pour le réglage de l'écran 12 - condition lumineuse haute

Enfin, puisque la source du plafonnier n'était pas allumée pour la condition lumineuse ambiante basse, il n'est pas possible d'utiliser le modèle précédent. Cependant, dans ce cas, les mesures semblent convenables. Ainsi les valeurs moyennes sont utilisées directement (sans lissage via un modèle), elles sont tracées en Figure 7.61.

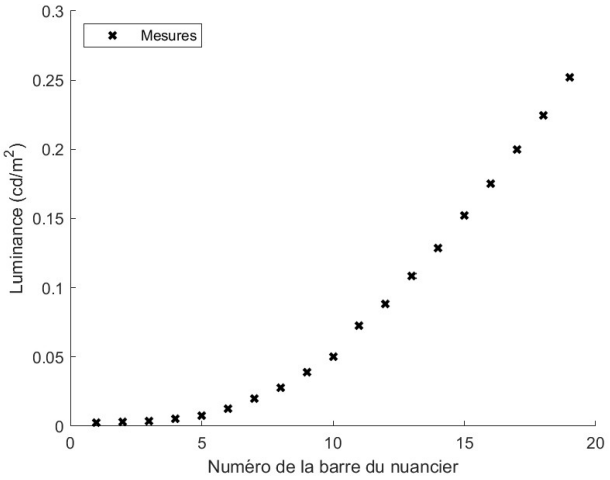


FIGURE 7.61 – Profil de luminance pour le réglage de l'écran 5 - condition lumineuse basse

7.20.2 Estimation des contrastes perçus

Pour estimer le contraste perçu (voir équation 7.29) par les participants lors de la réalisation de la tâche de détection de contrastes, il est nécessaire d'estimer la luminance de voile des participants pour les conditions lumineuses ambiantes haute et basse.

Le contraste perçu est défini comme suit :

$$\begin{cases} C_{p,n}(q) = \frac{L_n(q) - L_{n+1}(k)}{L_n(q) + L_v(q)}, & \text{condition lumineuse ambiante haute} \\ \\ C_{p,n'}(q) = \frac{L_{n'}(q) - L_{n'+1}(q)}{L_{n'}(q) + L_{v'}(q)}, & \text{condition lumineuse ambiante basse} \end{cases} \tag{7.29}$$

où : $C_{p,n}(q)$ (resp. $C_{p,n'}(q)$) correspond au contraste perçu par le participant q lors de la réalisation de la tâche avec le nuancier de gris pour la condition lumineuse ambiante haute (resp. basse) ; $L_n(q)$ / $L_{n+1}(q)$ (resp. $L_{n'}(q)$ / $L_{n'+1}(q)$) correspondent aux luminances affichées par l'écran au niveau de la barre numéro n / $n+1$ (resp. n' / $n'+1$) où le participant numéro q a reporté le numéro de la barre $n+1$ (resp. $n'+1$) lors de la tâche de détection des contrastes pour la condition lumineuse ambiante haute (resp. basse) ; $L_v(q)$ (resp. $L_{v'}(q)$) correspond à la luminance de voile estimée pour la condition lumineuse ambiante haute (resp. basse) du participant numéro q.

Pour estimer la luminance de voile nous utilisons la relation de Stiles and Crawford (1937) :

$$L_v(i) = k(AGE).\frac{E_{glare}(i)}{\theta(i)^2} \tag{7.30}$$

où : $L_v(i)$ est la luminance de voile induite par une source ponctuelle notée i ; $E_{glare}(i)$ correspond à l'éclairement vertical au niveau de l'œil des participants dû à la source i (estimé à partir d'une carte de luminance) ; $\theta(i)$ correspond à l'excentricité de la source par rapport à la direction du regard ; $k(AGE)$ correspond à un facteur d'ajustement lié à l'âge (AGE) dont la relation est rappelée dans les travaux de Vos (2003) :

$$k(AGE) = 10.(1 + (AGE/70)^4) \tag{7.31}$$

Pour le calcul de la luminance de voile nous avons considéré l'ensemble des reflections de la boîte blanche comme source introduisant une luminance de voile. La direction du regard a été fixée au centre de l'écran puisqu'il s'agit de l'endroit où les participants devaient regarder pendant qu'ils faisaient la tâche de détection des contrastes. Finalement, en considérant l'âge moyen du panel de participants (M = 29.7 ans) les luminances de voile liées aux conditions lumineuses ambiantes haute et basse valent respectivement $L_v = 0.645$ cd/m^2 et $L_{v'} = 0.0111$ cd/m^2.

Connaissant les luminances de voile et les luminances des barres du nuancier de gris sur l'écran, il est possible d'estimer le contraste perçu par les participants. Dans le cas d'un participant d'âge égal à la moyenne d'âge du panel de participant (M = 29.7 ans) les contrastes perçus en fonction des résultats à la tâche de détection des contrastes pour les conditions lumineuses ambiantes haute et basse sont tracées en Figure 7.62. Les différences de contrastes perçus entre les conditions lumineuses ambiantes haute et basse par participant (selon son âge et le réglage de l'écran réalisé) sont fournies en Annexe 7.21 dans la Table 7.10.

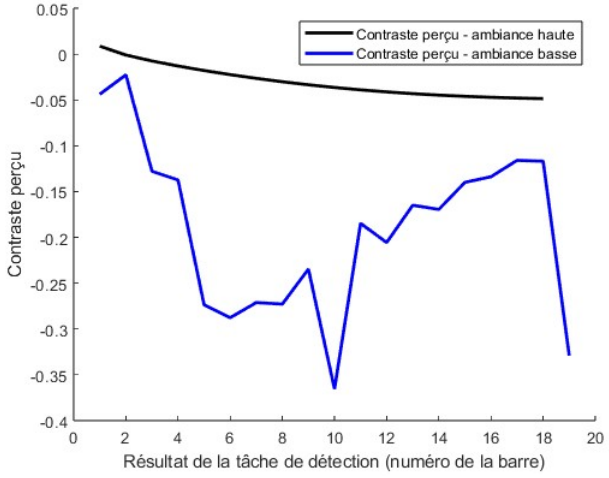


FIGURE 7.62 – Contrastes perçus le long du nuancier de gris pour un participant de 29.7 ans pour un réglage au niveau maximum de l'écran en condition ambiante haute et le réglage 5 de l'écran en condition lumineuse ambiante basse

7.21 Statistiques descriptives supplémentaires - expérience sur les conditions lumineuses ambiantes

Dans cette annexe les moyennes et intervalles de confiance à 95 % par scène reproduite en fonction des conditions lumineuses (haute ou basse) sont tracés pour les deux items évalués lors de l'expérience 5.2 (Figures 7.63 et 7.64). De plus, la Table 7.10 regroupe les données des participants relatives au contraste perçu, dont les moyennes et les intervalles de confiance à 95 % sont tracés en Figure 7.65.

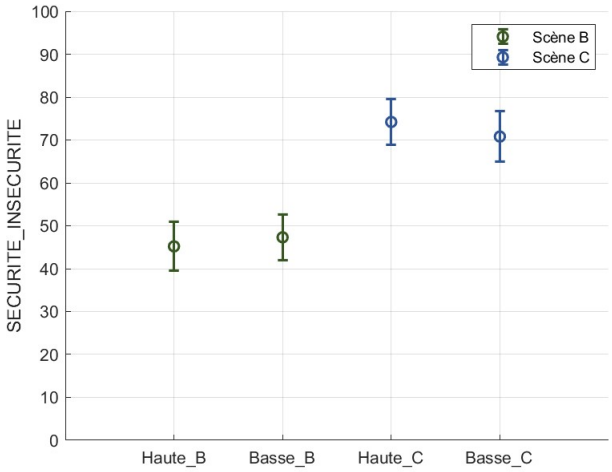


FIGURE 7.63 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Sombre–Lumineuse »

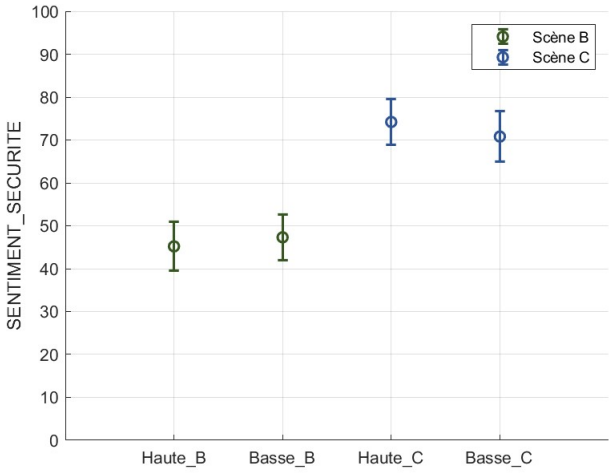


FIGURE 7.64 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - item « Je me sens en : Sécurité–Insécurité »

Participant	Âge	Scène B ΔC_p	Scène C ΔC_p	Participant	Âge	Scène B ΔC_p	Scène C ΔC_p
1	22	-0.069	-0.074	26	46	-0.032	-0.018
2	41	-0.081	-0.046	27	24	-0.084	-0.069
3	21	-0.079	-0.084	28	47	-0.055	-0.054
4	26	-0.060	-0.069	29	21	-0.049	-0.060
5	33	-0.059	-0.059	30	46	-0.217	-0.031
6	23	-0.060	-0.088	31	21	-0.055	-0.070
7	21	-0.212	-0.184	32	40	-0.057	-0.057
8	20	-0.217	-0.060	33	-	-	-
9	26	-0.036	-0.023	34	23	-0.048	-0.060
10	25	0.038	0.071	35	20	-0.070	-0.094
11	20	-0.070	-0.070	36	19	-0.096	-0.096
12	22	0.005	-0.094	37	20	-0.046	-0.079
13	28	-0.220	-0.059	38	25	-0.083	-0.083
14	23	-0.096	-0.084	39	23	-0.093	-0.059
15	22	-0.060	-0.083	40	34	-0.170	-0.184
16	62	-0.099	-0.135	41	28	-0.092	-0.069
17	22	-0.097	-0.090	42	60	-0.180	-0.137
18	22	-0.198	-0.046	43	22	-0.060	-0.048
19	21	-0.70	-0.050	44	20	-0.066	-0.074
20	23	-0.050	-0.059	45	20	-0.202	-0.174
21	19	-0.060	-0.045	46	22	-0.202	-0.175
22	19	-0.060	-0.082	47	58	-0.150	-0.130
23	51	-0.053	-0.053	48	60	-0.048	-0.048
24	26	-0.102	-0.069				
25	25	-0.068	-0.048				

TABLE 7.10 – Données des participants concernant la tâche de détection des contrastes. ΔC_p correspond à la différence de contraste perçu entre les conditions lumineuses ambiantes haute et basse

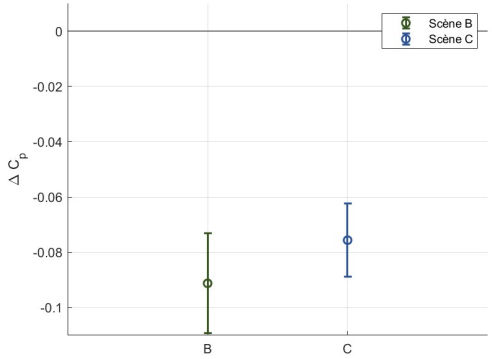


FIGURE 7.65 – Moyennes et intervalles de confiance à 95 % - différence de contraste perçu ΔC_p