ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAITRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Ing.

PAR
Moussa BA

RÉALISATION D'UN SIMULATEUR SOLAIRE D_{65} A PARTIR DE DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES A SEMI-CONDUCTEURS POUR DES APPLICATIONS EN PHOTOVOLTAIQUE

MONTRÉAL, LE 8 JUILLET 2014

©Tous droits réservés, Moussa BA 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Sylvain G. Cloutier, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Mme Véronique Françoise, codirectrice de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Ghyslain Gagnon, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Mme Christine Tremblay, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 2 JUIN 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je remercie M. Sylvain G. Cloutier, Ph.D, pour m'avoir permis de réaliser ce projet au sein de son laboratoire de recherche: Laboratoire de Caractérisation (LC).

Mes remerciements vont à ma co-directrice Mme Véronique François, PhD et professeur à l'ÉTS, pour sa disponibilité, ses conseils précieux dans le cadre de ce travail.

Merci à Nelson Landry, technicien au NOMAD (ÉTS), pour son ingéniosité et sa technicité.

Je veux remercier Luis Felipe Reyes Gerlein pour son aide particulière tout au long de ce projet ainsi que François R. Moisan et François-Xavier Fortier sans qui ce projet ne serait pas ce qu'il est.

Grand merci aussi à tous ces jeunes chercheurs du groupe du LC avec qui des échanges tant sur le travail que sur tout autre sujet intéressant m'ont permis d'apprendre toujours plus et d'éclairer mes idées le tout dans une ambiance des plus conviviales et constructives.

Mes sincères remerciements à monsieur Mamadou Cissokho et à sa famille pour avoir parrainé mon séjour au Canada durant toute la période de mes études qui ont abouti à la réalisation de ce travail.

Je remercie également madame Mimie Sané pour son soutien permanent tout au long de ce travail.

Merci au gouvernement du Québec qui, grâce à une entente avec le gouvernement du Sénégal, m'a permis de bénéficier d'une bourse d'exemption pour mon programme d'études.

Je souhaite remercier ma famille; en particulier mon épouse Fatou BA qui a su s'occuper, sans faute, de mes filles Aminata et Fatoumata. Merci à ma mère pour son appui sans bornes.

RÉALISATION D'UN SIMULATEUR SOLAIRE D_{65} A PARTIR DE DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES A SEMI-CONDUCTEURS POUR DES APPLICATIONS EN PHOTOVOLTAIQUE

Moussa BA

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est de réaliser un simulateur solaire par le biais d'une combinaison de diodes électroluminescentes (DELs) et d`une technologie très simple pour des applications de tests et de caractérisation de cellules solaires photovoltaïques. Le marché photovoltaïque dispose de simulateurs solaires performants mais leur coût exorbitant et leurs dimensions limitent leur utilisation à grande échelle. L'approche adoptée dans ce travail nous a permis de miniaturiser un simulateur solaire dont les caractéristiques spectrales et colorimétriques répondent aux différentes spécifications standards établies pour un simulateur solaire en général et pour des applications photovoltaïques en particulier pour un investissement de moins de 500 dollars. Les résultats obtenus montrent des caractéristiques telles que la température de couleur proximale (TCP), le match spectrale, l'uniformité spectrale ainsi que l'instabilité temporelle de l'irradiance qui illustrent parfaitement le modèle d'un simulateur solaire haut de gamme pour la caractérisation de cellules solaires photovoltaïques dans le domaine spectrale 350 nm - 900 nm. Certes les spécifications de l'ASTM, de l'IEC et de l'IJS relatives aux simulateurs solaires sont établies entre 400 nm et 1100 nm mais le domaine du visible de la lumière du jour renferme une énergie suffisante pour un fonctionnement optimal des systèmes photovoltaïques et bien d'autres applications spécifiques. La densité spatiale de puissance du simulateur solaire de classe A final (0.927 mW/cm^2) est très faible par rapport à la moyenne indiquée dans les standards (100 mW/cm^2). La résolution de ce problème relève d`une question d'ingénierie et, par conséquent, ne remet nullement en cause la qualité du travail effectué.

Mots clés: DELs à semiconducteurs, sources blanches, cellules solaires, énergie photovoltaïque

REALIZATION OF A D_{65} SOLAR SIMULATOR WITH SEMICONDUCTOR LIGHT-EMITTING DIODES FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

Moussa BA

ABSTRACT

The objective of this work is to provide a solar simulator through of a combination of light-emitting diodes (LEDs) and through of a very simple technology for test and characterization applications of photovoltaic solar cells. The photovoltaic market offers powerful solar simulators but their exorbitant cost and size limit their widespread use. The approach in this work has allowed us to miniaturize a solar simulator who's spectral and colorimetric characteristics correspond to different standard specifications for a solar simulator in general and for photovoltaic applications especially for an investment of less than $500. The results show characteristics such as correlated color temperature (CCT), spectral match, spatial uniformity and temporal instability of irradiance that perfectly illustrate the model of an upscale solar simulator for the characterization of photovoltaic solar cells in the 350 nm to 900 nm spectral range. While the specifications of ASTM, IEC and IJS on solar simulators are established between 400 nm and 1100 nm, the visible range of the daylight contains sufficient enough energy for optimal performance of photovoltaic systems and many other specific applications. The spatial power density of the A class solar simulator made (0.927 mW/cm^2) is very low compared to the average (100 mW/cm^2) shown in standards. Solving this problem is an engineering matter and, therefore, it does not compromise the quality of this work.

Keywords: LEDs semiconductors, white sources, solar cells, photovoltaic.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 SYSTÈME VISUEL HUMAIN ET LES GRANDEURS PHOTOMETRIQUES 7
1.1 Le système visuel humain 7
1.1.1 L'œil humain et la vision 7
1.1.1.1 Anatomie de l'œil 7
1.1.1.2 La rétine 8
1.1.1.3 Les éléments photosensibles 10
1.1.2 Sensibilité spectrale de l'œil humain 12
1.2 Les grandeurs photométriques 13
1.2.1 Flux lumineux 15
1.2.2 Intensité lumineuse 15
1.2.3 Luminance 16
1.2.4 Efficacité lumineuse du rayonnement 16
1.2.5 Distribution spectrale relative de puissance (SPD) ou d'énergie 17
1.2.6 Rendements quantiques 18
1.2.6.1 Rendement quantique externe 18
1.2.6.2 Rendement quantique interne 18

CHAPITRE 2 COLORIMETRIE 19
2.1 Introduction 19
2.2 Lois de Grassmann 19
2.3 Expérience d'égalisation des couleurs 20
2.4 Coordonnées et diagrammes de chromaticité 21
2.4.1 Valeurs tri-stimulus R, V, B 21
2.4.2 Observateur de référence de la CIE de 1931: Fonctions d'accord de couleurs 22
2.4.3 Coordonnées chromaticité et diagramme de chromaticité CIE 1931 26
2.4.3.1 Coordonnées de chromaticité 26
2.4.3.2 Diagrammes de chromaticité CIE 1931 27
2.4.3.3 Diagrammes de chromaticité uniformes: ellipses de McAdam 28

CHAPITRE 3 ILLUMINANTS ET SOURCES DE LA CIE 31
3.1 Introduction 31
3.2 Température de couleur 31
3.3 Illuminants de la CIE 34
3.3.1 Notion d'illuminant 34
3.3.2 Illuminants de la CIE 34
3.3.2.1 Illuminants classiques de la CIE 34
3.3.2.2 Illuminants de type lumière du jour 36

3.4 Sources standards de la CIE 44
3.4.1 Source artificielle simulant l'illuminant normalisée A 45
3.4.2 Sources simulant l'illuminant D_{65} de la CIE 45

CHAPITRE 4 SIMULATEURS SOLAIRES ET LEURS TECHNIQUES DE CARACTERISATION 47
4.1 Introduction 47
4.2 Présentation 47
4.3 Caractéristiques d'un simulateur solaire 49
4.3.1 Zone de couverture d'une surface test 49
4.3.2 Mode de fonctionnement 49
4.3.3 Profil spectral d'un simulateur solaire 50
4.3.3.1 Spectres de référence 50
4.3.3.2 "Spectral match" 52
4.3.3.3 Non-uniformité spatiale de l'irradiance 52
4.3.3.4 Instabilité temporelle de l'irradiance 53
4.4 Techniques de caractérisation et classification des simulateurs solaires 53
4.4.1 Techniques de caractérisation 53
4.4.1.1 Méthodes quantitatives 54
4.4.1.2 Méthode spectrale: Distribution de l'irradiance spectrale 60
4.4.2 Classification des simulateurs solaires 60

CHAPITRE 5 MATERIEL ET METHODES 63
5.1 Introduction 63
5.1.1 Structure d'une DEL à semi-conducteurs 63
5.1.2 Mouvement des charges et génération de la lumière 64
5.2 Propriétés photométriques des DELs 65
5.2.1 Intensité lumineuse des DELs 65
5.2.2 Luminosité des DELs 66
5.2.3 Flux lumineux des DELs 66
5.2.4 Efficacité lumineuse de radiation (LER) des DELs 67
5.2.5 Couleur des DELs 68
5.3 Contraintes de température et stabilité des DELs 70
5.4 Dispositif expérimental 72
5.4.1 Lot de (DELs) 72
5.4.2 Le circuit d'alimentation des DELs 74
5.4.3 Le système d'acquisition des données : le logiciel SpectraSuite™ 75
5.5 Vérification de la validité de SpectraSuite™ 77
5.5.1 Certification de SpectraSuite™ 77
5.5.2 Caractérisation d'un pointeur laser vert de longueur connue 77
5.6 Méthodologie 78
5.6.1 Approche expérimentale 78
5.6.2 Poids de chacune des composantes DELs 78

CHAPITRE 6 RÉALISATION D'UN SIMULATEUR SOLAIRE D_{65} A BASE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES 83
6.1 Méthodes de réalisation de sources blanches avec des DELs 83
6.1.1 Génération de lumière blanche par conversion du phosphore 83
6.1.2 Génération de lumière blanche par une DEL à puce de lumière blanche: méthode dite de Schubert ou de recyclage de photons 84
6.1.3 Génération de lumière blanche par combinaison de différentes couleurs 85
6.2 Réalisation du simulateur solaire D_{65} 86
6.2.1 Simulateur solaire D_{65} à huit DELs 86
6.2.2 Simulateur solaire D_{65} à dix LEDs 91
6.2.3 imulateur solaire D_{65} douze DEls 93
6.2.3.1 Non-uniformité spatiale de l`irradiance 96
6.2.3.2 Évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance 101
6.2.4 Simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs 102
6.2.4.1 Lissage du profil spectral de la SPD du simulateur solaire à quatorze DELs 106
6.2.4.2 Non-uniformité spatiale de l'irradiance 107
6.2.4.3 Évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance 108
6.2.4.4 Paramètres calibrations du simulateur solaire 109
6.2.4.5 Contribution spectrale de la DEL W54L5111 110
6.2.4.6 Mesure de densité de puissance sur une surface test distante de 10 cm du simulateur solaire D_{65} 111
6.2.4.7 Position du simulateur par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système CIE (u, v) 1960 115

CONCLUSION 117

ANNEXE I SPÉCIFICITÉS DES ILLUMINANTS FLUORESCENTS STANDARDS 119

ANNEXE II LOWESS SMOOTHED $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ AND $S_2(\lambda)$ EIGENVECTOR 123

ANNEXE III LOWESS SMOOTHED D_{50}, D_{60}, D_{65}, D_{70}, D_{75}, ID_{50} AND ID_{65} SPECTRA 137

ANNEXE IV SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF SPRAGUE INTERPOLATED DAYLIGHT ILLUMINANTS: D_{50}, D_{55}, D_{60}, D_{65}, D_{70} and D_{75} 151

ANNEXE V CALCULATION OF THE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF A PHASE OF DAYLIGHT WITH ARBITRARY EQUALLY SPACED SAMPLING 165

ANNEXE VI CERTIFICAT DE CALIBRATION DE SPECTRASUITE 167

ANNEXE VII QUELQUES SECTIONS DES FICHES TECHNIQUES DES DELs COMPOSANT LE SIMULATEUR SOLAIRE D65 A QUATORZE DELs 169

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 207

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Quelques valeurs de la fonction de l'efficacité spectrale relative V(λ) à certaines valeurs de longueur d'onde 13

Tableau 3.1 Impression liée à la température de couleur proximale dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931 33

Tableau 3.2 Illuminants classiques de la CIE 36

Tableau 3.3 Caractéristiques colorimétriques des illuminants de type "lumière du jour" 40

Tableau 4.1 Distribution spectrale de l'irradiance d'un spectre de référence pour quelques modes, donnée en pourcentage par intervalles de longueurs d'onde de 100 nm, telle qu'illustré dans la norme ASTM E927-10 51

Tableau 4.2 Échantillons de couleur tests de la CIE utilisés pour le calcul du CRI 55

Tableau 4.3 Appréciation du rendu des couleurs en fonction de la valeur du CRI 56

Tableau 4.4 Catégorisation des sources sur la base de l'indice de métamerisme 60

Tableau 4.5 International standards for solar simulation performance 61

Tableau 5.1 Sommaire des projections sur les performances et le prix des DELs blanches froides et blanches chaudes 67

Tableau 5.2 Les différentes composantes DELs du simulateur solaire D_{65} 73

Tableau 5.3 Caractéristiques de la source LS-1-CAL 76

Tableau 5.4 DELs composant le simulateur solaire D_{65} dont la variation de l'intensité lumineuse influe considérablement sur les caractéristiques colorimétriques 79

Tableau 5.5 DELs dont la variation de l'intensité lumineuse influe faiblement sur les caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} 81

Tableau 6.1 Référence des huit DELs composant le simulateur solaire D_{65} 87

Tableau 6.2 Comparaison des caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} à huit DELs à celles de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE 90

Tableau 6.3 Classes du simulateur solaire D_{65} à douze DELs du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance en fonction de la distance du simulateur à la surface test et de l'aire de la surface illuminée 100

Tableau 6.4 Références des quatorze DELs composant le simulateur solaire D_{65} 103

Tableau 6.5 Classe du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance en fonction de l'aire d'une surface teste distante de 10 cm 108

Tableau 6.6 Puissance optique totale P_{opt} du simulateur solaire à quatorze DELs et la contribution en puissance (en %) de chacune de ses composantes DELs..... 110

Tableau 6.7 Densité spatiale de puissance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs sur differentes sections de surface en fonction du rayon d'illumination d'une surface test distante de 10 cm 113

Tableau 6.8 Coordonnées de chromaticité du simulateur solaire à quatorze DELs comparées à celles de l'illuminant normalisé D_{65} dans les systèmes CIE (x, y) 1931 et CIE (u, v) 1960 115

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Coupe horizontale de l'œil....8

Figure 1.2 Diagramme simplifié de l'organisation de la rétine....9

Figure 1.3 **a.** Distribution des cônes et des bâtonnets dans la rétine
b. Aperçu de l'échantillonnage des photorécepteurs sur la rétine 10

Figure 1.4 Sensibilité spectrale des différents types de récepteurs à la longueur d'onde de la lumière....11

Figure 1.5 Fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale photopique V(λ) et scotopique V'(λ) normalisées tel que spécifiées par la CIE 1931 14

Figure 1.6 Différents niveaux de conversion de l'énergie au sein d'une DEL 16

Figure 2.1 Expérience classique pour la reproduction d'une couleur blanche....21

Figure 2.2 Fonctions spectrales standard r(λ), v(λ) et b(λ) du système CIE-RVB 1931 à 2^o. 23

Figure 2.3 Fonctions standards d'accord de couleurs x(λ), y(λ) et z(λ)et $x_{10}(\lambda)$,$y_{10}(\lambda)$ et $z_{10}(\lambda)$ des systèmes respectifs CIE XYZ 1931 et CIE XYZ 1964 26

Figure 2.4 Diagramme de chromaticité CIE (x,y) 1931 à 2^o....28

Figure 2.5 Ellipses de MacAdam 29

Figure 2.6 Allure des ellipses de MacAdam dans le diagramme CIE (u', v') 1976 ...30

Figure 3.1 Locus de Planck avec quelques isothermes dans le diagramme de chromaticité CIE (u', v') 1976....32

Figure 3.2 Profils spectraux des SPDs des illuminants A, B, C et E de la CIE 35

Figure 3.3 Position du locus des illuminants de la série D par rapport à celui de Planck dans le système CIE 1960 UCS 37

Figure 3.4 Profils spectraux des fonctions $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$ 42

Figure 3.5 Profil spectral polissé de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE 42

Figure 3.6 Concept de sources et d'illuminants 44

Figure 4.1 Model 94063A de la gamme Sol3A (insert haut gauche) de simulateurs solaires d'Oriel Instruments 48

Figure 4.2 Dimensions en pouces (mm) du model 94063A de la gamme Sol3A de simulateur solaire d'Oriel Instruments..... 48

Figure 4.3 Dépendance du mode d'une phase de lumière du jour en fonction de l'inclinaison du rayon solaire par rapport au zénith..... 51

Figure 5.1 Structure énergétique d'un semi-conducteur à bande interdite directe dans l'espace des phases 64

Figure 5.2 Diagramme simplifié d'une jonction p-n d'une diode à semi-conducteurs montrant le mouvement des électrons et des trous lorsqu'une tension positive est appliquée 65

Figure 5.3 Dépendance du flux lumineux φ_{lum} et du rendement lumineux externe η_L d'une DEL blanche ultra puissante entre 20 et 1000 mA. φ_v, V_f, η_L, T_{cp} et (x, y) à 350 mA avaient pour valeurs respectives 203 lm, 3.18 V, 183 lm W^{-1} 4700 K et (0.36, 0.39) 66

Figure 5.4 Énergie de la bande interdite et longueurs d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires. Les barres grises correspondent aux semi-conducteurs à bande interdite directe et celles sombres aux semi-conducteurs à bande interdite indirecte. La courbe continue représente la sensibilité de l'œil humain, V (λ) exprimée ici en fonction de l'énergie de la bande interdite 68

Figure 5.5 Puissances de sortie normalisées en fonction de la température de jonction mesurée à des desnsités de courant variant de 5 à 50 $A.cm^{-2}$ pour des puces DELs de différentes dimensions 70

Figure 5.6 Une DEL produit une lumière sensiblement quasi-monochromatique mais son intensité et sa largeur spectrale dépendent fortement de la température de la jonction..... 71

Figure 5.7 Dépendance de la durée de vie d'une DEL en fonction du courant d'alimentation et de la température de la jonction..... 72

Figure 5.8 Circuit d'alimentation en courant **a.** pour les mono-DELs, **b.** pour les multi-DELs 75

Figure 5.9 Bouchon support des DELs à l'entrée de la sphère intégratrice : **a.** vue de face et **b.** vue de de profil..... 76

Figure 5.10 Montage expérimental de calibration du spectromètre Jaz..... 76

Figure 6.1 Génération de lumière blanche par conversion du phosphore 84

Figure 6.2 Génération de lumière blanche par une DEL à puce de lumière blanche 84

Figure 6.3 Génération de lumière blanche par une combinaison de DELs de couleurs différentes 85

Figure 6.4 Montage expérimental du processus de calibration du simulateur solaire D_{65} 88

Figure 6.5 Schéma simplifié du montage expérimental utilisé pour la calibration du simulateur solaire D_{65} 88

Figure 6.6 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à huit DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE 89

Figure 6.7 "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à huit DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM 90

Figure 6.8 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à dix DELs comparé à celui de la DEL de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE 92

Figure 6.9 "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à dix DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM 93

Figure 6.10 Caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} à douze DELs 94

Figure 6.11 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à douze DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE 95

Figure 6.12 "Spectral match"de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à douze DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM 96

Figure 6.13 Dispositif expérimental pour la mesure de la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire à douze DELs 97

Figure 6.14 Technique d'évaluation de la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} 97

Figure 6.15 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à douze DELs sur une surface test située à 10 cm 98

Figure 6.16 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à douze DELs sur une surface test située à 15 cm 99

Figure 6.17 Instabilité temporelle de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à douze DELs mesurée sur un intervalle de temps de 300 s par pas de 5 ms 101

Figure 6.18 Caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs 104

Figure 6.19 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à quatorze DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE ... 105

Figure 6.20 "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM 105

Figure 6.21 Profil spectral lissé de la SPD du simulateur D_{65} à quatorze DELs en tenant compte des ellipses de MacAdam comparé à celui de la SPD de l'illuminant D_{65}. 106

Figure 6.22 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs sur une surface teste située à 10 cm 107

Figure 6.23 Instabilité temporelle de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs mesurée sur un intervalle de temps de 300 s par pas de 5 ms 109

Figure 6.24 Contribution en SPD de la DEL W54L5111P sous une alimentation d'un courant de 0.31 mA et à la température de la salle dans la SPD du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs..... 111

Figure 6.25 Montage de la mesure de la densité spatiale de puissance du simulateur solaire à quatorze DELs sur une surface test distante de 10 cm 113

Figure 6.26 Variation de la densité spatiale de puissance du simulateur D_{65} à quatorze DELs en fonction du rayon d'illumination r_i sur une surface test distante de 10 cm 114

Figure 6.27 Position du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système CIE (u, v) 1960 116

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American society for testing and materials
AM 1.5G	Mode d'ensoleillement AM1.5 Global
c	Célérité de la lumière dans le vide
CCT	Correlated color temperature (ou Température de couleur proximale : TCP)
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CIEL*a*b*	CIE color espace CIEL*a*b*
CIEL*u*v*	CIE color espace CIEL*u*v*
CIE UVW	CIE color espace CIE UVW
CREE	Compagnie multinationale dans le domaine la fabrication de LEDs à semiconducteurs
CRI	Color rendering index
D	Distance entre la source et le détecteur
DIN	Deutsches Institut Fur Normung
$E(\lambda)$	Énergie des photons émis à la longueur d'onde λ
E_C	Énergie de la bande de conduction
E_g	Énergie de la bande interdite
E_V	Énergie de la bande de valence
E_{max}	Irradiance spectrale maximale
E_{min}	Irradiance spectrale minimale
FWHM	Full width half maximum
γ	Facteur de perte
$\phi(\lambda)$	Flux de photons
$\phi_{détecteur}$	Flux reçu par le détecteur

ϕ_{lum}	Flux lumineux
ϕ_R	Flux rayonné
h	Constante Planck
IPTS	International practical temperature scale
I	Irradiance spectrale
I_0	Irradiance spectrale de référence
I_V	Intensité lumineuse
IEC	International Electrical Commission
ipRGC	Intrinsically photosensitive retinal ganglion cell*s*
I_S	Intensité de courant traversant la source
InGaN	Indium gallium nitride
IR	Infrarouge
IRC	Indice de rendu de couleur
ISO	International of standard organization
JIS	Japanese industrial standard
k	Constante de Boltzmann
k_B	Constante de Stephan-Boltzmann
L	Luminance en watt.m^{-2}
LC	Laboratoire de caractérisation
λ	Longueur du rayonnement
λ_d	Longueur dominante
λ_{max}	Longueur d'onde maximale
λ_{min}	Longueur d'onde minimale
λ_{pic}	Longueur d'onde pic

LED (s)	Light Emitting diodes
$L_e(\lambda)$	Luminance énergétique spectrale en watt.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}
LER	Luminious efficiency of radiation
MI	Indice de métamérisme (Metamerism index)
MI_{uv}	Indice de métamérisme dans le spectre ultraviolet
MI_{vis}	Indice de métamérisme dans le spectre visible
M_1; M_2	Facteurs dépendant des valeurs de coordonnées de chromaticité x_D et y_D
$N(\lambda)$	Flux de photons émis à la longueur d'onde λ
N_{ext}	Nombre de photons sortant de la LED à une longueur d'onde donnée
NIST	National institute of standard of technology
η_{conv}	Rendement de conversion
η_L	Rendement lumineux
η_q	Rendement quantique
η_R	Rendement de conversion de puissance rayonnée en puissance lumineuse
ν	Fréquence du rayonnement
P_E	Puissance électrique
P_{lum}	Puissance lumineuse
PLE	Couche plexiforme externe
PLI	Couche plexiforme interne
PV	photovoltaïque
q	Charge élémentaire
r	Rayon de la surface réceptrice du détecteur
RVB	Primaires R, V et B du système RGB CIE 1931
SHP	Super-high Power

R_a	Indice de rendu de couleur global
R_i	Indice de rendu de couleur spécial
R.L. GmbH	Roithner Lasertechnik GmbH
SPD	Spectral of power density
S_{NE}	Non-uniformité spectrale de l'irradiance
$\psi(\lambda)_{lum}$	Flux lumineux
TC	Technical comity
TCS	Test colour samples
T	Température
TCP	Température de couleur proximale (ou Température de couleur corrélée)
T_{IE}	Instabilité temporelle de l'irradiance
UHP	Ultra High Power
UV	Spectre ultraviolet
$V(\lambda)$	Fonction d'efficacité lumineuse spectrale relative normalisée de l'œil humain en mode photopique
$V`(\lambda)$	Fonction d'efficacité lumineuse spectrale relative normalisée de l'œil humain en mode scotopique
X	Valeur de stimulus associée au premier primaire
x_D	Abscisse d'un illuminant de la série D dans le système CIE (x, y) 1931
Y	Valeur de stimulus associée au second primaire (luminance)
y_D	Ordonnée d`un illuminant de la série D dans le système CIE (x, y) 1931 x_D
YAG-Ce	Yttrium Aluminum Garnet doped with Cerium
Z	Valeur de stimulus associée au troisième primaire

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

C	Coulomb
cm	Centimètre
^{o}C	Degré Celsius
Cd	Candéla
$Cd.A^{-1}$	Candéla par ampère
$Cd.m^{-2}$	Candéla par mètre carré
Hz	Hertz
Ω	Ohm
KΩ	Kilo ohm
^{o}K	Degré Kelvin
mA	Milliampère
ms	Milliseconde
$m.s^{-1}$	Mètre par seconde
mW	Milliwatt
µm	Micromètre
nm	Nanomètre
$	Dollar
g	Gramme
J.s	Joule seconde
lm	Lumen
Klm	Kilo lumen
lm/W	Lumen par watt
Sun	Équivalent de 1370 $W.m^{-2}$
V	Volt
W	Watt

INTRODUCTION

1. Historique

Les technologies de l'éclairage sont principalement nées du besoin de suppléer à la lumière solaire. De la préhistoire à nos jours, quatre types de technologies ont été successivement développées: tout d'abord bien sûr les lampes à combustion (huile, gaz) puis, à partir de 1880, les lampes à incandescence (filament chaud de tungstène sous gaz inerte ou halogène). Ensuite, depuis les années cinquante, les lampes à décharge (tubes fluorescents à mercure, lampes à vapeur de sodium) et finalement depuis 1968 (Mottier, 2009), les diodes électroluminescentes (DELs) avec la commercialisation de la première DEL qui produisit une radiation rouge d'à peine 0.001lumens. Plusieurs critères permettent de classer ces différentes sources lumineuses: le coût (achat, fonctionnement, durée de vie), les caractéristiques de la lumière émise (température de couleur, le rendu de couleur), l'impact environnemental (rendement énergétique de conversion lumière/électricité, fabrication et recyclage) et les applications qui deviennent de plus en plus nombreuses. Devant toute cette diversité, la perception que l'homme peut avoir de la lumière peut varier selon les conditions d'utilisation, environnementales, etc., encore mieux, une perception obtenue dans des conditions fixées pour une application donnée peut différer d'un individu à l'autre. Dès lors, le choix des critères de performance des sources doit être étudié et spécifié selon l'application visée afin de garantir l'uniformité et la reproductibilité des mesures et des systèmes associés. C'est dans ce cadre que la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) ainsi que d'autres organismes de normalisation tels que l'American Society for Testing and Materials (ASTM), l'International Electrotechnical Commission (IEC) et le Japanese Industrial Standard (JIS) ont établi des normes visant à caractériser et à évaluer la performance des sources lumineuses ou des objets qu'elles illuminent selon le type d'application et à normaliser l'utilisation de ces dernières pour garantir la fiabilité et la sécurité. Ces différents standards sont présentés sous forme de recommandations ou modélisés sous forme de fonctions mathématiques ou encore de tables de données numériques. Ces normalisations constituent les références universelles de toute mesure colorimétrique, de caractérisation et d'évaluation des performances des sources lumineuses, des objets qu'elles illuminent et de bon nombre d'applications spécifiques émergentes. Parmi

ces différents standards, les illuminants de la CIE occupent une importance particulière. Un illuminant standard est une source théorique, parfois non réalisable physiquement, établie sous forme de tables de données par un organisme de normalisation et considéré comme le modèle optimal d'un type de sources, d'une phase ou de la moyenne des phases d'une source. La CIE a défini plusieurs illuminants pour:

- assurer la reproductibilité des mesures colorimétriques et la caractérisation de systèmes avec exactitude,
- rationnaliser et ordonner l'utilisation des ressources énergétiques issues des sources lumineuses à cause du développement et de la diversité des technologies lumineuses et de leurs applications.

Les sources destinées à représenter les phases de la lumière du jour sont appelées des simulateurs solaires. La CIE a recommandé plusieurs simulateurs solaires selon le type d'application. Parmi ces derniers, nous avons porté notre intérêt sur l'illuminant standard (ou simulateur solaire normalisé) D_{65}. L'illuminant normalisé D_{65} de la CIE est considéré comme étant la meilleure représentation du profil spectral de la moyenne des phases de la lumière du jour à ciel couvert dans l'hémisphère nord. Notre choix porté sur cet illuminant se justifie par le fait que, en plus qu'il soit la référence universelle des principales applications colorimétriques, il présente un intérêt particulier dans la caractérisation et l'évaluation des performances des cellules solaires photovoltaïques.

2. Problématique

Une des problématiques majeures liée à l'utilisation des simulateurs solaires dans la caractérisation de systèmes photovoltaïques est principalement économique. La technologie actuelle prévoit des rendements théoriques de conversion de plus 86,8% mais dans la pratique, sous l'illumination d'un Sun (soit ≈ 1370 $W.m^{-2}$), les rendements sont d'environ 29% en laboratoire (Homsberg and Bowden, 2013). Des simulateurs solaires performants à lampes à arc de xénon sont déjà disponibles sur le marché mais à des coûts exorbitants (50.000 $ l'unité) et sont assez lourds. Aussi, le spectre du xénon est caractérisé par de nombreux pics atomiques transitoires persistants et indésirables, ce qui rend son utilisation peu convenable pour certaines applications très sensibles aux fluctuations spectrales. Des

filtres sont utilisés dans certains simulateurs solaires pour modifier le spectre de leurs sources afin qu'il représente le mieux possible des conditions d'illumination solaire spécifiques; cependant, ces filtres ne sont pas en mesure d'éliminer les intensités des pics multiples du spectre de la lampe de xénon encore moins de simuler les absorptions atmosphériques dues à l'eau, au dioxyde de carbone, à l'ozone et au gaz carbonique (Hamadani and al., 2011). Des simulateurs solaires à base de lampes à mercure s'offrent à des coûts moindres avec des dimensions raisonnables mais présentent des stabilités limitées. La stabilité d'une source est un élément essentiel pour sa caractérisation d'une part ainsi que pour son utilisation dans des applications spécifiques tels que le test d'un système photovoltaïque d'autres parts. Ces dernières années, des études ont porté sur la faisabilité, le design et la fabrication de simulateurs solaires à base de DELs fonctionnant aussi bien en mode statique qu'en mode pulsé. Quelques-unes de ces études ont montré qu'avec un nombre limité de DELs à forte puissance choisi, principalement ayant des longueurs d'onde pic qui s'étendent du domaine du visible au proche infrarouge, il est possible de réaliser un simulateur solaire du mode AM 1.5G de classe B en uniformité spatiale de l'irradiance spectrale avec une intensité d'illumination d'un Sun ($\approx$1370 $W.m^{-2}$) sur une surface test de 10 x 10 cm^2. Plus récemment, un groupe du National Institut of Standards and Technology a démontré la possibilité de réaliser un simulateur solaire du mode AM 1.5G de classe B en uniformité spatiale de l'irradiance spectrale à l'aide d'un réseau de plusieurs DELs sur une surface test de 25 x 50 cm^2 (Hamadani and al., 2011). Une technologie plus simple permettrait de réaliser des simulateurs solaires à base de DELs plus performants du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance spectrale sur des surfaces test comparables et de faciliter l'intégration à grande échelle de ce type de simulateurs solaires dans le marché. Aussi, bien que la technologie photovoltaïque connaisse des développements et une expansion assez prometteurs, les coûts de la mise en œuvre des systèmes restent élevés avec des rendements plus ou moins faibles. Or, la croissance et la rentabilité de cette technologie doivent nécessairement être soutenues par la baisse des coûts technologiques. Dès lors, une miniaturisation du simulateur solaire D_{65} par des moyens abordables pourrait en être un pas important. C'est dans ce cadre que nous avons porté notre intérêt sur la réalisation expérimentale d'un simulateur solaire D_{65} à base de DELs pour la caractérisation de systèmes photovoltaïques.

3. Objectifs

Dans ce travail, on se propose de réaliser expérimentalement un simulateur solaire ayant des caractéristiques photométriques aussi proches que possible celles de l'illuminant standard D_{65}, avec un profil spectral extrapolé aussi loin que possible vers la longueur λ_{max} = 1100 nm tel que spécifié pour la simulation de cellules solaires photovoltaïques, par une association de spectres lumineux d'un nombre limité de diodes électroluminescentes. Aucune source représentant l'illuminant normalisé D_{65} n'est pour le moment standardisée par la CIE mais cette dernière a autorisé l'utilisation de sources respectant certaines conditions d'utilisations pour des applications particulières. L'objectif premier de ce travail est de contribuer à la réduction des coûts de mise en œuvre des systèmes photovoltaïques; ce qui est un paramètre essentiel pour leur rentabilité et pour leur intégration, particulièrement dans les pays à faibles revenus avec fort potentiel solaire.

4. Plan de travail

Ce mémoire est structuré en six chapitres.

Au CHAPITRE 1, une présentation du système visuel humain ainsi que celle des principales caractéristiques photométriques des sources lumineuses ont été faites. Le CHAPITRE 2 détaille quelques caractéristiques, systèmes et standards de la CIE relatifs à la colorimétrie. Le CHAPITRE 3 donne en détails les caractéristiques colorimétriques et spectrales des illuminants et des sources de la CIE. Une comparaison succincte entre les concepts d'illuminants et de sources y est abordée en fin de chapitre. Au CHAPITRE 4, sont présentées les différentes caractéristiques ainsi que les différentes techniques de caractérisation des simulateurs solaires. Le CHAPITRE 5 donne en première partie un rappel sur les propriétés photométriques des DELs. Une présentation du matériel expérimental et de la méthodologie utilisés pour la réalisation et la caractérisation expérimentales du simulateur solaire D_{65} est détaillée dans la deuxième partie du chapitre. Au CHAPITRE 6 sont détaillées les étapes de réalisation du simulateur solaire D_{65} suivies d'une discussion des résultats

obtenus afin d'évaluer la pertinence du travail effectué. Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats.

CHAPITRE 1

SYSTÈME VISUEL HUMAIN ET LES GRANDEURS PHOTOMETRIQUES

1.1 Le système visuel humain

Depuis la fin du XIXème siècle, l'étude de la vision ne se limite plus à l'étude optique de l'œil mais davantage à l'étude physiologique du système visuel dans son ensemble. La comparaison de l'œil à un dispositif photographique paraît difficile, voire incongrue, car l'étude de l'œil ne permet pas d'expliquer à lui seul notre perception visuelle. L'image formée sur la rétine est différente de celle que l'on obtient avec un appareil photographique. Cependant, une compréhension approfondie de la science des couleurs repose essentiellement sur le principe de fonctionnement du système visuel humain et de son traitement des scènes. L'intérêt de ce chapitre est de montrer la relation qui lie la puissance du rayonnement électromagnétique reçu par l'œil humain et le flux lumineux perçu. Ce dernier joue un joue un rôle primordial dans l'étude de la performance des sources lumineuses.

1.1.1 L'œil humain et la vision

1.1.1.1 Anatomie de l'œil

L'œil adulte est un globe quasi sphérique d'un diamètre sagittal de 24 mm et avec un poids d'environ 7g (Guillo, 2004). Il est entouré d'une enveloppe fibreuse, appelée la sclérotique, limitée en avant par une partie bombée transparente: la cornée, qui constitue avec l'humeur aqueuse l'élément optique principal. L'œil, dont le pivotement est assuré par trois paires de muscles est relié au cerveau par le nerf optique. La figure 1.1 donne une coupe horizontale de l'œil humain montrant les différentes parties fonctionnelles du système visuel.

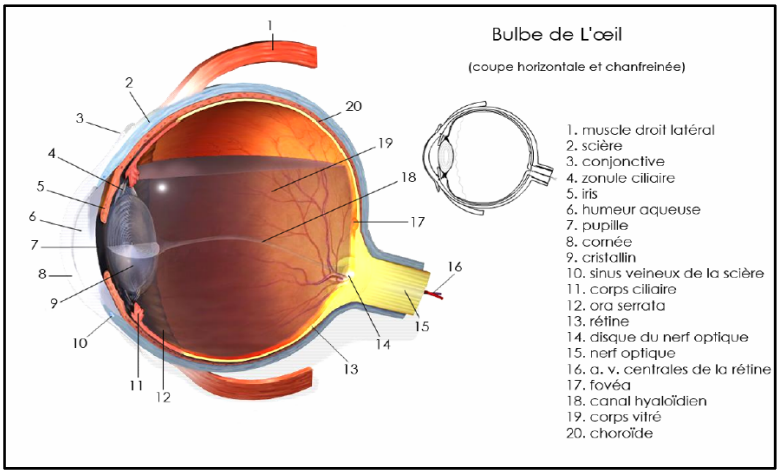


Figure 1.1 Coupe horizontale de l'œil
Tirée de Guillo (2004)

La partie intérieure de la sclérotique est tapissée d'une tunique vasculaire pigmentée qui absorbe la lumière et qui s'étend de l'arrière de l'œil jusqu'à l'iris. Nommée choroïde, elle est recouverte par la rétine qui constitue la partie photosensible de l'œil, et dont le prolongement des cellules nerveuses est relié au nerf optique. La cavité intérieure de l'œil contient deux liquides biologiques: le corps vitré, une gelée transparente, et l'humeur aqueuse qui sont séparés par une lentille biologique, le cristallin. Notre étude sur le traitement de l'information visuelle commencera par la rétine, tous les éléments antérieurs ne seront pas considérés dans la suite.

1.1.1.2 La rétine

La rétine est l'une des plus importantes partie de l'anatomie de l'œil dans la vision des objets colorés. Cette membrane mince, d'environ 250 μm d'épaisseur a une grande sensibilité à la lumière et participe au traitement des informations, avant de les transmettre au cerveau via le nerf optique. La rétine est constituée d'un assemblage de cellules de différents types, organisées en couches et ayant des propriétés particulières. La figure 1.2 montre l'organisation de ces couches cellulaires. On y trouve une première couche constituée de photorécepteurs avec une répartition très inégale, à la fois spatiale et numéraire, soit d'environ 100 à 120 millions de bâtonnets et 5 à 8 millions de cônes (Guillo, 2004; Wei, 2011) qui captent l'information lumineuse, une deuxième couche de cellules horizontales, de

cellules bipolaires et de cellules amacrines et enfin une troisième couche constituée des cellules ganglionnaires. Ces couches sont séparées par des zones de connexions synaptiques: la couche plexiforme externe (PLE) et la couche plexiforme interne (PLI). Un aperçu de l'échantillonnage des photorécepteurs sur la rétine est représenté à la figure 1.3 (a) et la variation de la concentration des photorécepteurs sur la figure 1.3 (b). La zone centrale (faible excentricité) ne contient que des cônes, elle constitue la fovéa. La densité des cônes y est d'environ 147.000 par millimètre carré, mais elle décroît rapidement vers l'extérieur, correspondant à un champ visuel de 10 degrés, à 5.000 par millimètre carré (Guillo, 2004). En raison du très faible pas d'échantillonnage des photorécepteurs, on y note une vision de jour de haute précision et une vision de très faible sensibilité dans l'obscurité du fait de l'absence de bâtonnets.

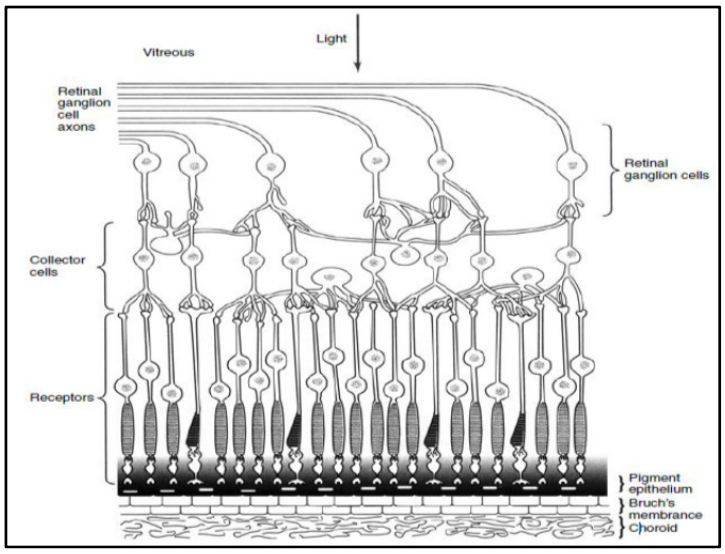


Figure 1.2 Diagramme simplifié de
l'organisation de la rétine
Tirée de Wei (2011)

La zone d'excentricité moyenne (parafovéa) comporte une faible proportion de cônes et une population de bâtonnets croissante. Dans cette zone la vision de jour est moins précise, mais la vision en obscurité est performante. Enfin, pour les fortes excentricités, les cônes sont presque absents et laissent la place aux bâtonnets. On remarque aussi le disque optique. C'est une zone de la rétine dépourvue de capteur, car c'est à cet endroit que les axones des

neurones qui constituent le nerf otique se rejoignent pour partir en direction du cerveau. Cette zone est aussi appelée *"tâche aveugle"*.

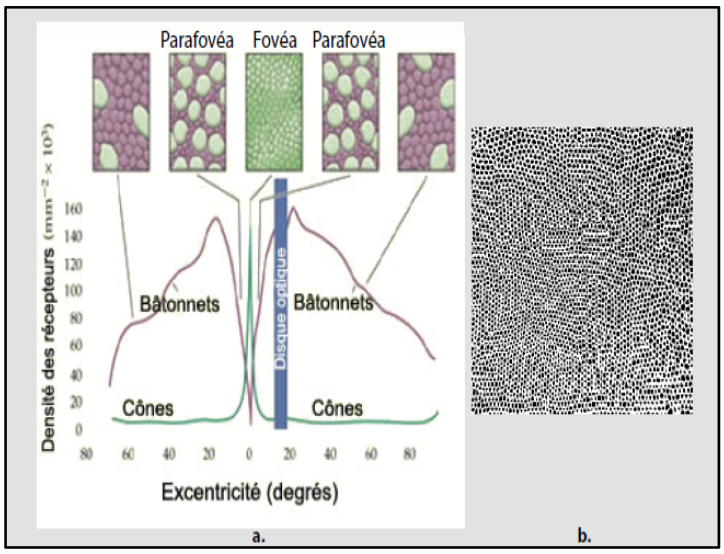


Figure 1.3 **a.** Distribution des cônes et des bâtonnets dans la rétine **b.** Aperçu de l'échantillonnage des photorécepteurs sur la rétine
Tirée de Benoit (2007)

1.1.1.3 Les éléments photosensibles

Au niveau de la rétine, il existe des cellules photosensibles appelées neurones électriquement excitables qui sont en mesure de traiter et de véhiculer l'information sous forme de signaux électriques et/ou chimiques au sein de notre corps. Ces cellules photosensibles sont appelés photorécepteurs. Un photorécepteur est un neurone particulier sis sur la rétine qui a la capacité de convertir le stimulus lumineux en un potentiel de membrane pouvant provoquer le déclenchement d'un processus biologique. Les photorécepteurs de l'œil sont essentiellement constitués des bâtonnets et des cônes. Un troisième photorécepteur découvert en 2002 (Wei, 2011), et appelée cellule ganglionnaire rétinienne intrinsèquement photosensible (**ipRGC** pour *"**I**ntrinsically **P**hotosensitive **R**etinal **G**anglion **C**ells"* en anglais), a pour rôle d'établir une relation entre la neurophysiologie et la photobiologie circadienne. Les bâtonnets et les cônes contiennent des photopigments chimiques qui réagissent sous l'action de la lumière pour déclencher des signaux électriques. Ces signaux

suivent un réseau de neurones, arrivent au fond de l'œil et longent le nerf optique qui les conduit vers le cerveau. La principale différence entre les bâtonnets et les cônes réside dans leur fonction visuelle. Les bâtonnets sont actifs sous de faibles niveaux de lumière (luminance < 0.003 $cd.m^{-2}$) avec un maximum de sensibilité vers 510 nm et sont responsables de la vision scotopique (ou nocturne) (E. Fred Schubert, 2006). La particularité des bâtonnets est qu'ils ne fournissent qu'une réponse photométrique et ne permettent donc pas de distinguer les couleurs. Ils sont très sensibles à la lumière et ont une réponse lente aux variations d'illumination. Quant aux cônes, ils sont responsables de la vision photopique ou diurne (luminance > 3 $cd.m^{-2}$) (E. Fred Schubert, 2006) et fournissent une réponse photométrique et chromatique grâce à leurs photopigments. Des études portées sur ces pigments visuels par micro-spectrophotométrie ont permis de vérifier les théories de Young et Helmholtz, de la perception trichrome des couleurs par les cônes de la rétine. Ces études ont montré l'existence de trois types de cônes contenant des photopigments dont les domaines d'absorption spectrale sont répartis dans le domaine du visible, avec approximativement des pics à 440, 530 et 570 nm (Benoit, 2007). On dit que la vision colorée est par nature trichromatique. La figure 1.4 donne une approximation du profile des fonctions de sensibilité spectrale des bâtonnets et des trois types de cônes.

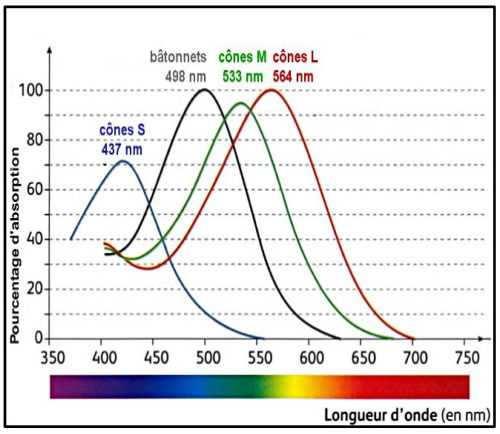


Figure 1.4 Sensibilité spectrale des différents types de récepteurs à la longueur d'onde de la lumière
Tirée de Nguyen (2012)

Lorsque la luminosité est comprise entre 0.003 $cd.m^{-2}$ et 3 $cd.m^{-2}$ (E. Fred Schubert, 2006) les bâtonnets et les cônes sont actifs simultanément et on parle de vision mésopique. Les trois types de cellules horizontales, bipolaires, amacrines de la deuxième couche et les cellules ganglionnaires de la troisième couche ne sont pas des photorécepteurs mais jouent un rôle important dans le processus visuel. Les cellules horizontales réagissent aux éclairements des régions rétiniennes larges et participent principalement à l'ajustement automatique de la sensibilité, ce qui permet en outre de percevoir d'importants écarts de luminance, en faisant varier la sensibilité des photorécepteurs. De la même manière, les cellules amacrines intègrent les informations de larges étendues rétiniennes, mais cette fois pour interagir sur l'ajustement de l'équilibre chromatique des signaux reçus des photorécepteurs, sous forme de variations échelonnées de potentiels gradués. Quant aux cellules ganglionnaires, un de leurs principaux rôles est de modifier profondément l'information en train d'impulsions électriques pour le nerf optique.

1.1.2 Sensibilité spectrale de l'œil humain

Le spectre électromagnétique est constitué de l'ensemble des radiations possibles du rayonnement électromagnétique allant des longueurs d'ondes courtes aux longueurs d'ondes longues. Tout ce domaine spectral n'est pas visible par l'œil humain. La lumière visible n'est qu'une petite partie comprise entre 380 nm et 780 nm de ce spectre. De plus, le comportement de l'œil vis-à-vis d'un rayon lumineux dépend de la longueur d'onde, du cône d'acceptance et de l'observateur avec les qualités et les défauts propres à chaque individu. A énergie égale, les rayonnements des extrémités du spectre visible sont moins facilement perceptibles que ceux de la partie centrale. Cependant, l'œil humain est capable de discerner plus de 350.000 couleurs différentes (Gillet, 2008). Dès lors, pour éviter d'éventuelles disparités sur la façon de concevoir la lumière perçue, la (CIE) a standardisé en 1924 une fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil-type (ou fonction de sensibilité relative ou de correction de l'œil) notée $V(\lambda)$ entre 360 nm et 830 nm. Cette fonction est obtenue en moyenne des données expérimentales d'observations colorimétriques effectuées par différents individus qui représente la sensibilité de l'œil humain moyen (ou *"œil-type"*) en fonction de la longueur d'onde. L'*"œil-type"* correspond à l'œil d'un sujet moyen âgé de 32

ans recevant des niveaux de lumière usuels sous un angle d'observation de 2^{o} (CVRL, 2013). Dès lors, pour évaluer le comportement de l'œil vis-à-vis d'un rayonnement donné, il convient de pondérer le flux de ce dernier et toutes ses grandeurs énergétiques par l'efficacité lumineuse du rayonnement $V(\lambda)$ à chaque longueur d'onde du spectre visible. La fonction $V(\lambda)$ est une fonction de normalisation, centrée à $555\ nm$, qui exprime la relation entre le flux lumineux perçu par l'œil humain et la puissance du rayonnement électromagnétique reçu. Le tableau 1.1 donne quelques valeurs de la fonction V(λ) à certaines longueurs d'ondes.

Tableau 1.1 Quelques valeurs de la fonction de l'efficacité spectrale relative V(λ) à certaines valeurs de longueur d'onde
Tiré de C. Baillet (2005)

λ (nm)	400	450	500	**555**	600	650	700
V(λ)	$4\ 10^{-4}$	$3{,}8\ 10^{-2}$	0.323	**1**	0,631	0,107	$4{,}1\ 10^{-2}$

En 1951, la CIE a adjoint une autre fonction d'efficacité lumineuse renforçant la sensibilité de l'œil-type aux faibles niveaux de lumière. Cette fonction centrée à $507\ nm$ correspond à la vision scotopique. La figure 1.5 donne les profils des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relatives normalisées de l'œil en mode photopique V(λ) et en mode scotopique V'(λ) tel que spécifiées par la CIE.

1.2 Les grandeurs photométriques

En radiométrie, le flux énergétique, en Watt, émis, transporté ou reçu, caractérise physiquement le rayonnement lumineux et est défini comme étant la puissance totale de la radiation électromagnétique émise par un composant. Cependant, cette puissance n'apporte aucune indication sur la façon dont celle-ci est perçue par l'œil. Pour le cas d'une radiation monochromatique, son énergie est liée à sa longueur d'onde λ (ou sa fréquence ν) par la relation ci-dessous:

$$E(\lambda) = h.\nu = h.\frac{c}{\lambda} \qquad (1.1)$$

Avec

$h = 6.626 * 10^{-34} J.s$: constante de Planck

$c = 299.792.458\ m.s^{-1}$: vitesse de la lumière dans le vide

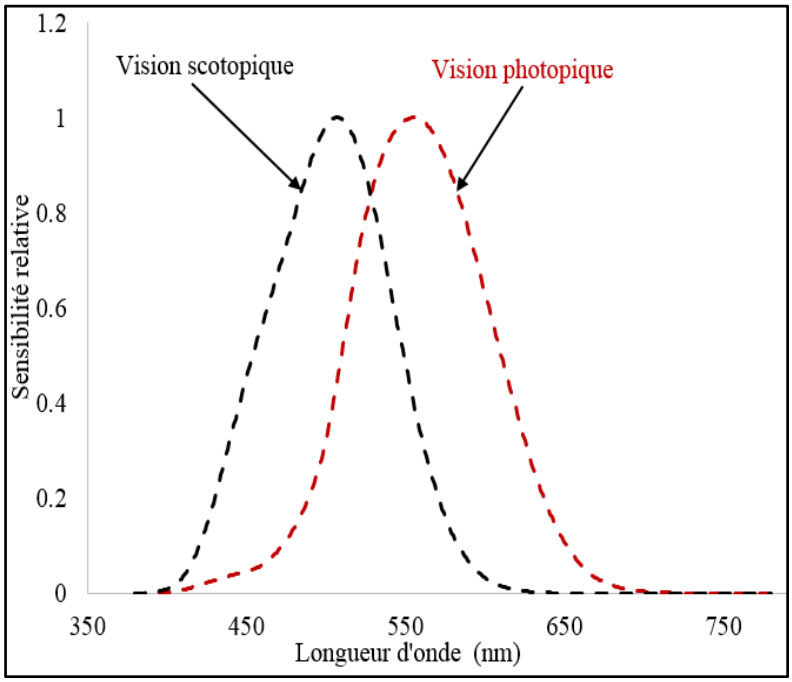


Figure 1.5 Fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale photopique V(λ) et scotopique V'(λ) normalisées tel que spécifiées par la CIE 1931

La puissance totale rayonnée à une longueur d'onde donnée $\phi(\lambda)$, parfois appelée densité spectrale de puissance du rayonnement est calculée à partir du flux de photons émis à la longueur d'onde considérée, tel qu'illustré par l'équation 1.2.

$$\phi(\lambda) = N(\lambda) * E(\lambda) \tag{1.2}$$

Avec

$N(\lambda)$: flux de photons émis à la longueur d'onde λ;

$E(\lambda)$: énergie d'un photon à la longueur d'onde λ.

La dépendance de la sensibilité de l'œil à la longueur d'onde, avec des maximums au voisinage de 555 nm en vision photopique et 507 nm en vision scotopique, justifie l'intérêt des grandeurs photométriques pour une caractérisation plus poussée du rayonnement visible.

1.2.1 Flux lumineux

La puissance totale rayonnée par un composant ne représente pas directement le flux lumineux (quantité photométrique en ***lumen (lm)***) perçu par le système visuel humain. Le flux lumineux, parfois appelé puissance lumineuse, est défini de la manière suivante: *"Une source monochromatique émettant une puissance optique de* $\frac{1}{683}$ *watt à la longueur d'onde* $\lambda = 555\ nm$ *à un flux lumineux de* $1\ lumen"$ (E. Fred Schubert, 2006). Il exprime l'énergie totale rayonnée par une source lumineuse et sa valeur est obtenue par l'équation 1.3:

$$\psi(\lambda)_{\mathrm{lum}} = \mathrm{k} \int \phi(\lambda).\mathrm{V}(\lambda).\mathrm{d}\lambda \tag{1.3}$$

Avec

$\psi(\lambda)_{lum}$: flux lumineux sur le domaine de fréquences considéré;

$\phi(\lambda)$: densité spectrale de puissance;

$V(\lambda)$: fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil;

$\mathrm{k} = 683\ \mathrm{lm.W^{-1}}$: constante de conversion entre la puissance rayonnée et le flux lumineux.

1.2.2 Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse, exprimée en candela, est la quatrième grandeur fondamentale de l'optique. Elle est définie comme une mesure de puissance de la lumière perçue par l'œil humain suivant une direction donnée. En d'autres termes *"Une source monochromatique émettant une puissance optique de* $\frac{1}{683}$ *watt à la longueur d'onde* $\lambda = 555\ nm$ *dans un angle solide de 1 stéradian (sr) à une intensité lumineuse de 1 Candela (Cd)"* (E. Fred Schubert, 2006). La Candela est l'intensité lumineuse d'une source qui émet, dans une direction donnée, un rayonnement monochromatique de fréquence $\nu = 540*10^{12}$ Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 Watt par stéradian. (C. Baillet, 2005).

1.2.3 Luminance

La luminance (ou brillance) d'un point d'une source étendue dans une direction donnée mesure le flux lumineux émis par ce point, ramené à l'angle solide unité et à l'aire apparente unité centrée sur cette direction. Elle s'exprime en candela par mètre carré ($Cd.m^{-2}$) et dans le cas d'un spectre continu, est donnée par l'équation 1.4.

$$L(\lambda) = k \int_{380}^{830} L_e(\lambda).V(\lambda).d\lambda \qquad (1.4)$$

Avec

$L(\lambda)$: luminance en $watt.m^{-2}$;

$k = 683\ lm.W^{-1}$: maximum d'efficacité lumineuse relative spectrale pour une vision photopique;

$L_e(\lambda)$: luminance énergétique spectrale en $watt.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$;

$V(\lambda)$: fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil.

1.2.4 Efficacité lumineuse du rayonnement

Au sein d'une source lumineuse, on retrouve deux principaux niveaux de conversion de l'énergie. Le premier est la conversion de l'énergie électrique en énergie rayonnée et le second la conversion de l'énergie rayonnée en flux lumineux tel qu'illustré à la figure 1.6.

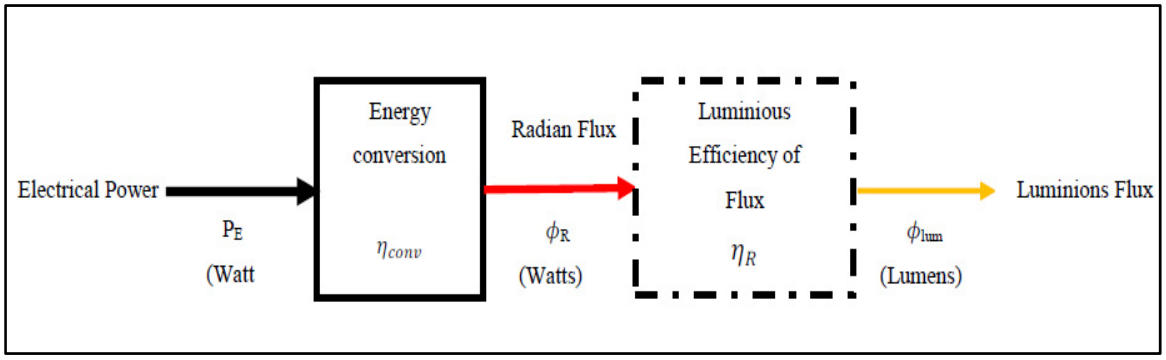


Figure 1.6 Différents niveaux de conversion de l'énergie au sein d'une DEL
Tirée d'A. Chalmers et al. (2010)

L'efficacité lumineuse de radiation (ou LER, abréviation du terme anglais *"Luminious efficiency of radiation"*) décrit le niveau de perception par l'œil de la brillance d'un rayon lumineux. Elle représente la principale figure de performance d'une source et est donnée par l'expression 1.5.

$$\mathrm{LER}(lm.W^{-1}) = \frac{\phi_{\mathrm{lm}}}{\mathrm{P_E}} = \frac{\mathrm{k}\int \phi(\lambda).\mathrm{V}(\lambda).\mathrm{d}\lambda}{\int \phi(\lambda).\mathrm{d}\lambda} = \eta_{\mathrm{R}} * \eta_{\mathrm{conv}} \qquad (1.5)$$

Avec

ϕ_{lm}: flux lumineux;

$\mathrm{P_E}$: puissance électrique;

η_{conv}: rendement de conversion d'énergie électrique en énergie rayonnée;

η_{R}: rendement conversion énergie rayonnée en flux lumineux.

Puisque le pic de sensibilité de l'œil se situe à la longueur d'onde $\lambda = 555\,nm$, la valeur maximale du LER égale à $683\,lm.W^{-1}$ est obtenue à partir d'une radiation verte monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 555\,nm$. En d'autres termes, $683\,lm.W^{-1}$ est la plus grande valeur possible de LER que peut avoir une source lumineuse c'est-à-dire, lorsque 100% de la puissance électrique injectée est convertie en lumière à la longueur d'onde $\lambda = 555\,nm$. Pour obtenir la lumière blanche il est nécessaire d'émettre à la fois dans le rouge, dans le vert et dans le bleu; la LER des sources blanches est donc significativement inférieure à $683\,lm.W^{-1}$étant de l'ordre de $350\,lm.W^{-1}$ en laboratoire (Mottier, 2009).

1.2.5 Distribution spectrale relative de puissance (SPD) ou d'énergie

La lumière émise par la majorité des sources n'est pas monochromatique. La distribution spectrale relative d'énergie (ou SPD pour *"Spectral Power Distribution"* en anglais) donne la répartition d'énergie rayonnée sur un certain domaine spectral du visible. Dans le cas des DELs, elle dépend du type, des propriétés et de la structure de la jonction P-N comme la largeur de la couche épitaxiale, du type de dopant du composant semi-conducteur, etc., …

1.2.6 Rendements quantiques

Le rendement quantique d'une source traduit l'efficacité de la recombinaison des électrons et des trous pour générer des photons. Dans la littérature, les rendements quantiques s'expriment souvent en Candela par Ampère ($Cd.A^{-1}$).

1.2.6.1 Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe η_q représente le rapport du nombre de photons utiles émis par une source lumineuse, dans une direction donnée, vers l'extérieur du dispositif par le nombre de charges injectées selon l'équation 1.6.

$$\eta_q = \frac{q \int N_{ext}(\lambda).\, d\lambda}{I_S} \tag{1.6}$$

Avec

$q = 1.6 * 10^{-19}$ C: charge élémentaire;

$N_{ext}(\lambda)$: nombre de photons sortant de la source lumineuse à une longueur d'onde donnée;

I_S: courant traversant la source.

Il n'est pas exclu qu'une partie des photons générés ne sortent pas du dispositif et soient par exemple perdus par réabsorption ou évacués par réflexion parasite le long des couches minces du substrat formant les guides d'ondes. Dans ce cas, on parle alors de rendement quantique interne.

1.2.6.2 Rendement quantique interne

C'est le rapport du nombre de photons générés par recombinaison sur le nombre de charges injectées. Il est délicat de faire son estimation car il dépend de la structure macroscopique de la source (type de substrat, dimensions, indice de réfraction, etc.,), de l'absorbance des matériaux utilisés.

CHAPITRE 2

COLORIMETRIE

2.1 Introduction

La colorimétrie est la science de la mesure et de la reproduction de la couleur. Elle permet de qualifier d'une manière scientifique et rigoureuse la perception de la couleur qui n'est pas une quantité physique mesurable. Cependant, cette sensation colorée, intuitivement comportant trois caractéristiques que sont la luminosité, la teinte et la saturation, ne peut être exprimée mathématiquement que par trois valeurs puisque l'œil ne comporte que trois types de photorécepteurs. L'objectif n'est donc pas de s'attacher à reproduire un spectre lumineux identique en tout point à celui d'origine mais d'établir le comportement additif et linéaire de la sensation de la couleur indépendamment du spectre de la couleur.

2.2 Lois de Grassmann

Les lois de Grassmann sont à la base de colorimétrie trichromatique. Elles sont établies à partir des cinq hypothèses et ont permis d'établir le comportement additif et linéaire de la sensation de la couleur, indépendamment du spectre de la couleur.

Si A, B et C sont trois stimuli de couleurs, les hypothèses (Chherawala, 2007) sont les suivantes[1]:

1. Réflexivité: $A \equiv A$;
2. Symétrie: Si $A \equiv B$ alors $B \equiv A$;
3. Transitivité: $A \equiv B$ et $B \equiv C$ alors $A \equiv C$;
4. Additivité: $A \equiv B$ alors $A + C \equiv B + C$;
5. Dilatation: $A \equiv B$ alors $k.A \equiv k.B$ avec $k > 0$.

[1] $A \equiv B$ signifie que A est indifférentiable de B

Ces hypothèses ont permis à Grassmann d'établir trois lois de manière expérimentale:

- pour égaliser visuellement une couleur, un ensemble de trois sources lumineuses de longueurs d'onde distinctes sont nécessaires et suffisantes;
- il remarque que dans un mélange additif de lumières colorées, seules les couleurs perçues sont importantes, et non leurs répartitions spectrales;
- si dans un mélange additif de lumières colorées, une ou plusieurs lumières sont graduellement modifiées, la couleur résultante sera, elle aussi, graduellement modifiée.

2.3 Expérience d'égalisation des couleurs

Sur la base des lois de Grassmann associées à la théorie de la trivariance visuelle, l'objectif fixé était d'associer à chaque stimulus visuel élémentaire, une mesure de ce stimulus de couleur à partir d'expériences dites d'égalisation de couleurs. Ces expériences consistent à faire comparer par un observateur dit de référence un stimulus test à un stimulus de référence en les projetant dans un champ visuel uniforme, entouré d'un fond uniforme. La figure 2.1 donne le modèle d'expérience classique pour la reproduction d'un stimulus test. Le stimulus test est projeté sur un côté du plan médian du champ visuel et le mélange additif des trois stimuli de base est projeté sur l'autre côté du plan. En utilisant des atténuateurs de couleurs réglables, on peut ajuster le flux lumineux de chacun des trois stimuli de base pour obtenir des couleurs identiques des deux côtés du plan médian du champ visuel de l'observateur. Les expériences d'égalisation de couleurs ont permis de reproduire l'ensemble des stimuli de couleurs du spectre visible (380 nm à 780 nm) par une synthèse additive de trois primaires. Ces primaires satisfont donc aux lois de Grassmann (Chherawala, 2007) et ces expériences ont permis d'établir le système RVB CIE 1931.

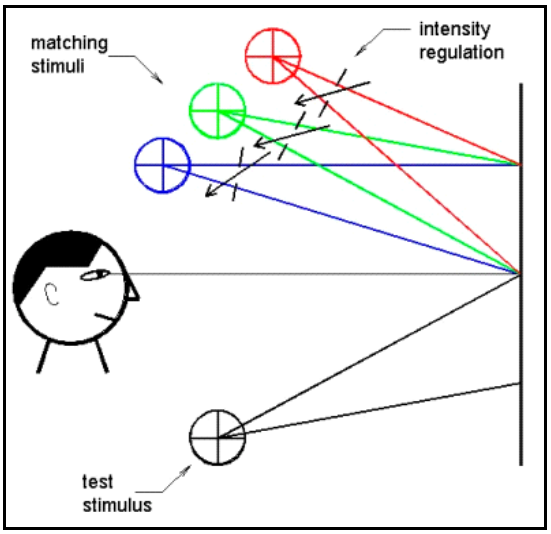


Figure 2.1 Expérience classique pour la reproduction d'une couleur blanche
Tirée de CIE (1999)

2.4 Coordonnées et diagrammes de chromaticité

Les systèmes les plus couramment utilisés pour décrire la couleur des sources et des objets sont ceux de la CIE. La couleur y est représentée par trois valeurs de stimulus ou par deux coordonnées de chromaticité et une de luminosité (Schanda, 2007). Ces coordonnées de chromaticité sont regroupées dans un diagramme de chromaticité qui englobe l'ensemble des couleurs du spectre visible.

2.4.1 Valeurs tri-stimulus R, V, B

La description d'un stimulus de couleur par les valeurs de luminosité des trois stimuli de base reçues par l'œil d'un observateur de référence est mathématiquement décrite par l'équation 2.1.

$$[\mathbf{C}] = \mathrm{R}[\mathbf{R}] + \mathrm{V}[\mathbf{V}] + \mathrm{B}[\mathbf{B}] \tag{2.1}$$

Avec

$[\mathbf{C}]$: couleur du stimulus inconnu;

$[\mathbf{R}]$, $[\mathbf{V}]$, $[\mathbf{B}]$: unités respectives des stimuli de base Rouge, Vert et Bleu;

$\mathrm{R}, \mathrm{V}, \mathrm{B}$: contribution respective des stimuli Rouge, Vert et Bleu pour voir identique à C.

Les grandeurs R, V, B représentent respectivement les trois primaires (stimuli) de couleurs pures Rouge, Vert et Bleu qui ont permis de reproduire le stimulus C. La distribution spectrale de puissance du stimulus test est généralement différente de celle du mélange des trois stimuli de base; on parle de couleurs métamériques. Deux couleurs métamériques sont deux couleurs qui apparaissent identiques pour un observateur (mêmes valeurs de tristimuli) mais présentant des distributions spectrales de puissance relatives différentes.

2.4.2 Observateur de référence de la CIE de 1931: Fonctions d'accord de couleurs

En s'inspirant des expériences de Guild et de Wright (Chherawala, 2007), la CIE a normalisé un jeu de trois couleurs primaires, monochromatiques dont les longueurs d'ondes sont 700,0 nm pour le rouge, 546,1 nm pour le vert et 435,8 nm le bleu. L'ensemble des couleurs du spectre visible peut être construit par synthèse additive de ces trois couleurs primaires, pondérées par des coefficients. Ces coefficients, appelés fonctions colorimétriques ou composantes trichromatiques spectrales ont été déterminés lors des expériences d'égalisation de la CIE réalisées par des observateurs standard. La CIE a ainsi normalisé un système de fonctions colorimétriques dénommées $\bar{r}(\lambda), \bar{v}(\lambda)\ et\ \bar{b}(\lambda)$ liées à chacune des primaires et qui permet d'interpréter avec précision les sensations colorées. C'est *"l'Observateur de Référence"* exposé en 1931, dit CEI 1931. Il correspond à une vision des couleurs sous un angle de 2°, une valeur considérée suffisante pour les applications vidéo (Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son, 1998). Les quantités R, V, B sont les stimuli de base de l'espace CIE RVB 1931 et correspondent au poids de chacun des trois stimuli de base, par rapport à un système trichromatique, nécessaire pour reconstituer la couleur du stimulus considéré. La dépendance de ces quantités à la longueur d'onde pour la reproduction d'un stimulus élémentaire correspond aux fonctions d'accord de couleur et leurs valeurs correspondent à celles des stimuli de base nécessaires pour reproduire un quelconque stimulus monochromatique élémentaire du visible. La figure 2.2 donne la représentation graphique de ces fonctions colorimétriques standard dans le système CIE RVB 1931.

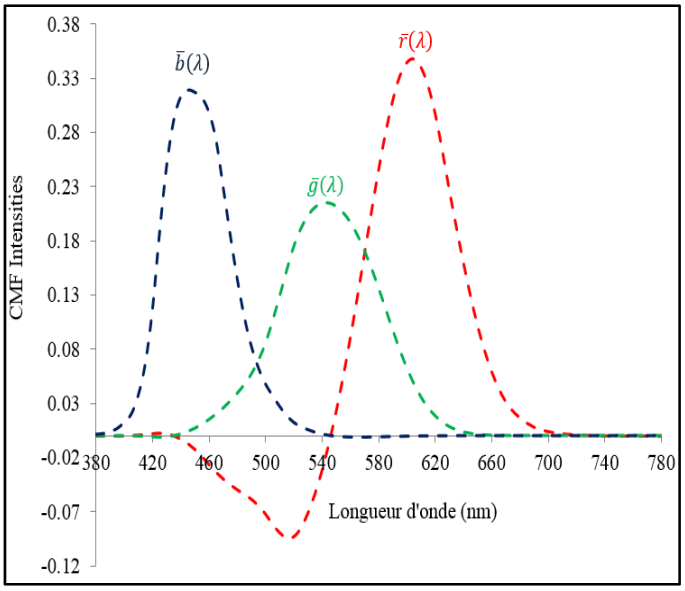


Figure 2.2 Fonctions spectrales standard $\bar{r}(\lambda), \bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ du système CIE-RVB 1931 à 2^o

Pour un stimulus de couleur de distribution spectrale de puissance $S(\lambda)$, les valeurs de tristimuli R, V et B lui correspondant dans l'espace CIE RVB sont données par les d'équations 2.2 à 2.4.

$$R = K\int_{380}^{780} S(\lambda).\bar{r}(\lambda)\,.d\lambda \tag{2.2}$$

$$V = K\int_{380}^{780} S(\lambda).\bar{v}(\lambda)\,.d\lambda \tag{2.3}$$

$$B = K\int_{380}^{780} S(\lambda).\bar{b}(\lambda)\,.d\lambda \tag{2.4}$$

Avec

R, V, B: valeurs de tristimuli de l'espace RGB CIE;

$\bar{r}(\lambda), \bar{v}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$: fonctions d'accord de couleurs;

$S(\lambda)$: distribution spectrale de puissance;

K: constante de normalisation.

Les primaires $\bar{r}(\lambda), \bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ présentent l'avantage d'être normalisées sur le domaine du visible.

$$\int_{380}^{780} \bar{r}(\lambda)\,.\,d\lambda = \int_{380}^{780} \bar{v}(\lambda)\,.\,d\lambda = \int_{380}^{780} \bar{b}(\lambda)\,.\,d\lambda \qquad (2.5)$$

Cependant, le lobe négatif de la fonction $\bar{r}(\lambda)$ du système RVB CIE 1931 représente un inconvénient majeur car s'oppose au principe de synthèse additive. Ceci signifie qu'à quelques niveaux du spectre, la reproduction d'un stimulus test n'est possible que lorsqu'on combine un des stimuli de base au stimulus test lui-même (Dangol, 2011), ce qui n'est pas convenable en pratique car toutes les couleurs ne peuvent être reproduites. De plus, avant l'arrivée des ordinateurs, ces lobes négatifs rendaient les calculs assez compliqués. C'est pourquoi un nouveau système colorimétrique a été introduit.

Pour surmonter les limites du système RVB CIE 1931, la CIE décide en 1931 de supprimer les lobes négatifs et de transformer les primaires [R], [V] et [B] en primaires [X], [Y] et [Y], de sorte que les valeurs de tri stimuli de base d'un stimulus équiénergétique soient égales (X = Y = Z) et qu'une des leurs corresponde aux quantités colorimétriques ($\phi, I, L, E, etc., ...$) (Chherawala, 2007). C'est le nouveau système de primaires XYZ CIE 1931, puis 1964, introduit par Judd et dit imaginaire car ses primaires n'ont pas de réalité physique.
Comme les primaires $\bar{r}(\lambda), \bar{v}(\lambda)\ et\ \bar{b}(\lambda)$, chacune des fonctions $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)\ et\ \bar{z}(\lambda)$ est normalisée sur le spectre visible.

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{x}(\lambda)\,.\,d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{y}(\lambda)\,.\,d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{z}(\lambda)\,.\,d\lambda \qquad (2.6)$$

Les valeurs de tristimuli X, Y et Z sont données dans le système CIE-XYZ 1931 par les d'équations 2.2 à 2.4.

$$X = K\int_{380}^{780} S(\lambda).\bar{x}(\lambda)\,.\,d\lambda \quad (2.7)$$

$$Y = K\int_{380}^{780} S(\lambda).\bar{y}(\lambda)\,.\,d\lambda \quad (2.8)$$

$$Z = K\int_{380}^{780} S(\lambda).\bar{z}(\lambda)\,.\,d\lambda \quad (2.9)$$

Avec

X, Y, Z: valeurs tri stimuli du système trichromatiques CIE XYZ;

$\phi(\lambda)$: fonction densité de puissance relative de la lumière vue par un observateur (ou distribution spectrale de puissance relative du stimulus);

K: constante de normalisation.

$\bar{x}(\lambda).\bar{y}(\lambda)\ et\ \bar{z}(\lambda)$: fonctions colorimétriques standards ou fonctions d'accord de couleurs (CMFs abréviation du terme anglais *"Color Matching Functions"*) de l'observateur standard CIE XYZ 1931.

Le transfert des coordonnées du système RVB au système XYZ se fait de façon linéaire au moyen d'une matrice de passage comme l'illustre l'équation 2.10.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2{,}768892 & 1{,}751748 & 1{,}130160 \\ 1{,}000000 & 4{,}590400 & 0{,}060100 \\ 0{,}000000 & 0{,}056508 & 5{,}594292 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ V \\ B \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Avec

X, Y, Z: nouvelles valeurs de tri-stimulus;

R, V. B: valeurs de tristimuli de l'espace CIE RGB 1931;

Les colonnes $\begin{bmatrix} 2{,}768892 \\ 1{,}000000 \\ 0{,}000000 \end{bmatrix}$; $\begin{bmatrix} 1{,}751748 \\ 4{,}590400 \\ 0{,}056508 \end{bmatrix}$ et $\begin{bmatrix} 1{,}130160 \\ 0{,}060100 \\ 5{,}594292 \end{bmatrix}$ de la matrice (3 x 3) de l'équation (2.10) sont les coordonnées (x, y, z) des primaires rouge, vert et bleu.

Le standard trichromatique CIE 1931 est uniquement destiné à de petits stimuli (champs visuels de 1 à 4 degré (s)). Pour tenir compte de la description de grands stimuli, la CIE définira en 1964 de nouvelles CMFs pour un champ visuel de 10 degrés comme complément

du standard XYZ CIE 1931. Elles sont notées $\bar{x}_{10}(\lambda).\bar{y}_{10}(\lambda)\ et\ \bar{z}_{10}(\lambda)$ et correspondent au standard colorimétrique XYZ CIE 1964. La figure 2.3 donne les courbes des fonctions colorimétriques standards des systèmes CIE XYZ 1931 et CIE XYZ 1964.

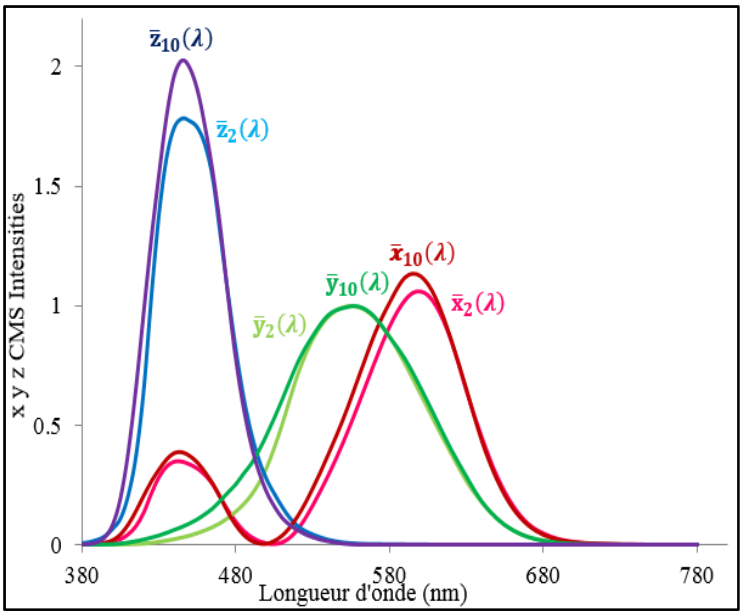


Figure 2.3 Fonctions standards d'accord de couleurs $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ et $\bar{x}_{10}(\lambda), \bar{y}_{10}(\lambda), \bar{z}_{10}(\lambda)$ des systèmes respectifs CIE XYZ 1931 et CIE XYZ 1964

2.4.3 Coordonnées chromaticité et diagramme de chromaticité CIE 1931

2.4.3.1 Coordonnées de chromaticité

Le stimulus de couleur est complètement décrit par les trois valeurs de tristimuli mais cette description est dificile à concevoir; d'où l'intérêt d'utiliser les coordonnées de chromaticité normalisées obtenues en faisant le rapport de chacune des trois valeurs de tristimuli à leur somme (Chherawala, 2007; Dangol, 2011).

$$x = \frac{\mathrm{X}}{\mathrm{X}+\mathrm{Y}+\mathrm{Z}} \tag{2.11}$$

$$\mathrm{y} = \frac{\mathrm{Y}}{\mathrm{X}+\mathrm{Y}+\mathrm{Z}} \tag{2.12}$$

$$\mathrm{z} = \frac{\mathrm{Z}}{\mathrm{X}+\mathrm{Y}+\mathrm{Z}} \tag{2.13}$$

Avec

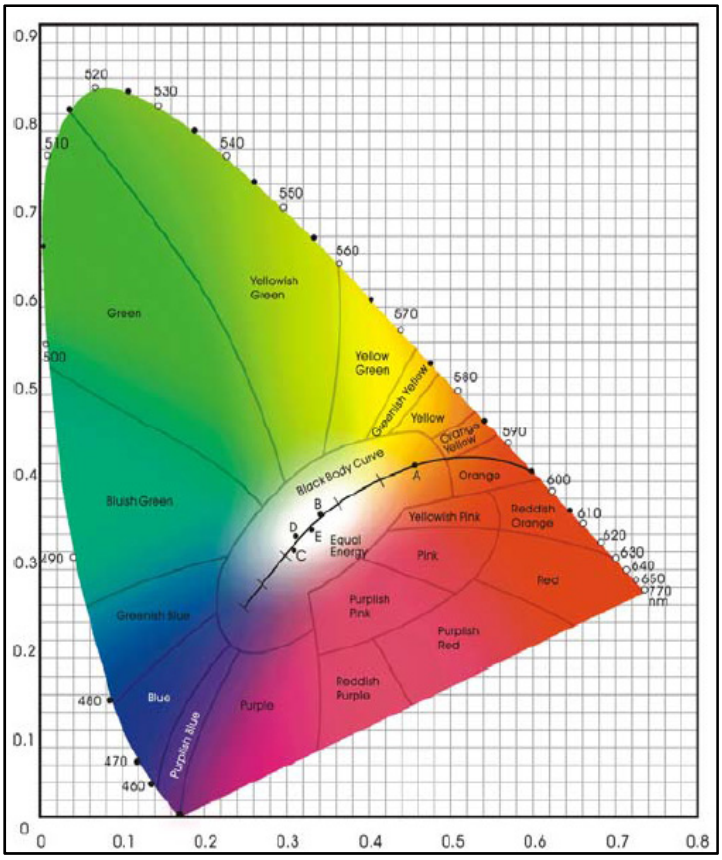
X, Y, Z: valeurs de tri-stimulus;

x, y, z: coordonnées de chromaticité (x + y + z = 1) dans le système CIE XYZ 1931.

La somme de ces trois coordonnées de chromaticité est égale à 1, d'où la notation xyY (Chherawala, 2007). Deux d'entre elles suffisent pour décrire des chromaticités dans un espace à deux dimensions à une luminance Y constante : les coordonnées x et y. La chromaticité est une propriété de stimulus de couleur définie par ses coordonnées de chromaticité, ou par sa longueur d'onde dominante ou complémentaire et sa pureté prise ensemble. Elle détermine la teinte et la saturation mais ne tient pas compte de la luminosité. L'équivalence qui lie la chromaticité aux coordonnées de chromaticité permet de représenter la couleur dans un plan.

2.4.3.2 Diagrammes de chromaticité CIE 1931

La représentation graphique des coordonnées de chromaticité dans un système rectangulaire de coordonnées donne le diagramme de chromaticité (x, y) également dénommé diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931(Baniya, 2012), tel qu'illustré à la figure 2.4. La courbe joignant 380 nm à 700 nm représente l'ensemble des couleurs pures tandis que la droite passant du bleu (380) nm au rouge (700 nm) est appelée la droite des pourpres. La propriété principale de ce diagramme est l'additivité. Il englobe l'ensemble des couleurs du spectre visible. Les couleurs reproductibles à partir des trois primaires rouges (700 nm), vert (546,1 nm) et bleu (435,8 nm) sont contenues dans le triangle formé par ces trois primaires. Le blanc de référence est lui-même défini par ses coordonnées de chromaticité dans le système CIE 1931 sur le diagramme de chromaticité. Le diagramme possède de nombreuses propriétés intéressantes sur la perception de la couleur en fonction de l'illuminant et permet d'identifier l'ensemble des couleurs reproductibles et de prédire l'apparence d'une couleur en fonction du blanc de référence, d'où la nécessité de pouvoir caractériser ce blanc de référence par ses coordonnées dans la pratique.

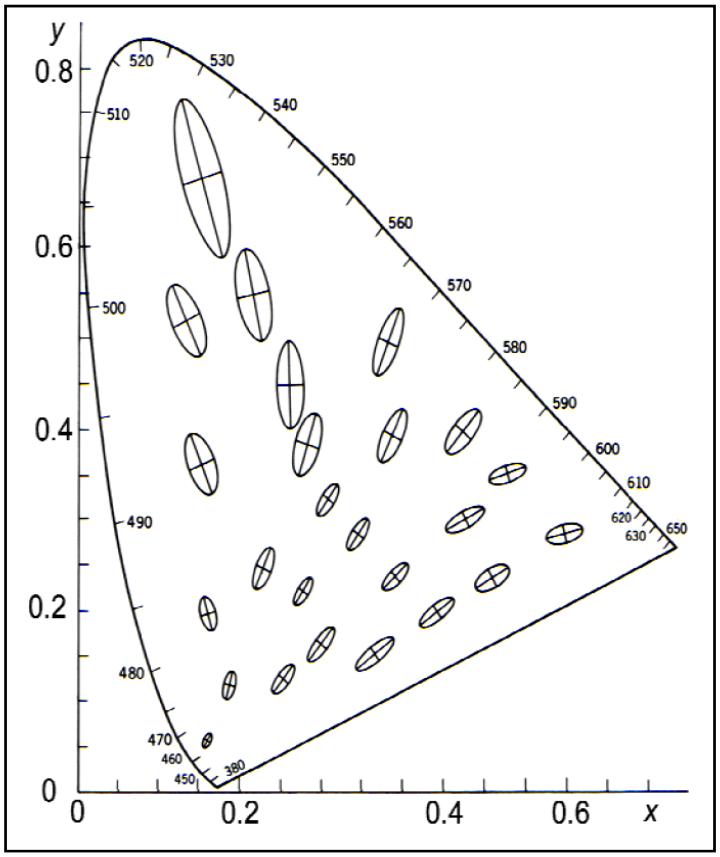


Le système de primaires XYZ CIE 1931 constitue ainsi la base de la colorimétrie. Cependant, il ne prend pas en compte la notion de luminosité, d'où la nécessité en plus d'indiquer les coordonnées de chromaticité x et y, d'ajouter la luminosité Y.

Figure 2.4 Diagramme de chromaticité CIE (x,y) 1931 à 2^{o}
Tirée de Gillet (2008-2009)

2.4.3.3 Diagrammes de chromaticité uniformes: ellipses de McAdam

L'inconvénient majeur du diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931 réside au fait que les couleurs n'y sont pas réparties selon la perception humaine. La distance entre deux couleurs représentées sur le diagramme n'est pas systématiquement proportionnelle à la différence perçue par l'homme entre ces deux couleurs. En 1942, David MacAdam a démontré que le minimum de variation de chromaticité perceptible par un sujet moyen dans le diagramme de chromaticité CIE 1931 se présente sous forme de petites aires de forme elliptique comme illustré à la figure 2.5. Ces petites aires sont connues sous le nom d'ellipses de MacAdam et chacun contient un ensemble de couleurs non discernables de celle située au centre de



l'ellipse par l'observateur standard. Il est possible de remarquer à partir de la figure 2.5 que la variation de chromaticité correspondant au minimum perceptible dépend de la position au niveau du diagramme de chromaticité CIE 1931.

Figure 2.5 Ellipses de MacAdam
Tirée de Schanda (2007)

Les différences d'orientation et de taille des ellipses de MacAdam illustrent clairement que le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931 n'est pas uniforme.

Pour rendre le diagramme de chromaticité plus uniforme, la CIE a défini en 1960 un diagramme amélioré connu sous le nom du diagramme de chromaticité CIE (u, v) 1960 puis en 1976, le diagramme de chromaticité uniforme CIE (u', v') 1976, obtenu par accroissement de la coordonnée v de 50%, dans lequel les zones représentant le minimum de différence de couleur discernable par l'observateur moyen (ellipses de MacAdam) sont illustrées à la figure 2.6. On peut remarquer que les ellipses de MacAdam dans ce diagramme ont tendance a avoir une forme circulaire comparée à ceux observés dans le diagramme CIE (x, y) 1931.

Ceci se traduit par le fait que, bien que ces ellipses n'y soient pas totalement transformés en cercles, le diagramme CIE (u', v') 1976 est un peu plus uniforme que celui CIE (x, y) 1931.

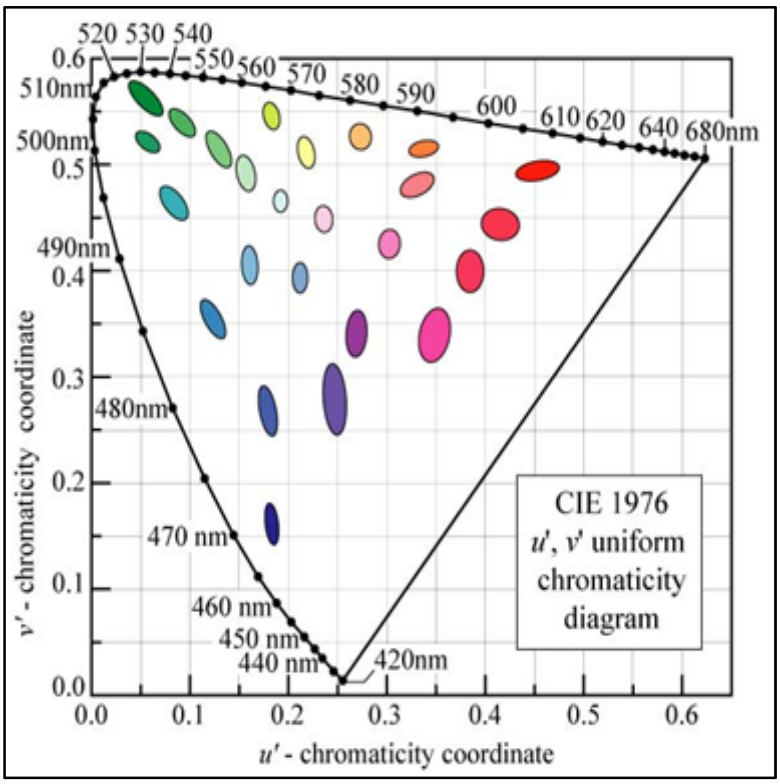


Figure 2.6 Allure des ellipses de MacAdam
dans le diagramme CIE (u', v') 1976
Tirée de Wikipédia (2014)

D'autres systèmes tels que les espaces de couleurs uniformes CIE UVW, CIEL*a*b* et CIEL*u*v* ont été adoptés pour les mêmes raisons qui ont conduit à l'adoption des diagrammes de chromaticité uniforme: palier à la non-uniformité des systèmes colorimétriques précédents. Le système de coordonnées (ou espace) CIE UVW n'est plus à jour bien qu'il ait longtemps servi pour le calcul de l'indice de rendu de couleurs (CRI) de la CIE (CIE, 2004). Quant aux espaces CIELAB et CIELUV, ils sont destinés pour la comparaison des différences entre les couleurs d'objets de même dimension et de formes identiques, vus dans un environnement identique pouvant varier du blanc au gris-intermédiaire, par un observateur photopique adapté à un domaine de chromaticité pas trop différent de celui de la moyenne de la lumière du jour.

CHAPITRE 3

ILLUMINANTS ET SOURCES DE LA CIE

3.1 Introduction

Avant l'éclairage artificiel, la courbe de la distribution spectrale de puissance (ou Spectral Power Distribution; SPD, en anglais) et la température de couleur étaient utilisées pour décrire certaines caractéristiques des sources lumineuses telles que le rendu de couleur des objets (Dangol, 2011). Avec le développement et la multiplicité des sources artificielles, il nous arrive parfois de voir deux sources ayant des SPDs mais des températures de couleurs égales, ce qui a été à l'origine de sérieux problèmes pour le concept de rendu de couleur (CIE, 1999). Il devient nécessaire de définir des règles pour normaliser l'utilisation des sources lumineuses afin de garantir des mesures fiables et reproductibles dans les différentes applications où elles sont utilisées. Parmi ces règles, les illuminants standard occupent une place primordiale.

3.2 Température de couleur

La température de couleur peut paraitre une notion un peu étrange car il ne semble pas exister une relation directe entre la couleur et la température. Cette relation est dérivée de la radiation du corps noir (radiateur de Planck). En élevant graduellement la température du corps noir, ce dernier émet de l'énergie progressivement dans le rouge, dans l'orange, dans le blanc-jaunâtre, dans le blanc et en fin dans le blanc-bleuté. La température de couleur d'une source, exprimée en degrés Kelvin (^{o}K) est la température du radiateur de Planck dont la radiation est de même couleur que la source de lumière (CIE, 1999). La représentation graphique des différentes couleurs du corps noir sur le diagramme de chromaticité CIE 1931 est une courbe connue sous le nom de locus du corps noir ou locus de Planck. La température de couleur ne spécifie que la chromaticité d'une source. Cette chromaticité traduit la couleur apparente des sources lumineuses, *"chaude"* pour des valeurs de température de couleur faibles et *"froid"* pour des valeurs de température de couleur élevées (Schanda, 2007; CIE,

2004). La figure 3.1 donne le profil du locus de Planck ainsi que quelques isothermes dans le système de coordonnées CIE (u', v') 1976.

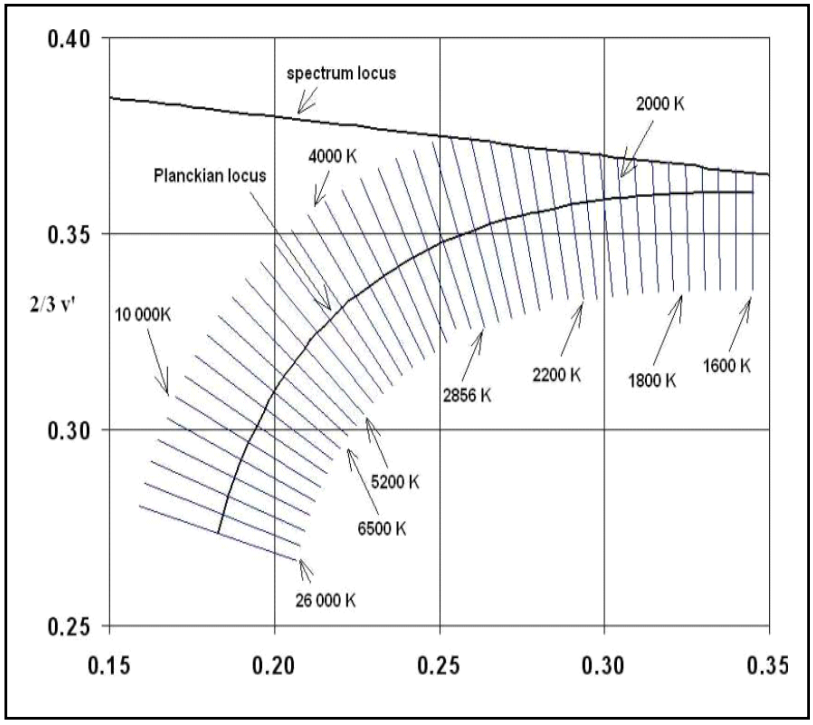


Figure 3.1 Locus de Planck avec quelques isothermes dans le diagramme de chromaticité CIE (u', v') 1976
Tirée de Schanda (2007)

Lorsque la chromaticité de la source test ne correspond pas exactement à celle d'un corps noir, on utilise la température de couleur proximale (TCP) ou température de couleur corrélée *("Correlated Color Temperature"* ;CCT, en anglais) aussi exprimée en degrés Kelvin. La CIE définit la TCP de la manière suivante:

> *"La température de couleur proximale est la température du radiateur de Planck ayant la chromaticité la plus proche de celle associée à une distribution spectrale donnée dans le diagramme de chromaticité u', 2/3v' où le locus de Planck et le stimulus test sont représentés"* (Dangol, 2011).

Le tableau 3.1 donne l'impression liée à la température de couleur proximale dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931.

Tableau 3.1 Impression liée à la température de couleur proximale dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931
Tiré de Mottier (2008)

Impression colorée	**Température de couleur proximale (TCP)**
Chaude	$\leq 3300\ K$
Neutre	$3300\ K\ \leq\ TCP \leq 5300\ K$
Froide	$< 5300\ K$

La détermination graphique de la TCP n'est pas valable avec le système XYZ CIE 1931 à cause de sa non-uniformité déjà évoquée dans les sections précédentes. Aussi, la CIE recommande de ne pas utiliser le concept de TCP pour des différences de chromaticité ΔC entre la source test et le locus de Planck supérieures à $5\text{x}10^{-2}$ (CIE, 2004) car en dehors de cette limite, la source commence à donner une autre impression de couleur qui ne lui permettra plus d'être associée à une température du radiateur de Planck. La valeur de ΔC est calculée en utilisant l'équation 3.1.

$$\Delta\text{C} = \sqrt{\left(\text{u}'_\text{t} - \text{u}'_\text{p}\right)^2 + \frac{9}{4}\left(\text{v}'_\text{t} - \text{v}'_\text{p}\right)^2} \tag{3.1}$$

Avec

ΔC: différence de chromaticité entre la source teste et le radiateur de Planck ou phase de la lumière du jour dans le système CIE (u', v') 1976;

$u'_t\ et\ v'_t$: coordonnées de chromaticité de la source teste;

$u'_p et\ v'_p$: coordonnées de chromaticité du radiateur de Planck.

Comme la température de couleur, la TCP ne reflète uniquement que la couleur de la lumière et n'informe en rien sur le spectre ou sur la qualité d'une source lumineuse.

3.3 Illuminants de la CIE

3.3.1 Notion d'illuminant

Le terme *"illuminant standard"* réfère à un ensemble de données en fonction de la longueur d'onde $S_{ill}(\lambda)$ (énergie ou puissance relative) reproductible qui représente la meilleure qualité spectrale d'un type de source et qui est destiné à être utilisé dans des logiciels et d'autres applications colorimétriques (HunterLab, 2008). Chaque source correspond à une unique courbe de SPD qui décrit comment elle apparaît ou, mieux, comment apparaissent les objets qu'elle illumine. Les paramètres colorimétriques ainsi que le profil spectral de la lumière associés à un illuminant standard ou à ceux des objets qu'il illumine vus par un observateur étalon sont considérées comme des éléments de référence.

3.3.2 Illuminants de la CIE

La forte corrélation entre la couleur observée d'un objet et la source lumineuse qui l'éclaire oblige une catégorisation des différents illuminants en fonction de leur température de couleur. Une échelle de température de couleur a été créée à partir de la couleur du corps noir sous différentes températures exprimées en degrés Kelvin. Cette échelle de température est la base des illuminants de la CIE.

3.3.2.1 Illuminants classiques de la CIE

Les premiers illuminants de la CIE, de type tungstène, sont normalisés suivant les illuminants A, B ou C. Une série dite d'illuminants type F (pour fluorescent) est divisée en 12 sous-familles en fonction du type de phosphore utilisé est rajoutée plus tard. Il existe également l'illuminant E, qui est un illuminant théorique équiénergétique. La figure 3.2 donne les SPDs des illuminants A B, C et E et le tableau 3.1 résume les caractéristiques colorimétriques de ces derniers, les détails sur les caractéristiques colorimétriques des illuminants de la série F sont données à l'annexe I.

L'«*International Pratical Temperature Scale*» (IPTS) fut changée en 1948 mais, à l'issue de la 12ème session de la CIE (1951), il a été décidé de conserver la SPD de l'**illuminant normalisé A** inchangée (Kosztyán and Schanda, 2013). Ce qui a conduit à la révision de sa définition comme une lampe à filaments de tungstène remplis de gaz fonctionnant à une température de couleur voisine de 2854 K. Le second changement de l'IPTS en 1968 donne la valeur 2856 K connue de nos jours et a entraîné des modifications similaires sur les TCP de tous les autres illuminants et sources recommandés par la CIE (Kosztyán and Schanda, 2013).

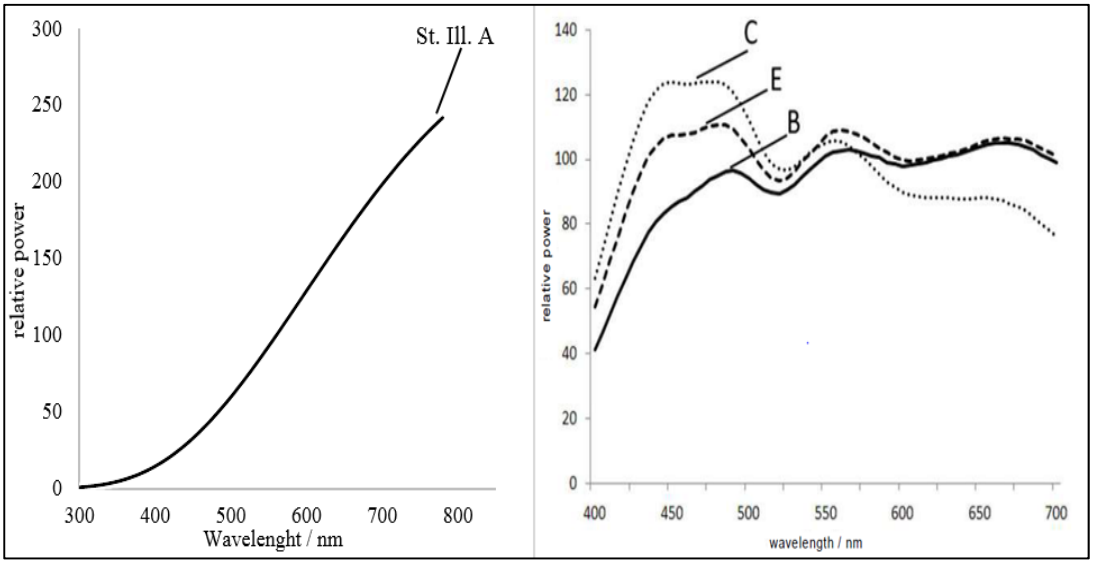


Figure 3.2 Profils spectraux des SPDs des illuminants A, B, C et E de la CIE
Adaptée de CIE (2013)

Le développement des applications colorimétriques et de la mesure ont dévoilé très tôt les limitations de ces illuminants. Dès 1963, la Commission de la CIE s'occupant de la colorimétrie reconnaissait qu'il y avait suffisamment de preuves disponibles pour substituer les illuminants de la CIE existants par de nouveaux illuminants adaptés représentant la lumière naturelle du jour (CIE, 2013). Ces nouveaux illuminants dénommés illuminants de type D ou de la série D (pour *"Daylight"* en anglais) sont associés à certaines phases de la lumière naturelle du jour.

Tableau 3.2 Illuminants classiques de la CIE
Adapté de Kránicz et al (2000), HunterLab (2008) et CIE (2013)

Nom	Description	TCP (^{o}K)	x	y	u`	v`
A	Lampe tungstène, couleur orange pour éclairage domestiques	2856	0.448	0.407	0.256	0.524
B	Lampe tungstène, couleur lumière du soleil au zénith	4874	0.348	0.352	0.214	0.485
C[2]	Lampe tungstène, couleur ciel nordique	6774	0.310	0.316	0.201	0.461
E	Point blanc théorique	5400	0.333	0.333	n/sp	n/sp

3.3.2.2 Illuminants de type lumière du jour

On peut supposer que la vraie couleur des objets de notre environnement et la source d'énergie la plus sure sont celles obtenues à partir de l'illumination par la lumière du jour (Schanda, 2007; CIE, 2013). Cependant, cette lumière du jour est en changement continu dépendamment de l'heure de la journée, de la saison, de la localisation et selon que le ciel est bleu ou couvert (totalement ou partiellement) par des nuages. Les professionnels de la colorimétrie et les artistes ont préféré depuis des siècles la lumière du jour en ciel nordique et son utilisation était bien courante dans l'environnement scientifique et industriel nord-américain bien avant que la CIE adopte ses illuminants du jour (CIE, 2013). Cependant, la lumière du jour en ciel nordique n'est pas constante et sa température de couleur peut varier de moins de 5.000 K à 25.000 K, et selon MacLaren (CIE, 2013) *"partout où la lumière du jour est utilisée pour la correspondance de couleur, il sera mieux d'utiliser la globale (lumière moyenne du jour dans le temps et dans l'espace) que juste d'utiliser celle de l'hémisphère nord…."*.

---

[2] La température de couleur de l'illuminant C a très souvent été rapporté comme 6 500 K (même dans Judd et al. 1964), mais la valeur correcte est un peu plus élevé, 6 740 K selon Davis et al. (1953), ou d'environ 6 800 K (CIE, 2004).

Bien que la lumière globale du jour varie d'un mélange de rayonnement solaire radieux avec un ciel bleu-profond à une lumière issue d'un ciel totalement couvert, sa température de couleur est plus ou moins stable comparée à celle du ciel dans l'hémisphère nord, les valeurs rencontrées dans la littérature sont comprises entre 5.620 K et 8.000 K; Taylor et Kerr (1941) (CIE, 2013) ont établi que l'intervalle normal est de 6.000 K à 7.000 K. La figure 3.3 montre que les illuminants associés aux phases de la lumière du jour sont disposés sur une courbe plus ou moins parallèle au locus de Planck dans le système CIE (u, v) 1960.

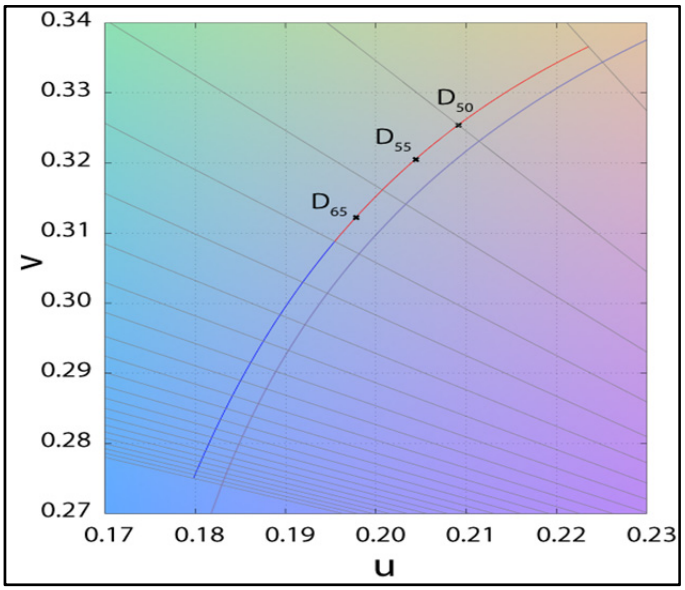


Figure 3.3 Position du locus des illuminants de la série D par rapport à celui de Planck dans le système CIE 1960 UCS [3]
Tirée de Wikipédia (2014)

[3] Les isothermes sont perpendiculaires au locus de Planck. Les deux sections du locus des illuminants de la série D (4000 -7000 K et 7000- 25000 K), sont codées en couleur. Noter que les deux locus sont séparés par une distance d`environ $\Delta uv = 0{,}003$.

A. L'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

Le choix de la température à laquelle l'illuminant *"lumière du jour"* doit être utilisé dépend du type d'application. L'illuminant D_{65} semble avoir émergé comme le premier choix de la CIE (le seul à avoir le statut d'illuminant normalisé) car il représente le meilleur compromis entre les extrêmes D_{50} et D_{75} et de plus, parce qu'il offre une sorte de meilleure continuité des TCP autour de 6.800 K que le précédent illuminant du jour recommandé, l'illuminant C qui n`était défini que dans le domaine visible du spectre (Schanda, 2007; CIE, 2013) .

Un standard de la CIE stipule que :

> *"L'illuminant standard D_{65} de la CIE est destiné à représenter la moyenne de la lumière du jour et à une température de couleur proximale voisine de 6.500 K. L`illuminant standard D_{65} de la CIE devra être utilisé dans toutes les applications colorimétriques nécessitant la représentation de la lumière du jour, à moins qu'il y ait des raisons spécifiques qui justifient l'utilisation d'un illuminant différent. On sait qu'il peut se produire des variations de la distribution spectrale de puissance relative de la lumière du jour, particulièrement dans la région ultraviolette du spectre, dépendamment de la saison, de l'heure de la journée et de la position géographique. Malgré tout, l'illuminant standard D_{65} de la CIE devra être utilisé en attendant la disponibilité d'informations additionnelles sur ces variations"* (Schanda, 2007).

En 1964, la CIE statue que:

> *"Il est recommandé dans l'intérêt de standardisation, que le D_{65} soit utilisé chaque fois que c'est possible. Lorsque l'utilisation du D_{65} n'est pas possible, il est recommandé d'utiliser un des illuminants D_{50}, D_{55}, ou D_{75}. Lorsqu'aucun de ces illuminants du jour ne peut être utilisé, l'illuminant du jour à la température de couleur proximale nominale peut être déterminé en utilisant les équations [indiqué ci-dessus]"* (CIE, 2004; CIE, 2013).

La SPD de la phase de la lumière du jour représentée par l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE ne devrait être réfléchie par aucun objet fortement coloré (mur rouge brique ou arbre vert) (ISO TC 34/SC 12, 2007). Les valeurs originales de cette SPD sont données dans la publication «*CIE standards illuminant for colorimetry*» (CIE, 1986c). L`illuminant normalisé D_{65} de la CIE est également référencé dans les normes ISO: 3668, ASTM 1729 et DIN6173-2; (DIN abréviation du terme allemand «*Deutsches Institut Für Normung*»). Son utilisation dans de nombreuses applications émergentes telles que le photovoltaïque, la mesure de la fluorescence des objets et l'étude du vieillissement des organismes vivants a suscité grandement l'intérêt de porter notre étude sur ce dernier.

B. Caractéristiques de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

Coordonnées colorimétriques

Les phases de la lumière du jour ont été déterminées sur un intervalle de TCP allant de 4.000 K à 25.000 K divisé en deux sections de 4.000 K à 7.000 K et 7.000 K à 25.000 K pour le calcul de leur coordonnées de chromaticité (x_D, y_D) dans l'espace CIE (x, y) 1931 (Schanda, 2007). Ces coordonnées de chromaticité, pour être définies, doivent satisfaire aux équations 3.2 et 3.3 (Kránicz and Schanda, 2000) connue sous le nom de *"relation quadratique de Judd"*:

$$y_D = -3{,}000x_D^2 + 2{,}870x_D - 0{,}275 \tag{3.2}$$

Avec

$$0{,}250 \leq x_D \leq 0{,}38 \tag{3.3}$$

La TCP d'un illuminant D est reliée à sa coordonnée x_D par l'une des équations 3.4 et 3.5 (Kránicz and Schanda, 2000; CIE, 2004) tenant compte des isothermes normales au locus de Planck dans un diagramme de chromaticité uniforme.

- Pour 4.000 K $\leq TCP \leq$ 7.000 K

$$x_D = \frac{-4{,}6070 * 10^9}{(TCP)^3} + \frac{2{,}9678 * 10^6}{(TCP)^2} + \frac{0{,}09911 * 10^3}{TCP} + 0{,}244063 \tag{3.4}$$

- Pour $7.000\ \mathrm{K} \leq \mathrm{T_{CP}} \leq 25.000\ \mathrm{K}$

$$x_D = \frac{-2{,}0064 * 10^9}{(\mathrm{TCP})^3} + \frac{1{,}9018 * 10^6}{(\mathrm{TCP})^2} + \frac{0{,}24748 * 10^3}{\mathrm{TCP}} + 0{,}237040 \qquad (3.5)$$

Les coordonnées de chromaticité de chaque illuminant sont obtenues en remplaçant TCP par sa valeur. La difficulté liée à cette méthode est qu'en dehors des nombreuses approximations établies, elle ne prévoit pas de calculer les coordonnées de chromaticité (x, y) des autres illuminants du jour. Judd et ses coéquipiers n'ont calculé que les valeurs de coordonnées de chromaticité correspondant à des TCPs d'utilisation courante ($5.000\ K, 6.500\ K$), $et\ 7.500\ K$ pour celles correspondant aux autres valeurs de TCP, on pourrait se référer aux figures de Kelly (Wikipédia, 2014a). Le tableau 3.4 donne les caractéristiques colorimétriques des illuminants recommandés de type *"lumière du jour"* les plus couramment utilisés et de l'illuminant standard D_{65} de la CIE. La révision de la valeur de la constante de Planck après la définition de cette série a induit un léger changement de la TCP de chaque illuminant D qui passe de la valeur nominale à sa valeur actuelle.

Tableau 3.3 Caractéristiques colorimétriques des illuminants de type "lumière du jour" Adapté de CIE (2004); Chherawala (2007) et de Schanda (2007)

Dénomination	**Illuminant D_{50}**	**Illuminant D_{55}**	**Illuminant Standard D_{65}**	**Illuminant D_{75}**
Description	Lumière du jour au lever ou au coucher du soleil (impres-sion et art)	Lumière du jour mi-matinée ou mi-après-midi	Lumière du jour à midi (colorimétrie et autres)	Ciel nuageux
T Nominale (^{o}K)	5000	5500	6500	7500
T Actuelle (^{o}K)	5003	5504	6504	7503
x	0.34567	0.33243	0.31272	0.29903
y	0.35851	0.34744	0.32903	0.31488
u`	0.209	0.204	0.198	0.193
v`	0.488	0.480	0.468	0.458

Distribution spectrale relative de puissance (SPD)

Les valeurs de la SPD relative de l'illuminant normalisé D_{65} et celles des autres illuminants de la série D de la CIE fournies dans la recommandation *"Colorimetry"* de la CIE sont basées sur des observations expérimentales dans le domaine spectral 330 – 700 nm suivies d'une extrapolation dans les domaines de longueur d'onde 300 - 330 nm puis 700 – 830 nm (Judd et al. 1964). On croit que les valeurs obtenues d'extrapolation sont assez précises pour une utilisation en colorimétrie mais ne devraient pas être utilisées à d'autres fins (CIE, 2004). La SPD relative $S_D(\lambda)$ d'un illuminant de la série D peut être déduite de ses coordonnées de chromaticité (x_D, y_D) dans le système CIE (x, y) 1931 (Wikipédia, 2014a). Judd et al. avaient suggéré une nouvelle approche, basée sur les méthodes de Simonds (Simonds, 1583; CIE, 2013), pour compiler des données expérimentales sous forme de vecteurs caractéristiques (ou vecteurs propres) $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$ par pas de 10 nm entre 300 nm et 830 nm à partir desquels ils ont calculé la SPD relative de la lumière du jour à n'importe quelle TCP. Une approximation des SPDs relatives des différentes illuminants de la *"lumière du jour"* à des pas de 10 nm entre 300 nm et 830 nm est donnée par l'équation 3.6.

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \tag{3.6}$$

$S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$ sont des fonctions dépendant de la longueur d'onde λ telles que:

$S_0(\lambda)$: Valeur moyenne des SPDs de 622 échantillons utilisées pour déterminer la SPD des illuminants de la série D;

$S_1(\lambda)$ Variation du jaune-bleu en fonction du changement de la TCP lié à la présence ou l'absence de nuages et/ou du soleil au zénith;

$S_2(\lambda)$ Variation rose-vert due à la présence d'eau sous forme de vapeur ou brume.

Les figures 3.4 et 3.5 donnent respectivement les courbes représentant les profils spectraux des fonctions $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$ normalisées et de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE.

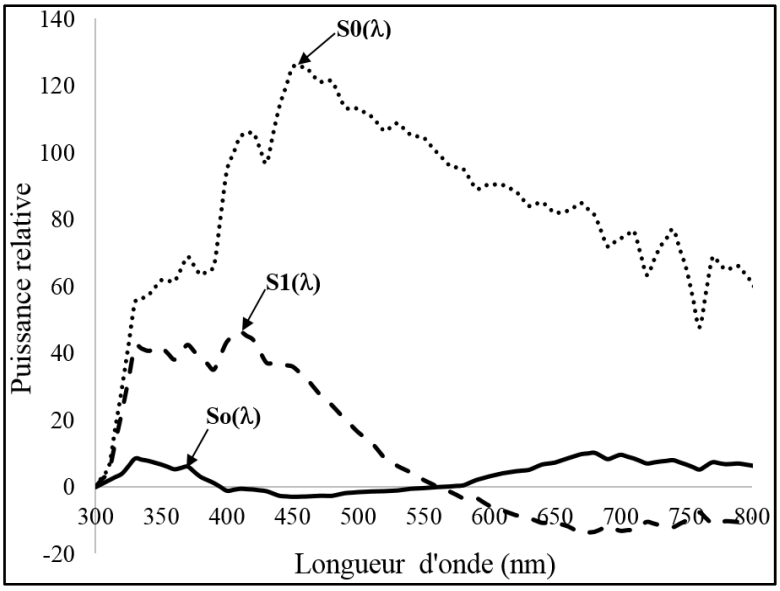


Figure 3.4 Profils spectraux des fonctions $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$
Tirée de CIE 204-2013 (2013)

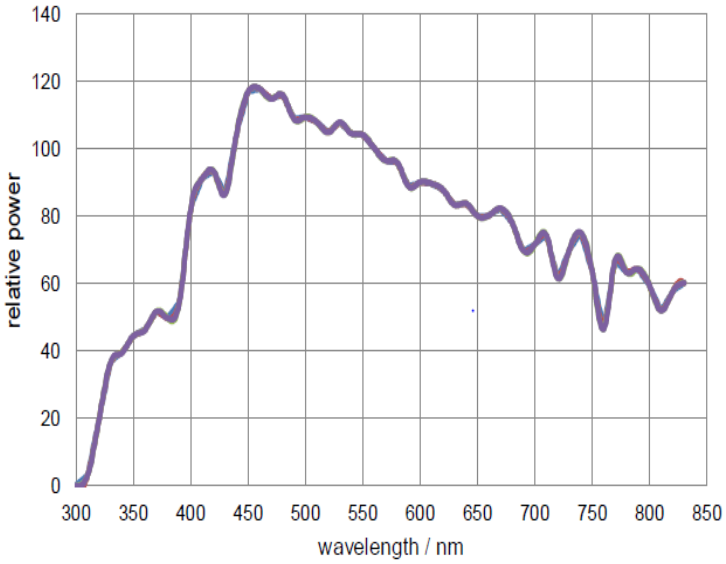


Figure 3.5 Profil spectral polissé de la SPD de
l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE
Tiré de CIE 204-2013 (2013)

Des tables du dernier rapport technique sur la colorimétrie de la CIE (CIE 2004) donnent les valeurs de l'illuminant normalisé D_{65} ainsi que celles des autres illuminants recommandés (D_{50}, D_{55}, D_{75}) par pas de 5 nm obtenues par interpolation linéaire des données initiales. Ces

valeurs sont en accords avec celles à six chiffres significatifs par pas de 1 nm entre 300 nm et 830 nm données dans le rapport de la CIE (CIE 2006), obtenues également par interpolation linéaire (Kránicz and Schanda, 2000; Kosztyán and Schanda, 2013). Les valeurs nulles de S_1 et S_2 à la longueur λ = 560 nm s'expliquent par le fait que toutes les SPDs sont normalisées au voisinage de cette longueur d'onde. La CIE recommande de déterminer les valeurs de SPD aux autres longueurs d'onde comprises entre 300 nm et 830 nm par interpolation lorsque plus de précision est nécessaire. Les facteurs M_1 *et* M_2 donnés par les équations 3.6 et 3.7 ne sont pas considérés comme des constantes car ils dépendent des coordonnées de chromaticité x_D et y_D qui sont fonction de la TCP choisie (Dean and al., 1964) et leurs valeurs pour un échantillonnage à 10 nm d'intervalles sont données par les équations 3.7 et 3.8 (Kránicz and Schanda, 2000; CIE, 2013).

$$M_1 = \frac{-1{,}3515 - 1{,}7703x_D + 5{,}9114y_D}{0{,}0241 + 0{,}2562x_D - 0{,}7341y_D} \tag{3.7}$$

$$M_1 = \frac{-1{,}3515 - 1{,}7703x_D + 5{,}9114y_D}{0{,}0241 + 0{,}2562x_D - 0{,}7341y_D} \tag{3.8}$$

Les constantes figurant dans ces équations dépendent de l'échantillonnage des fonctions $S_{i,0\leq i\leq 2}$ et ont été déterminés à l'origine avec un échantillonnage de 10 nm d'intervalle (CIE, 2013).

La CIE recommande dans son rapport technique CIE-204 :2013 de 2013 une nouvelle redéfinition des profils spectraux des illuminants de la série D afin de réduire les incohérences notées dans les calculs colorimétriques impliquant ces derniers. Des détails sur ces nouvelles données spectrales des illuminants de la série D révisées sont donnés dans les annexes II à V.

Pour l'utilisation pratique de ses illuminants, la CIE a défini un certain nombre de sources pour les simuler.

3.4 Sources standards de la CIE

La distinction entre *"illuminant"* et *"source"* remonte pour la première fois en 1986 dans la publication 15.2 de la CIE (CIE 1986 qui fut remplacée par la publication CIE 15 2004) (CIE, 2013). Les sources permettent de palier d'une part aux problèmes liés à la non-uniformité du rayonnement solaire dans l'espace et dans le temps et aux difficultés ou à l'absence d'accès à ce rayonnement dans les endroits peu ou non desservis tout en garantissant une quasi-reproductibilité des données mesurées. La définition d'une source étant subsidiaire à celle de l'illuminant correspondant, il est possible que les nouveaux progrès, pour des usages de laboratoire, conduisent à des sources améliorées reproduisant les mesures de manière plus exacte et plus appropriée que tel ou tel illuminant. La CIE a défini plusieurs sources standards associées à ses anciens illuminants. La figure 3.6 fait une comparaison entre les concepts de source et d'illuminant.

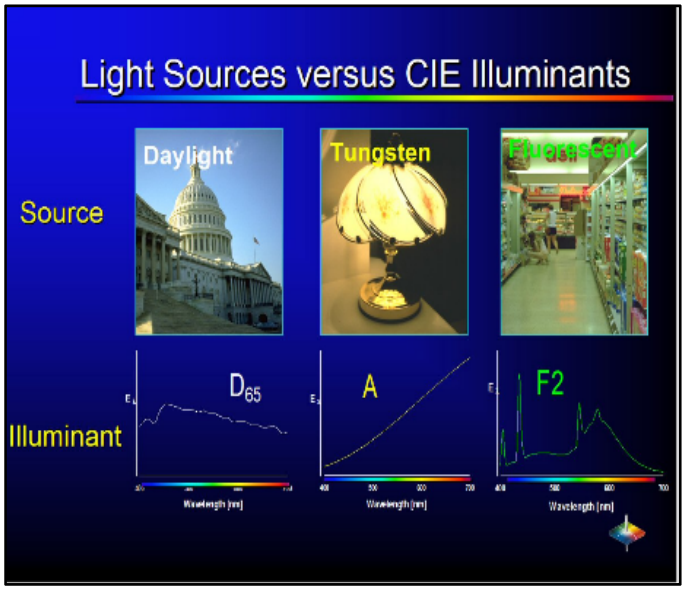


Figure 3.6 Concept de sources et d'illuminants
Tirée de HunterLab (2008)

L'inconvénient d'une source est que la qualité et l'énergie de sa lumière ne sont, le plus souvent, pas décrites et peuvent varier, ce qui limite leur fiabilité du point de vue mathématique ou leur reproductibilité du point de vue technique. Aussi, il n'existe pour le

moment pas de source artificielle reconnue par la CIE comme équivalente à l'un des illuminants de la série D. Néanmoins, elle admet l'utilisation d'un certain nombre de sources dites simulateurs solaires dont les performances sont régies par des normes.

3.4.1 Source artificielle simulant l'illuminant normalisée A

La source standard A de la CIE est une lampe à filament de tungstène remplie de gaz représentant l'illumination du corps noir à une TCP d'environ 2856 K (CIE, 2004). Cette source n'est d'usage que dans des situations spécifiques comme dans le cas de l'étude du métamérisme d'objets colorés. Si l'utilisation de cette source dans le domaine UV est requise, une lampe dotée d'une enveloppe ou d'une fenêtre faite de quartz fondu ou de silicium doit être utilisée car le verre absorbe les radiations UV émises par le filament. (CIE, 2004). Concernant les illuminants B et C de la CIE, dès lors que ces derniers sont devenus obsolètes (Schanda, 2007), nous ne jugeons pas pertinent de s'attarder aux sources qui leur correspondent.

3.4.2 Sources simulant l'illuminant D_{65} de la CIE

En ce qui concerne l'illuminant standard D_{65}, la CIE retient:

> *"Pour le moment, aucune source artificielle n'est certifiée pour représenter l'illuminant standard* D_{65}. *On espère que les nouveaux développements dans le domaine de la fabrication des LEDs et des filtres offriront suffisamment de possibilités pour une recommandation de la CIE"* (CIE, 2004).

En attendant, la CIE a convenu une formule pour décrire la qualité d'un simulateur solaire pour la colorimétrie. Les sources usuelles pour lesquelles les performances en termes de simulation de la lumière du jour ont été évaluées selon les normes décrites dans la publication N^{o} 51 de la CIE doivent être utilisées.

CHAPITRE 4

SIMULATEURS SOLAIRES ET LEURS TECHNIQUES DE CARACTERISATION

4.1 Introduction

Un simulateur solaire (ou soleil artificiel) est un dispositif destiné à reproduire une illumination semblable à celle du soleil dans des conditions particulières. L'objectif principal est de simuler la lumière du jour de manière contrôlable au sein des laboratoires d`essais pour des fins de tests de certains composants tels que des cellules ou écrans solaires, des matières plastiques et d`autres matériaux et dispositifs. Les lampes au xénon à haute pression et les tubes fluorescents de la *"lumière artificielle du jour"* fabriqués par General Électric avec un CRI de 92 sont largement utilisés comme approximation du D_{65} (ISO TC 34/SC 12, 2007).

4.2 Présentation

Nous nous intéresserons juste à l'aspect global pour avoir une idée sur la forme (poids), les dimensions et les prix des simulateurs solaires haut de gamme commercialisés dans le marché. La figure 4.1 montre la photo du model 94063A de la gamme Sol3A des simulateurs solaires d'ORIEL INSTRUMENTS. L'ensemble comporte une lampe au xénon de 1.000 W qui représente la source d'illumination, un boîtier illuminateur pour protéger la lampe, un obturateur intégré, un filtre de masse d'air 1.5 G, un système d'alimentation finement stabilisé et d'autres composants optiques intégrés (Newport, 2014a). La figure 4.2 renseigne sur les dimensions de ce type de simulateur solaire. La valeur mise entre parenthèses est exprimée en millimètre (mm) et celle située au-dessus est donnée en pouces. Le model 94063A d'ORIEL INSTRUMENTS représente le model intermédiaire de ses simulateurs solaires de la gamme Sol3A en termes de dimensions du faisceau lumineux émis (152.4 x 152.4 mm) fonctionnant avec une source au xénon. Son prix est de l'ordre de $ 47.000 en 2014 avant taxes.

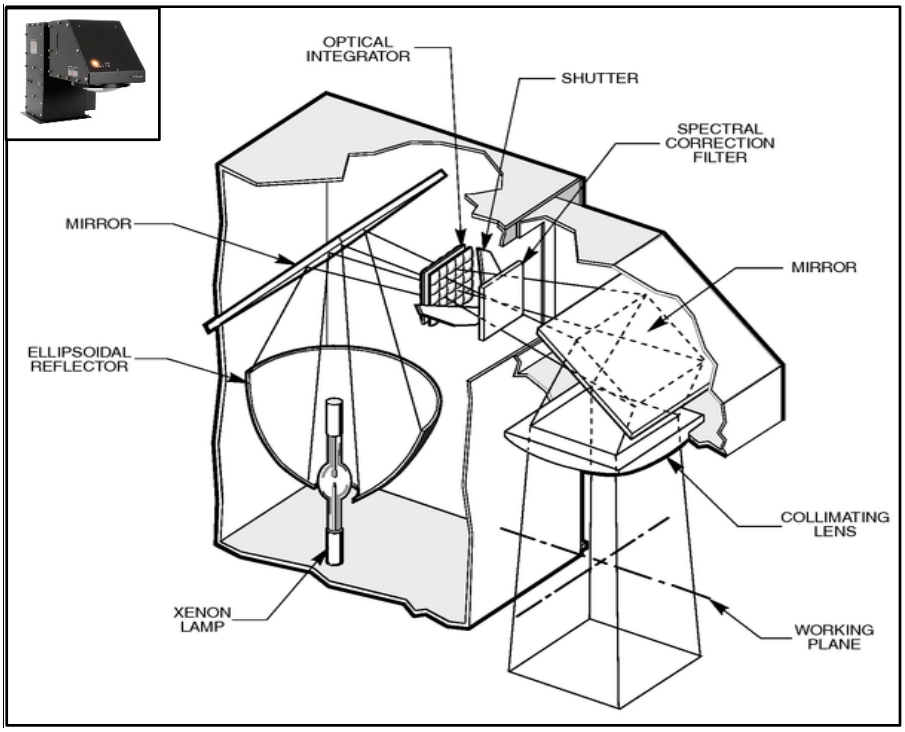


Figure 4.1 Model 94063A de la gamme Sol3A (insert haut gauche) de simulateurs solaires d'Oriel Instruments
Tirée de Newport (2014a)

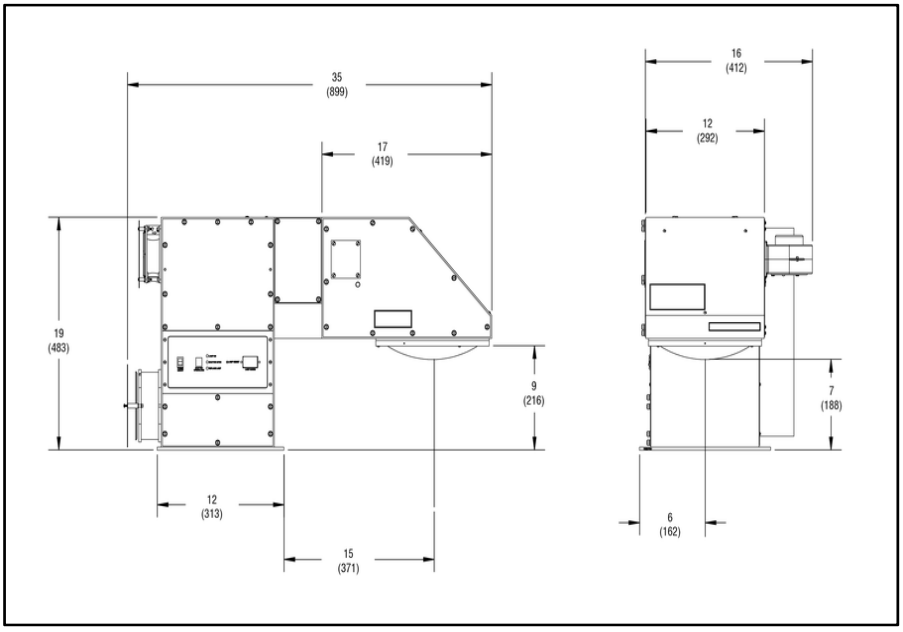


Figure 4.2 Dimensions en pouces (mm) du model 94063A de la gamme Sol3A de simulateur solaire d'Oriel Instruments
Tirée de Newport (2014a)

4.3 Caractéristiques d'un simulateur solaire

Les simulateurs solaires sont caractérisés selon leur mode de fonctionnement, leur zone de couverture de la surface test et leurs propriétés spectrales.

4.3.1 Zone de couverture d'une surface test

La zone de couverture d'un simulateur solaire est évaluée par rapport à des aires test choisies comme standards. De manière habituelle, un simulateur solaire de zone de couverture inférieure ou égale à 30 x 30 cm^2 (ou de diamètre inférieur ou égal à 30 cm pour le cas des formes circulaires) est dit simulateur solaire à petite zone de couverture. Dans le cas contraires, on parle de simulateurs solaires à large zone de couverture**.**

4.3.2 Mode de fonctionnement

Le mode fonctionnement d'un simulateur solaire se rapporte à la continuité de l'irradiance de sortie de la lumière qu'il émet lors d'un cycle test. Le cycle test est le temps nécessaire pour une mesure compète des caractéristiques courant-tension du sytème photovoltaïque. Ce paramètre joue un rôle fondamental dans les applications photovoltaïques car influe sur les temps de réponse de la cellule solaire et de l'acquisition des données. En se basant sur le standard ASMT E927-10, les simulateurs solaires peuvent être divisés en trois catégories:

Mode statique: Ce sont des simulateurs dont la fluctuation l'irradiance de sortie sur une durée de 100 ms n'excède pas les 5% de la valeur moyenne dans le domaine spectral considéré.

Mode mono-pulsé: Ce type de simulateur solaire a une irradiance de sortie dans une seule pulsation d'une durée inférieure ou égale à 100 ms.

Mode multi-pulsé: Dans ce cas de figure, l'irradiance de sortie reçue se présente sous forme d'une série périodique de pulsations lumineuses de courte durée. Le niveau d'irradiance entre deux pulsations consécutives peut ne pas forcément retomber à zéro.

Un simulateur statique dont la stabilité de l'irradiance tombe au-dessous de 5% de la valeur maximale dans un intervalle de temps de 100 ms peut être considéré comme un simulateur pulsé si les pulsations sont périodiques.

4.3.3 Profil spectral d'un simulateur solaire

Il existe plusieurs types de simulateurs solaires du point de vue SPD relative ou de géométrie de l'irradiance bien que leurs spectres puissent être modifiés par des filtres optiques. La performance d'un simulateur solaire du point de vue spectral est évaluée sur la base de trois critères fondamentaux: la concordance (ou *"match"*) spectrale, la non-uniformité spectrale et l'instabilité temporelle de son irradiance comparés à celles d'un spectre de référence. Un des défis majeurs pour simuler l'énergie solaire est de reproduire aussi fidèlement que possible, les effets réels du soleil sur les produits ou composants photovoltaics.

4.3.3.1 Spectres de référence

Le rayonnement solaire reçu à la surface de la terre varie considérablement avec la position géographique, les conditions atmosphériques (ciel nuageux, poussiéreux état de la couche d'ozone), l'heure de la journée, la distance Terre-soleil, l'activité et la rotation du soleil. Les nombreux facteurs influençant le spectre solaire justifient la nécessité de définir des spectres de référence. Les spectres de référence utilisés pour des applications de test et de caractérisation de cellules solaires photovoltaïques sont ceux établis par les organismes de ASTM, IEC et JIS dans leurs publications respectives ASTM E 927-10, 60904-9 Edition2 l'IEC (2007) et JIS C8912. Ces spectres de référence sont établis en tenant compte de la position du point test par rapport au soleil et de la longueur de parcours du rayon solaire dans l'atmosphère terrestre définies sous forme de mode *"Air Masse"* (AM). La figure 4.3 indique quelques modes de rayonnement selon l'inclinaison du rayon solaire par rapport à la position du soleil au zénith au niveau du point test (Newport, 2014b) et le tableau 4.1 donne, en pourcentage, la distribution spectrale de l'irradiance d'un spectre de référence pour quelques modes par intervalles de longueurs d'onde de 100 nm telle que défini dans la norme ASTM E927-10 (ASTM l, 2010; Newport, 2014b)

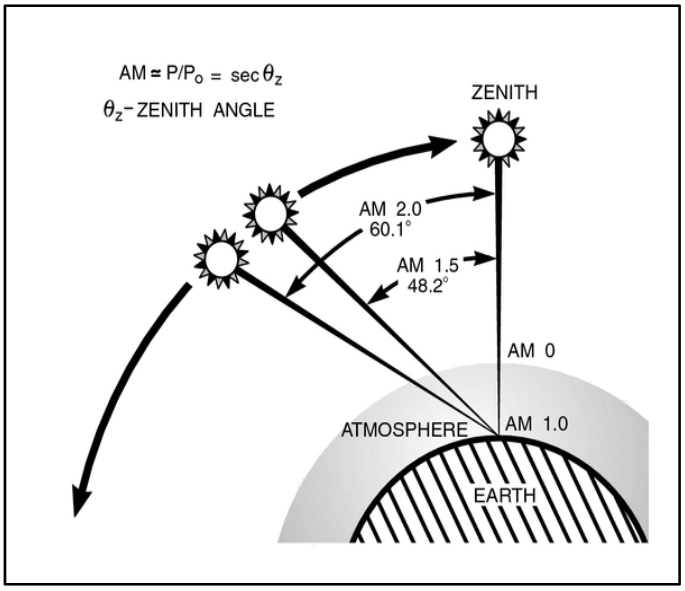


Figure 4.3 Dépendance du mode d'une phase de lumière du jour en fonction de l'inclinaison du rayon solaire par rapport au zénith
Tirée de Newport (2014b)

Tableau 4.1 Distribution spectrale de l'irradiance d'un spectre de référence pour quelques modes, donnée en pourcentage par intervalles de longueurs d'onde de 100 nm, telle qu'illustré dans la norme ASTM E927-10
Tiré d'ASTM 1 (2010)

Intervalle de longueur d'onde (nm)	**Pourcentage de l'irradiance totale**		
	Mode Direct AM1.5	**Mode Global AM 1.5**	**Mode AM0**
0,3 à 0,4	Non spécifié	Non spécifié	8,0
0,4 à 0,5	16,9	18,4	16,4
0,5 à 0,6	19,7	19,9	16,3
0,6 à 0,7	18,5	18,4	13,9
0,7 à 0,8	15,2	14,9	11,2
0,8 à 0,9	12,9	12,5	9,0
0,9 à 1,1	16,8	15,9	13,1
1,1 à 1,4	Non spécifié	Non spécifié	12,2

Ces normes, étaient destinées à l'origine à la caractérisation de cellules solaires photovoltaïques à base de silicium; c'est pourquoi le domaine spectral dans lequel elles sont définies correspond à la bande d'absorption de ce dernier. Néanmoins, ces définitions sont également adaptées à de nombreuses autres technologies photovoltaïques en dehors des concentrateurs solaires en raison de leur large bande d'absorption (300 - 1800 nm) (Wikipédia, 2014b). D'autres normes divisent le même domaine spectral en sept (ou plus) intervalles et le domaine spectral de l'irradiance du simulateur à caractériser doit être divisé de manière identique à celui de la norme par rapport à laquelle ses performances seront définies pour un mode donné. La réalisation et la caractérisation de simulateurs solaires pour des applications photovoltaïques sont établies sur la base de ces spectres de référence.

4.3.3.2 "Spectral match"

Le *"spectral match"* est le rapport, calculé par intervalle de longueur d'onde, de la densité spectrale de l'irradiance d'un simulateur solaire sur celle du spectre de référence. Il détermine le niveau de conformité de l'irradiance d'un simulateur solaire à celle prise comme référence de la phase de la lumière du jour considérée. Un simulateur solaire est d'autant plus performant du point de vue *"spectral match"* que ce ratio est proche de 1 dans le domaine spectral considéré.

4.3.3.3 Non-uniformité spatiale de l'irradiance

La non-uniformité spatiale S_{NE} traduit l'uniformité de la distribution spectrale de puissance d'un simulateur solaire sur une surface test. Elle est exprimée en pourcentage selon l'équation 4.1.

$$S_{NE} = 100\% * \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \tag{4.1}$$

E_{max} et E_{min} sont les valeurs maximale et minimale de l'irradiance du simulateur solaire mesurées par un détecteur à la surface du plan test.

4.3.3.4 Instabilité temporelle de l'irradiance

La méthode de calcul de l'instabilité temporelle T_{IE} est assez complexe car tient compte du mode de fonctionnement du simulateur solaire. Elle ne peut être déterminée pour le cas d'un simulateur solaire en mode pulsé que lorsque ce dernier est muni d'un système intégré d'acquisition de données. Ce système peut fonctionner en mode d'échantillonnage simultané ou séquentiel. L'équation 4.2 n'est applicable que pour un simulateur solaire fonctionnant en mode statique dont l'uniformité spatiale de l'irradiance varie moins de 5% durant une période de mesure des données courant-tension (I = f(V)) incluant le temps séparant les acquissions des données de l'irradiance, du courant et de tension (ASTM l, 2010).

$$T_{IE} = 100\% * \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \tag{4.2}$$

$E_{max}\ et\ E_{min}$ représentent respectivement les valeurs maximale et minimale de l'irradiance du simulateur solaire mesurées par un détecteur en un point particulier de la surface du plan test durant un temps d'acquisition fixé. Un fabricant doit spécifier le temps d'acquisition des données qui ont servi à la classification de l'instabilité temporelle. Des détails sur le calcul de l'instabilité temporelle de l'irradiance d'un simulateur solaire sont donnés à la référence (ASTM l, 2010).

4.4 Techniques de caractérisation et classification des simulateurs solaires

4.4.1 Techniques de caractérisation

Il existe deux méthodes principales pour caractériser un simulateur solaire. Une méthode quantitative basée sur la détermination de l'indice de rendu de couleur et des indices de métamerisme et une méthode qui consiste à déterminer, du point de vue spectral, le niveau de conformité des caractéristiques du simulateur solaire à celles, jugées idéales, de la phase de la lumière du jour à représenter. Ce type de classification concerne le plus souvent des applications telles que la calibration et la simulation d'instruments, de systèmes ou l'étude de la fluorescence d'échantillons.

4.4.1.1 Méthodes quantitatives

A. Indice de rendu de couleur (CRI)

L'indice de rendu de couleurs (CRI) est la seule échelle de mesure mondialement acceptée et la plus répandue pour évaluer la performance des sources lumineuses en termes de rendu de couleurs. Cette échelle de mesure dont les valeurs sont comprises entre 0 à 100 (du noir au blanc standard) permet d'identifier une source lumineuse sur la base de sa capacité d'afficher une couleur avec la précision qu'elle aurait sous illumination par une source de référence en tenant compte des erreurs engendrées par les ellipses de MacAdam. Cette méthode a défini huit échantillons de couleurs test de base (TCSs pour *"Test Color Samples"* en anglais) qui se partagent le cercle des teintes (saturations modérées et luminosités comparables) et six autres supplémentaires que sont le rouge vif, le jaune vif, le vert vif, bleu vif, le rose-jaunâtre et vert-olive modéré, tous sélectionnés à partir de la compilation de couleurs de Munsell (Chalmers and Soltic, 2010). Le tableau 4.2 donne les notations approximatives de Munsell associées à ces échantillons de couleur, ainsi que leur couleur apparente sous l'illumination de la lumière du jour.

Calcul de l'indice de rendu de couleur

Pour calculer le l'indice de rendu de couleurr, la première étape consiste à déterminer la TCP de la source test pour le choix de l'illuminant de référence. Un choix judicieux de cette TCP est recommandé car la transformation de l'adaptation chromatique ne s'adapte pas aux grandes différences de chromaticité (Schanda, 2003); la différence de chromaticité entre la source test et l'illuminant de référence doit être inférieure à $5{,}4 \times 10^{-2}$ dans le système CIE 1960 UCS afin d'obtenir des résultats significatifs (Schanda, 2007; Dangol, 2011). Une fois l'illuminant de référence déterminé, l'objectif est de comparer les couleurs de chaque TCS obtenues sous illumination par la source test puis par l'illuminant de référence.

Tableau 4.2 Échantillons de couleur tests de la CIE utilisés pour le calcul du CRI
Adapté de Chalmers and al. (2010)

TCS N°	Approximate Munsell Notation	Colour appearence under daylight
1	7.5 R 6/4	Light greyish red
2	5 Y 6/4	Dark greyish yellow
3	5 GY 6/8	Strong yellow green
4	2.5 G 6/6	Moderate yellow green
5	10 BG 6/8	Light bluish green
6	5 PB 6/8	Light blue
7	2.5 P 6/8	Light violet
8	10 P 6/8	Light reddish purple
9	4.5 R 4/13	Strong red
10	4 Y 8/10	Strong yellow
11	4.5 G 5/8	Strong green
12	3 PB 3/11	Strong blue
13	5 YR 8/4	Light yellowish pink (human complexion)
14	5 GY 4/4	Moderate olive green (leaf green)

Pour ce faire, on détermine les valeurs de tristimuli de chaque TCS sous illumination par chacune des deux sources. On se retrouve avec deux groupes de valeurs de tristimuli $T_{i,l,t}\ et\ T_{i,l,r}$ avec i = 1 pour X, i = 2 pour Y et i = 3 pour Z. L'indice t signifie source test et r l'illuminant de référence. Les TCSs sont indiqués par l'indice l ($0 \leq l \leq 14$, avec l = 0 indique la source test/illuminant de référence). La différence de chromaticité entre $T_{i,l=0,t}\ et\ T_{i,l=0,r}$, c'est-à-dire entre les chromaticités des deux sources appelée *"variation adaptative de couleur"*, est régie par la transformation de l'adaptation chromatique de von Kries (Schanda, 1998; Guillo, 2004; Dangol, 2011). Les différences de couleur $\Delta E_{i,l,r-t}$ entre $T_{i,l,r}\ et\ T_{i,l,t}$ pour $1 \leq l \leq 14$ sont calculées en utilisant l'espace de couleur uniforme UCS CIE 1964. Il est clair que toutes les valeurs de $\Delta E_{i,l,r-t}$ ne sont nulles que si les SPDs de la source teste et de l'illuminant de référence sont parfaitement identiques. Il a été arbitrairement décidé que les sources fluorescentes blanc-chaudes aient un CRI de 50

(Schanda, 1998). En tenant compte de ces considérations, les indices de rendu de couleur spéciaux R_i sont calculés à partir des différences de couleurs suivant l'équation:

$$R_i = 100 - 4{,}6\,\Delta E_{i,l,r-t} \tag{4.3}$$

Afin de faciliter l'évaluation du rendu de couleur de la source, une simplification supplémentaire fut introduite par la CIE: l'indice de rendu des couleurs global R_a qui est la moyenne arithmétique des huit premiers indices de rendu des couleurs spéciaux (Schanda, 2007).

$$R_a = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} R_i \tag{4.4}$$

Du point de vue rendu des couleurs, une bonne source lumineuse (Bouaraba, 2012) est une source ayant un CRI supérieur à 90. Le tableau 4.3 donne une appréciation du rendu des couleurs en fonction de la valeur du CRI.

Tableau 4.3 Appréciation du rendu des couleurs
en fonction de la valeur du CRI
Tiré de Bouaraba (2012)

CRI	**Qualificatif d'appréciation**
90 - 100	Excellent rendu des couleurs
80 - 90	Bon rendu des couleurs
70 - 80	Rendu des couleurs moyen
50 - 70	Mauvais rendu des couleurs
< 50	Très mauvais rendu des couleurs

La méthode de calcul du CRI comme simple moyenne arithmétique des huit premiers indices du rendu des couleurs spéciaux réduit l'information que ce paramètre contient du point de vue rendu de coiuleur. Lorsque deux sources ont le même R_a, cela ne signifie pas qu'un échantillon de couleur test particulier illuminé par chacune des deux sources donne des couleurs apparentes identiques. La comparaison des $R_i s$ va fournir une meilleure idée sur la

similarité des deux sources, même si dans ce cas aussi, des valeurs de R_is égales ne signifient pas que dans une scène complexe, la couleur apparaîtra identique sous illumination de l'une ou de l'autre source. Avec l'avènement des lampes fluorescentes à trois-bandes caractérisées par des efficacités et des CRIs assez élevées, les difficultés du CRI à décrire le rendu de couleur visuel devenaient de plus en plus importants (Schanda, 1998). L'avènement des LEDs blanches a accentué les inquiétudes sur le niveau de performance du CRI.

Limites de l'indice de rendu de couleur

L'indice de rendu de couleur présente un certain nombre de limitations particulièrement liées aux méthodes utilisées par la CIE pour le déterminer, surtout lorsqu'il est utilisé pour caractériser des DELs ou comme indicateur de qualité de couleur (NIST, 2006) pour diverses raisons:

- Le système de coordonnées CIE U*V*W* utilisé pour le calcul des différences de couleurs est non-uniforme, dépassé et son utilisation n'est plus recommandée. Actuellement, la CIE recommande les sytèmes de coordonnées CIE $L^*a^*b^*$ 1976 (CIELAB) et CIE $L^*u^*v^*$ 1976 (CIELUV) pour le calcul des différences de couleurs (Baniya, 2012);

- La méthode de calcul de la CIE spécifie que la TCP de la source de référence doit être la même que celle de la source test, ce qui suppose une parfaite adaptation chromatique entre les chromaticités des deux sources. Cependant, cette hypothèse n'est pas valable aux valeurs extrêmes de TCP. Par exemple, à 2000 K (rouge vif) le radiateur de Planck a un $R_a = 100$, de même que le spectre de la lumière du jour à une TCP de 20.000 K (bleu vif) alors aucun d'entre elles ne rende correctement la couleur;

- Le rendu des couleurs des objets de couleurs saturées peut être très médiocre même si la valeur du CRI est bonne. De plus, l'optimisation des spectres des sources sur la base du CRI peut rendre les valeurs de ce dernier très élevées alors que le rendu de couleur correspondant reste faible. Ce problème est dû au faible nombre d'échantillons utilisé dans le calcul du CRI et à la très faible saturation chromatique de ces échantillons;

- Les huit indices spéciaux de rendu de couleur sont combinés par simple moyenne arithmétique pour obtenir l'indice global de rendu de couleur. Ceci permet à une source d'avoir un CRI élevé, même si elle rend une ou deux couleurs de manière très médiocre, Cette situation est d'autant plus fréquente aux sources avec des SPDs ayant des pics très rapprochés. Certaines sources au sodium à faible pression présentent des CRIs négatifs, ce qui rend ces derniers très difficile à interpréter (Davis and al., 2004; NIST, 2006);

- Selon la conclusion du rapport technique 177:2007, *"Color Rendering of White LED Light Sources"* de la CIE, le CRI n'est généralement pas applicable pour évaluer le rendu de couleurs de sources hybrides à base d`une association de DELs lorsque celle-ci contient une DEL blanche (CIE, 2007);

- Les simulateurs solaires sont de la famille des sources blanches. Une limite supplémentaire du CRI dans l'évaluation des performances d'un simulateur solaire est qu'il ne permet d'évaluer que la partie visible du spectre.

Sur la base de ces limitations, il est admis que l'accent absolu sur la fidélité des couleurs du CRI est erroné et une mesure plus générale de la qualité de la couleur doit être considérée. Plusieurs autres méthodes d'évaluation de la performance des sources en rendu des couleurs ont été développées pour apporter des solutions aux limitations du CRI. Un bon nombre de ces méthodes sont développés en détails par Rupak Raj Baniya dans son mémoire de Mastère sur le sujet «*Study of various metrics evaluating color quality of light sources*».

B. Indice de Métamerisme (MI pour *Metamerism Index* en anglais)

La méthode CIE N^{o} 51 présentée dans son Rapport Technique N^{o} 13.3 permet d'évaluer de manière quantitative la finesse de l'approximation de l'illuminant normalisé D_{65}, et des illuminants recommandés D_{55} et D_{75} de la CIE par des simulateurs solaires (Schanda, 1998). Cette technique repose sur le calcul des coordonnées de chromaticité du simulateur solaire à partir de sa SPD relative déterminée dans le domaine spectral 300 - 700 nm. Ces coordonnées

doivent avoir certaines valeurs permises, qui sont spécifiées en utilisant le système de coordonnées uniforme CIE (u', v') 1976. Cette méthode de caractérisation impose que le point représentant le simulateur solaire dans le diagramme de chromaticité CIE (u', v') 1976 soit dans un cercle de rayon de 0.015 centré à l'illuminant à représenter (Lam and Xin, 2002). Après la vérification des conditions de validité, la méthode consiste à calculer les Indices de Métamérisme Spéciaux du Visible (entre 400 - 700 nm), noté MIvis et du domaine UV, noté MIuv (entre 300 - 400 nm) qui découlent de la différence des SPDs des illuminants à celles des simulateurs leurs correspondant suivant les équations 4.5 et 4.6 .

$$\mathrm{MI}_{\mathrm{vis}} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{5} \frac{\Delta \mathrm{E}_{\mathrm{i}}}{5} \tag{4.5}$$

$$\mathrm{MI}_{\mathrm{uv}} = \sum_{\mathrm{j}=1}^{3} \frac{\Delta \mathrm{E}_{\mathrm{j}}}{3} \tag{4.6}$$

Le calcul de MI_{vis} implique cinq paires de métamères, chacun parfaitement adapté aux illuminants de la CIE. Lorsqu'un simulateur solaire est utilisé, la différence de couleur moyenne sera supérieure à 0 à cause de la différence de sa SPD à celle de l'illuminant de la CIE. Cette valeur moyenne de la différence de couleur donne une indication sur la qualité du simulateur solaire dans le spectre visible.

Pour le calcul de MI_{uv}, trois paires métamères virtuels sont utilisés dont chacun est parfaitement adapté aux illuminants standards de la CIE dans la partie UV. De façon similaire au calcul MI_{vis}, la valeur moyenne des différences de couleur de ces trois paires est une indication sur la conformité du simulateur solaire à l'illuminant de la CIE pris comme référence dans la partie UV du spectre. L'équation CIELAB ou CIELUV pour le calcul de la différence de couleurs peut être utilisée pour le calcul des différences de couleurs entre les pairs de métamères virtuels dans chaque cas.

4.4.1.2 Méthode spectrale: Distribution de l'irradiance spectrale

La caractérisation d'un simulateur solaire du point de vue spectral pour des applications photovoltaïques repose sur les trois paramètres essentiels déjà abordés à la section 4.3 que sont: le *"spectral match"*, la non-uniformité spatiale et l'instabilité temporelle de l'irradiance spectrale. Ces paramètres sont évalués sur la base des spécifications établies dans les normes d'ASTM, d'IEC et de JIS. Aussi, le rendement d'une cellule solaire est d'autant meilleurs que l'énergie qu'elle absorbe est proche de l'énergie de la bande interdite de son semi-conducteur.

4.4.2 Classification des simulateurs solaires

Les techniques de caractérisation abordées à la section 4.4.1 ont permis de répartir les simulateurs solaires en classes selon leur performance. Sur la base des indices de métamerisme, la méthode N° 51 de la CIE a été utilisée pour établir une échelle de notation pour catégoriser la qualité d'un simulateur solaire (Lam and Xin, 2002). Le tableau 4.4 donne les différentes catégories de simulateurs solaires établies par cette méthode de caractérisation, la catégorie A correspond au meilleur simulateur solaire par contre la catégorie E correspond au pire. Avec cette méthode, les simulateurs solaires ayant des MI_{vis} de catégorie B ou plus et des MI_{uv} de catégorie C ou plus sont recommandés dans la comparaison visuelle des couleurs et dans de nombreuses autres applications (Schanda, 1998).

Tableau 4.4 Catégorisation des sources sur la base de l'indice de métamerisme
Tiré de Schanda (1998)

Catégorie	MI (CIELAB)	MI (CIELUV)
A	$< 0{,}25$	$< 0{,}32$
B	$0{,}25 < MI < 0{,}5$	$0{,}32 < MI < 0{,}65$
C	$0{,}5 < MI < 1{,}0$	$0{,}65 < MI < 1{,}3$
D	$1 < MI < 2{,}0$	$1{,}3 < MI < 2.6$
E	$MI > 2{,}0$	$MI > 2.6$

Du point de spectral, un simulateur solaire est défini selon le niveau de conformité de son irradiance spectrale à l'irradiance spectrale de référence. Cette méthode permet d'associer à

chacun des critères de performance *"spectral match"*, non-uniformité spatiale et instabilité temporelle de l'irradiance trois classes; **Classe A**, **Classe B** et **Classe C**, traduisant, dans un ordre décroissant, le niveau de performance du simulateur solaire par rapport au critère considéré. Par exemple un simulateur de **Classe ABA** est de Classe A en *"spectral match"* de l'irradiance, Classe B en non-uniformité spatiale de l'irradiance et de Classe A en instabilité temporelle de l'irradiance. Un simulateur solaire de **Classe A** équivaut à un simulateur de **Classe AAA** (Applied Optix, 2014). Le tableau 4.5 donne les différentes classes associées à un simulateur solaire selon les normes établies par l'ASTM, l'ICE et le JIS.

Tableau 4.5 International standards for solar simulation performance
Tiré de Applied Optix (2014)

Performance Parameters	**Standard Organisation**		
	ASTM	**IEC**	**JIS**
Spectral Match			
Class A	0.75 - 1.25	0.75 - 1.25	0.75 - 1.25
Class B	0.6 0 - 1.40	0.6 0 - 1.40	0.6 0 - 1.40
Class C	0.4 0 - 2.00	0.4 0 - 2.00	0.4 0 - 2.00
Irradiation Non-Uniformity			
Class A	≤ 3%	≤ 2%	≤ 2%
Class B	≤ 5%	≤ 5%	≤ 3%
Class C	≤10%	≤ 10%	≤ 10%
Temporal Instability			
Class A	≤ 2%	≤ 2%	≤ 1%
Class B	≤ 5%	≤ 5%	≤ 3%
Class C	≤ 10%	≤ 10%	≤ 10%

La performance d'un simulateur solaire peut dépendre d'autres paramètres tels que la sensibilité du détecteur; le choix d'un matériau de référence pour déterminer l'uniformité spatiale de l'irradiance spectrale est essentiel et ce matériau doit avoir une réponse spectrale appropriée par rapport au simulateur. Les informations sur les dimensions de la zone de

surface test que peut couvrir le simulateur doivent être données par le fabriquant pour aider au bon usage de celui-ci. Une cartographie de l'uniformité spatiale de l'irradiance spectrale doit être associée au simulateur pour assister l'utilisateur dans ses opérations et définir clairement les zones de surface test qui devront être vues par le simulateur sous des classifications différentes. De plus, la classe d'un simulateur solaire standard ne fournit pas des informations sur les erreurs de mesures électriques lors de l'évaluation des performances d'un système photovoltaïque. De telles erreurs dépendent des instruments et des procédures utilisés.

CHAPITRE 5

MATERIEL ET METHODES

5.1 Introduction

La réalisation d'une source blanche hybride par une association de DELs nécessite de bien comprendre ces dernières. Les DELs sont des composants électroniques qui ont la capacité d'émettre de la lumière lorsqu'elles sont traversées par un courent électrique. Avec les avancées en sciences des matériaux notées ces dernières années, les DELs s'imposent de plus en plus dans de nombreuses applications telles que la signalisation, l'affichage, l'éclairage, etc., tout en offrant des voies prometteuses dans la réalisation de sources lumineuses plus complexes. Dans les premières sections de ce chapitre sont présentées quelques propriétés des DELs essentielles dans la caractérisation de notre simulateur solaire.

5.1.1 Structure d'une DEL à semi-conducteurs

Une DEL est constitué principalement d'une puce à semi-conducteurs dopée de manière à créer une jonction p-n afin de ne permettre la circulation du courant que dans un seul sens. Le côté n (ou cathode) contient un excès d'électrons et le côté p (ou anode) contient un excès de trous. Un courant électrique peut circuler de l'anode vers la cathode. Pour des raisons technologiques, les semi-conducteurs à bande interdite directe avec des énergies correspondant à des longueurs d'onde allant du proche IR au proche UV conviennent mieux pour la réalisation des DELs Mottier (2008). La figure 5.1 montre la structure énergétique d'un semi-conducteur à bande interdite directe dans l'espace des phases. La longueur d'onde du rayonnement lumineux émis par la DEL dépend des états énergétiques des électrons et trous qui lui ont données naissance.

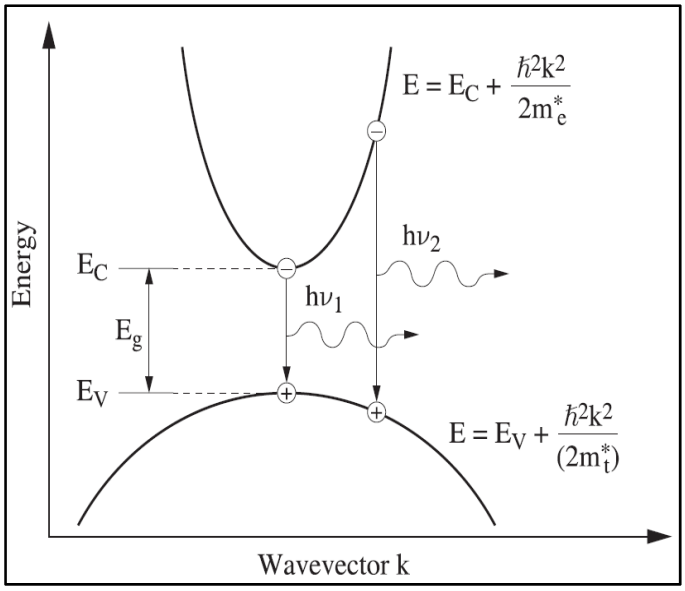


Figure 5.1 Structure énergétique d'un semi-conducteur
à bande interdite directe dans l'espace des phases
Tirée de Mottier (2008)

5.1.2 Mouvement des charges et génération de la lumière

La création de la jonction p-n entraîne un déséquilibre de concentration des charges de part et d'autre de celle-ci. Ce déséquilibre provoque un libre déplacement des électrons de la cathode vers l'anode et des trous dans le sens opposé jusqu'au rétablissement de l'équilibre qui se traduit par la création d'une zone de déplétion. La figure 5.2 illustre de manière simplifiée le mouvement des charges à travers une jonction p-n dans une DEL à semi-conducteurs. En appliquant une tension positive suffisante sur l'anode de la DEL, les électrons reprennent leur déplacement de la cathode vers l'anode et les trous de l'anode vers la cathode. Lorsqu'un électron rencontre un trou dans la zone de déplétion, les deux se recombinent en libérant de l'énergie sous forme d'un photon lumineux émis par la DEL. Plus un semi-conducteur est dopé, plus le taux de recombinaison est élevé dû au faible temps de vie des porteurs de charges minoritaires, plus l'intensité de la lumière émise est importante.

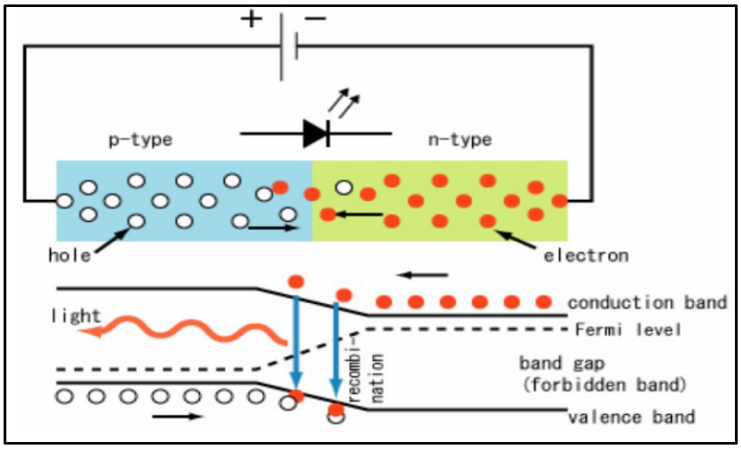


Figure 5.2 Diagramme simplifié d'une jonction p-n d'une diode à semi-conducteurs montrant le mouvement des électrons et des trous lorsqu'une tension positive est appliquée
Tirée de Velay (2011)

5.2 Propriétés photométriques des DELs

Quelques grandeurs photométriques caractérisant de manière générale les sources lumineuses sont déjà énoncées au chapitre 1. Nous ne les abordons de nouveau dans cette section que pour donner leurs ordres de grandeur dans le cas spécifique des DELs.

5.2.1 Intensité lumineuse des DELs

Dans le cas d'une DEL ayant un profil d'émission spatial Lambertien, l'intensité lumineuse mesurée dans la direction normale à la surface émettrice est donnée par l'équation 5.1.

$$I_v = \frac{\Phi_{detecteur}}{\gamma}\left(\frac{r^2 + D^2}{\pi r^2}\right) \quad \text{(système SI)} \tag{5.1}$$

Avec

$\phi_{detecteur}$: puissance totale mesurée au niveau du détecteur en watts

r: rayon en mètres de la surface réceptrice du détecteur;

D: distance en mètres entre la source et le détecteur;

γ: facteur de perte (rapport du nombre de photons mesuré par le détecteur sur le nombre de photons émis par la source).

Des DELs blanches ayant une intensité lumineuse de 30 Cd dans un cône de rayonnement de demi-angle au sommet de 15^{o} sont commercialisées par Nichia (Lumitronix, 2013). Pour une luminosité donnée, l'intensité lumineuse est inversement proportionnelle au demi-angle au sommet du cône de rayonnement d'une DEL.

5.2.2 Luminosité des DELs

5.2.3 Flux lumineux des DELs

La notion du flux lumineux à déjà été abordée à la section 1.2 du chapitre 1. La figure 5.3 donne un exemple de la dépendance du flux lumineux et de l'efficacité externe d`une DEL blanche à rendement super-élevé en fonction du courant d`alimentation.

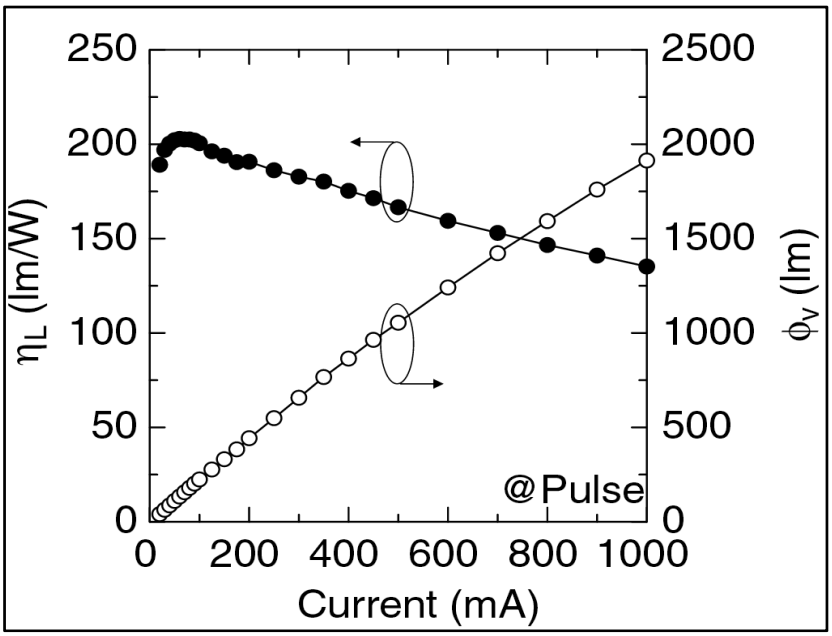


Figure 5.3 Dépendance du flux lumineux φ_{lum} et du rendement lumineux externe η_L d'une DEL blanche ultra puissante entre 20 et 1000 mA. φ_v, V_f, η_L, T_{cp} et (x, y) à 350 mA avaient pour valeurs respectives 203 lm, 3.18 V, 183 lm W^{-1} 4700 K et (0.36, 0.39)
Tirée de Narukawa et al. (2010)

5.2.4 Efficacité lumineuse de radiation (LER) des DELs

Un des défis majeurs de la technologie DELs réside au niveau de l'efficacité lumineuse. En 2009, des chercheurs américains s`étaient déjà officiellement fixés comme objectif de réaliser, avant 2011, des DELs blanches ayant des LERs de 200 $lm.W^{-1}$ et des durées de vie de plus de cinq ans pour un prix de moins $1.00 par diode. Des simulations effectuées par Yoshi Ohno et Wendy Davis du National Institute of Standards and Technology (NIST) ont montré que des DELs présentant des spectres d`émission avec de bons CRIs et des LERs comprises entre 350 et 460 $lm.W^{-1}$ peuvent être obtenues (US-DOE, 2013). Le tableau 5.1 montre les valeurs actuelles de LERs ainsi que les projections en termes de performance et prix de quelques types de DELs disponibles au sein du Department Of Energy des États-Unis (DOE).

Tableau 5.1 Sommaire des projections sur les performances et le prix des DELs blanches froides et blanches chaudes
Tiré d'US-DOE (2013)

Caractérisitques des DELs	2012	2013	2015	2020	Objectif
Efficacité du blanc-froid ($lm.W^{-1}$)[4]	150	164	190	235	266
Prix du blanc froid ($\$.klm^{-1}$)	6	4	2	0.7	0.5
Efficacité du blanc-chaud ($lm.W^{-1}$)[5]	113	129	162	224	266
Prix du blanc-chaud (($\$.klm^{-1}$)	7.9	5.1	2.3	0.7	0.5

[4,5] Les projections sur les dispositifs à DELs blanc-froid considèrent des TCP de 4746 à 7040 K et des CRI > 70, tandis que les projections sur les dispositifs à DELs blanc-chaud considèrent des TCP de 2580 à 3710 K et des CRI > 80. Toutes les projections d'efficacité considèrent que les dispositifs sont mesurés à une température de 25 °C avec une densité de courant d'alimentation de 35 A/cm^2.

5.2.5 Couleur des DELs

La couleur d'une DEL est caractérisée par l'énergie de la bande interdite des matériaux semi-conducteurs qui constituent sa jonction p-n. La figure 5.4 montre l'énergie de la bande interdite et la longueur d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires c'est-à-dire des semi-conducteurs formés d'une association de deux composants.

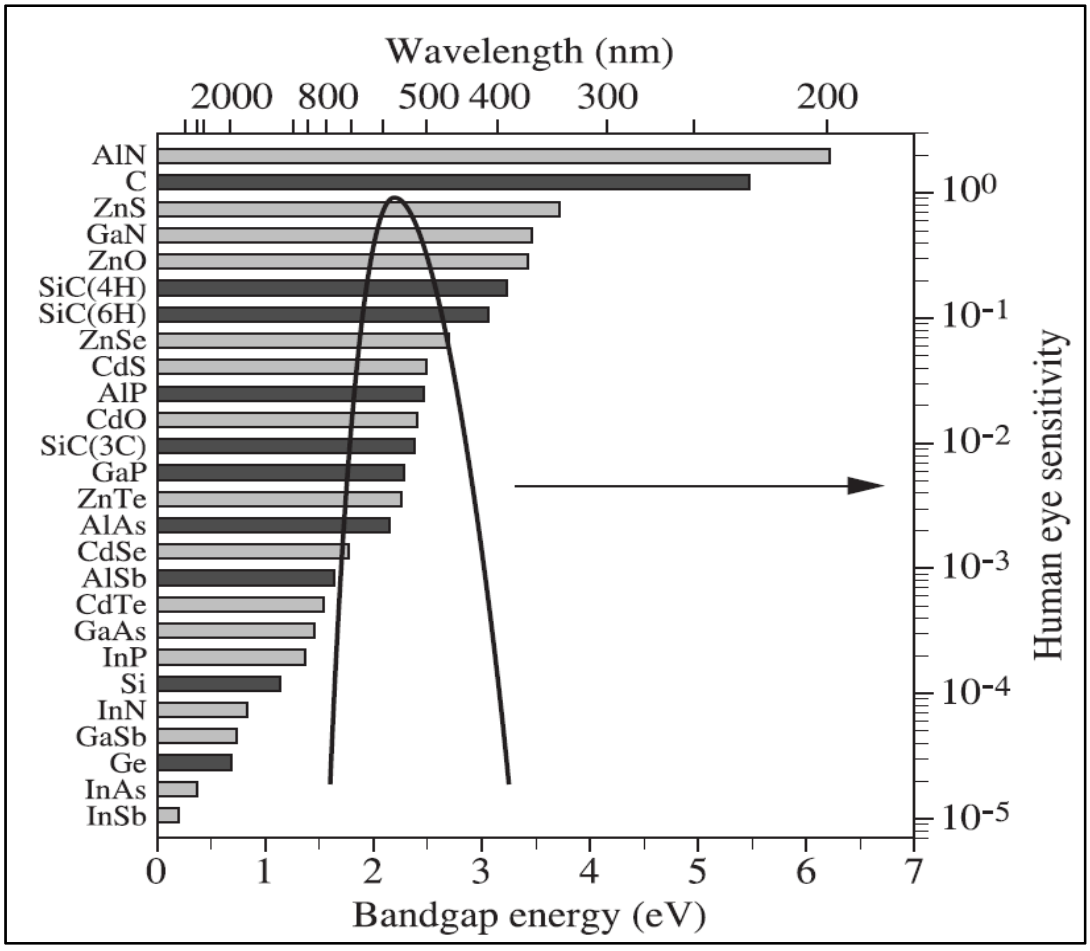


Figure 5.4 Énergie de la bande interdite et longueurs d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires. Les barres grises correspondent aux semi-conducteurs à bande interdite directe et celles sombres aux semi-conducteurs à bande interdite indirecte. La courbe continue représente la sensibilité de l'œil humain, V (λ) exprimée ici en fonction de l'énergie de la bande interdite
Tirée de Mottier (2008)

En se référant à la figure 5.1, lorsqu`un électron issu du niveau minimum de bande conduction se recombine avec un trou du niveau maximum de la bande de valence (k = 0), celui-ci libère un photon de longueur d'onde λ_1 , comme l'illustre l'équation 5.2.

$$h\frac{c}{\lambda_1} = E_g = E_C - E_V \tag{5.2}$$

Avec

$h =$ constante de Planck;

E_g: énergie de la bande interdite;

c: célérité de la lumière dans le vide.

La longueur d'onde λ_1 correspond exactement à l'énergie de la bande interdite E_g du semi-conducteur. Il est possible que les transitions se fassent avec des valeurs de $k \neq 0$, le photon issu de la recombinaison aura une longueur d'onde λ_2 légèrement différente de λ_1. Par conséquent, la DEL produira une $''raie''$ avec une longueur d'onde centrale (ou dominante) λ_d et une largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda_{FWHM}$. La largeur de bande à mi-hauteur $\Delta\lambda_{FWHM}$ dépend d'une part de la densité électronique dans l'intervalle d'énergie $E \pm \Delta E$ considéré, d'autre part de la densité des états énergétiques du semi-conducteur Mottier (2008). La valeur de $\Delta\lambda_{FWHM}$ est déterminée aisément par l'équation 5.3.

$$\Delta E_{FWHM} = hE_C\nu_{FWHM} = 1.8k_BT \tag{5.3}$$

L'intensité maximale de la DEL à la longueur d'onde $\lambda_{max} \neq \lambda_1$ est donnée par l'équation 5.4.

$$\lambda_{max} = \frac{c}{\frac{E_g}{h} + \frac{k_BT}{2h}} \tag{5.4}$$

Avec

T : température de la jonction;

k_B : constante de Boltzmann.

5.3 Contraintes de température et stabilité des DELs

Une DEL est généralement considérée comme un dispositif *"froid"* en termes de température car son rayonnement ne contient pas de radiation infrarouge contrairement aux lampes incandescentes. Aussi, le mécanisme de génération de lumière dans une DEL diffère de celui l'excitation thermique d'une substance comme les filaments de tungstène dans les lampes à incandescence. Cependant, leur jonction est une source de chaleur dissipée par convexion et par conduction. Une DEL fonctionnant dans un environnement à température ambiante normale (entre 20 °C et 25 °C) et aux courants recommandés par le fabricant peut avoir des températures de jonction très élevées de l'ordre de 60 °C à 80 °C. La figure 5.5 montre la dépendance des intensités lumineuses relatives de trois DELs (rouge, bleue et blanche) en fonction de la température de leur jonction. Les données expérimentales sont normalisées à 100 pour une température ambiante de 25 °C.

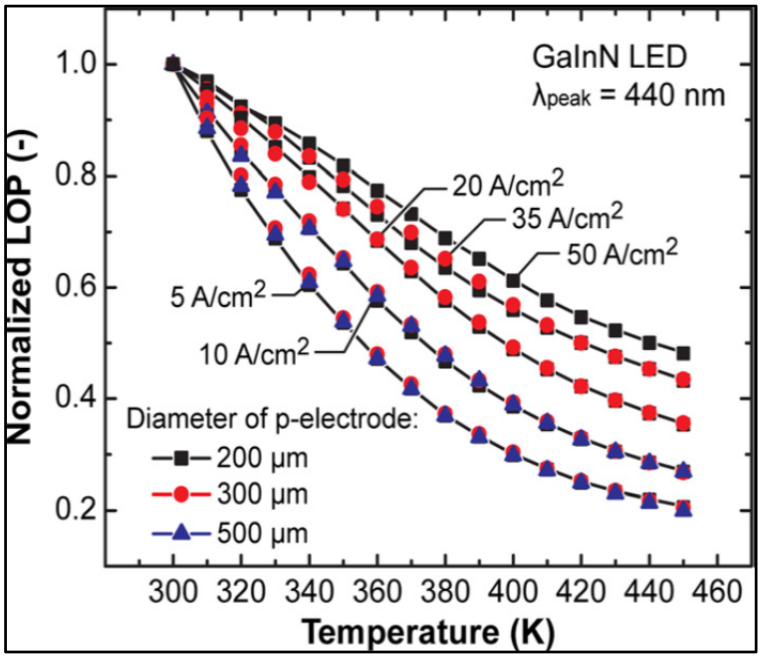


Figure 5.5 Puissances de sortie normalisées en fonction de la température de la jonction mesurée à des densités de courant variant de 5 à 50 A.cm^{-2} pour des puces DELs de différentes dimensions

Tirée de Meyaard et al. (2012)

La température peut également affecter la stabilité d'une DEL. En se référant aux équations 4.3 et 4.4, on remarque que les valeurs de ΔE_{FWHM} et de λ_{max} dépendent de la température de fonctionnement de la DEL. La figure 5.6 montre l'influence de la température sur le profil spectral du rayonnement émis par une DEL. On note un décalage de la distribution spectrale relative d'énergie vers les plus grandes longueurs d'onde qui est estimé à 0.1 à 0.3 nm.^{o}C (Mottier, 2008); ce qui peut être à l'origine d'une sévère dérivation de la couleur de la DEL lorsque la température de la jonction évolue.

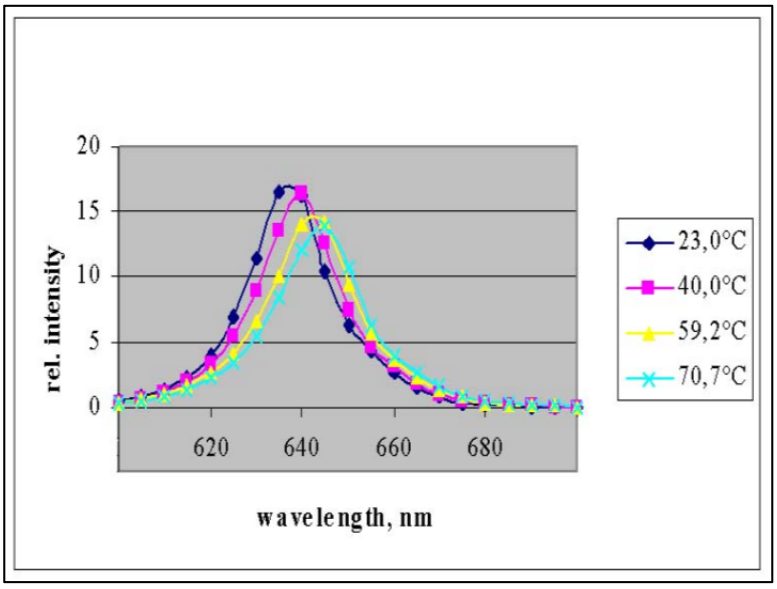


Figure 5.6 Une DEL produit une lumière sensiblement quasi-monochromatique mais son intensité et sa largeur spectrale dépendent fortement de la température de la jonction
Tirée de Schanda (2004)

Un autre paramètre qui peut être affecté par la température au sein des DELs est la durée de vie utile. La figure 5.7 illustre la dépendance de la durée de vie d`un lot de DELs testé en fonction de l`intensité du courant d'alimentation et de la température de jonction. La notation (B50, L70) en bas gauche de la figure signifie qu`après un temps de fonctionnement de 10.000 heures à une température de jonction de 100 $^{o}$C, 50% des DELs du lot testé n`émettent plus que 70% de leur flux lumineux initial (Mottier, 2008). On peut remarquer

également que, sans une gestion adéquate de la température, un fonctionnement prolongé à température élevée peut accélérer la dégradation des composants de la jonction et occasionner irréversiblement une diminution plus rapide de l'intensité émise comparée à celle émise par une DEL fonctionnant à plus basse température.

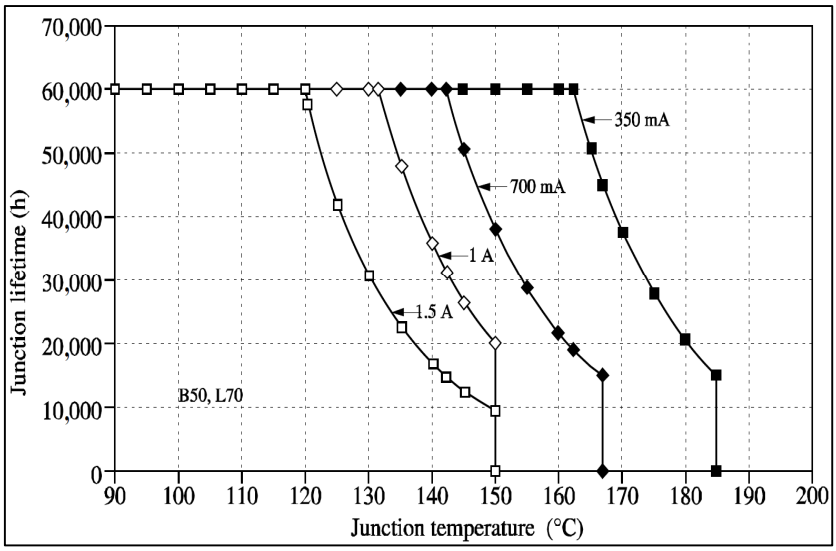


Figure 5.7 Dépendance de la durée de vie d'une DEL en fonction du courant d`alimentation et de la température de la jonction
Tirée de Mottier (2008)

5.4 Dispositif expérimental

Nous avons sélectionné un lot de dix-sept DELs commerciales à semi-conducteur, pour la réalisation expérimentale d`un simulateur solaire $D_{65}$. Les deux autres parties du dispositifs expérimental sont : un bloc support du circuit d'alimentation électrique des DELs et un dispositif d`acquisition des données spectrales et colorimétriques.

5.4.1 Lot de (DELs)

Ces différentes DELs de package T-1 $^{3}/_{4}$ (5 mm) sont choisies pour des raisons de simplicité de la conception du circuit d'alimentation et de coûts. Le tableau 5.2 résume quelques caractéristiques de ces différentes composantes. Ce type de DELs est produit en

masse et peut donc présenter des caractéristiques fluctuantes d'une DEL à une autre pour une couleur donnée.

Tableau 5.2 Les différentes composantes DELs du simulateur solaire D_{65}

N°	**λ_d (nm**	**P (mW) @ 20mA**	**Code**	**θ (°) pour 50% rayon.^{mt}**	**Fabriquant**
1	365	2,4 - 6	XSL-365-5E	15	R. L. GmbH
2	400	8,1-11,5	VL400-5-15	15	R. L. GmbH
3	425	06 - 08	LED425-6-30	15	R. L. GmbH
4	440	05 - 06	VL-440-6-30	15	R. L. GmbH
5	505	n/sp	B5-433-B505	15	R. L. GmbH
6	525	07 - 10	B5-433-B525	15	R. L. GmbH
7	535	n/sp	C503B-GCS-CY0C0791	30	CREE
8	589	n/sp	OVLFY3C7	20	TT Electronics
9	627.5	n/sp	LEDRGBE	30	Thorlabs
10	640	n/sp	L-53SRC-E	30	Kingbright
11	660	n/sp	B5B-436-30	08	R. L. GmbH
12	680	25 mW.sr^{-1}	LED680-02AU	07	R. L. GmbH
13	720	07	ELD-720-524	20	R. L. GmbH
14	760	10	LED760/940-04A	07	R. L. GmbH
15	780	18	LED780-01AU	20	R. L. GmbH
16	820	18	LED820-01AU	10	R. L. GmbH
17	465	n/sp	W54L5111P	15	R. L. GmbH

La liste des fiches techniques des différentes DELs constituant le simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs réalisé, exceptée celle de la DEL425-6-30 disponible que sur demande auprès du fournisseur, sont présentées en annexe VII. Certaines fiches montrent une éventuelle

variation de la longueur d'onde centrale λ_d des DELs d`une couleur de $\Delta\lambda = \pm 5\ nm$ de part et d'autre de λ_d. De plus, les DELs de couleur se caractérisent par des largeurs à mi-hauteur (*"Full Width Half Maximum", FWHM*) assez étroites, de l'ordre de 15 à 25 nm, ce qui imposerait un grand nombre de DELs pour atteindre le match spectral avec la SPD de l'illuminant normalisé D_{65}. La majeure partie des DELs nous est fournie par le fabricant Roithner Lasertechnik GmbH (R. L. GmbH), le recours à d`autres fournisseurs s'explique par le fait que les DELs reçues de ces derniers n`étaient pas disponibles chez R. L. GmbH.

5.4.2 Le circuit d'alimentation des DELs

Sur un support, nous avons réalisé un circuit électrique permettant d'alimenter toutes les composantes DELs par une seule source de tension continue fixée à 5 volts. La figure 5.8 montre le schéma du circuit constituée d`un bloc (a) permettant l'alimentation d'une mono-DEL et d`un autre bloc (b) pour l'alimentation d'une multi-DEL. Le circuit complet permet d'alimenter douze mono-DELs, une double DEL760/940-04A et une triple DEL RGBE soit un total de quatorze DELs. Dans le bloc d`alimentation des mono-DELs, les résistances $R_1 = 10\ k\Omega$ et $R_2 = 50\ k\Omega$ constituent un diviseur de tension fixe servant de référence à l'amplificateur MCP6272 qui assure le contrôle actif du courant qui traverse la mono-DEL via le transistor 2N3904. Ce dernier joue le rôle de valve de courant pour la mono-DEL. Dans chacun des deux blocs, une résistance $R_h = 10\ k\Omega$ variable permet d'ajuster le courant d'alimentation de la mono-DEL ou de la multi-DEL et les résistances $R_3 = 10\ \Omega$ et $R_4 = 100\ \Omega$ jouent le rôle de résistances de protection pour la mono-DEL et multi-DEL respectivement. Les résistances R_1. R_2, R_3 et R_4 sont déterminées de sorte que le circuit garantisse la protection des DELs contre les hausses brusques de courant lors des ajustements d'intensité pour optimiser les paramètres du simulateur D_{65}.

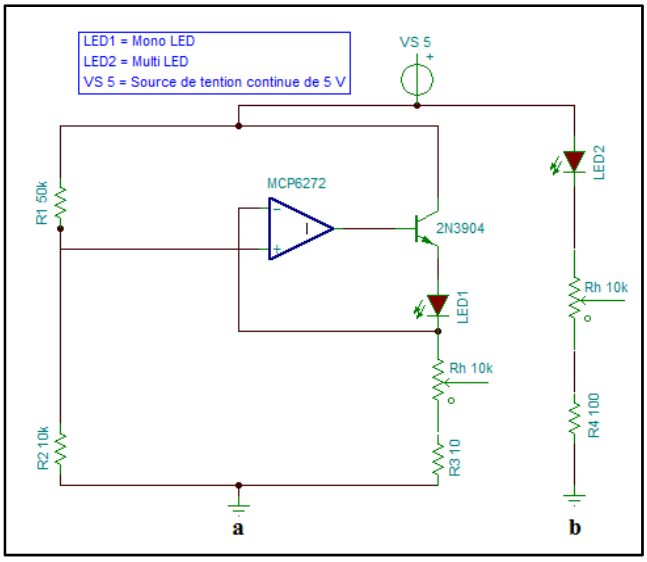


Figure 5.8 Circuit d'alimentation en courant
a. pour les mono-DELs, **b.** pour les multi-DELs

5.4.3 Le système d'acquisition des données : le logiciel SpectraSuite™

Le système d'acquisition de données est constitué d'une sphère intégratrice reliée à un spectromètre Jaz d'Ocean Optics Inc., d'une couverture spectrale allant de 350 à 1000 nm connecté par un câble à fibre optique QP400-1-UV-VIS de 400 µm de diamètre et de bande spectrale 300-1100 nm. Le spectromètre Jaz est connecté via un câble en cuivre d'environ 100 cm de long au port USB d'un ordinateur sur lequel est installé le logiciel SpectraSuite™. SpectraSuite™ est la dernière génération des logiciels exploités par Océan Optics. Un bouchon en plastique percé de 14 trous, conçu par Nelson Landry, a servi de support des DELs à l'entrée de la sphère intégratrice. Comme le montre la figure 5.9, ce support est conçu de façon à ce que les axes de faisceaux des différentes DELs constituant notre simulateur solaire convergent au centre du fond de la sphère intégratrice. Une source de lumière tungstène-halogène LS-1-CAL alimentée sous une tension de 110 V est utilisée pour la calibration du spectromètre. La figure 5.10 présente le montage expérimental de cette calibration.

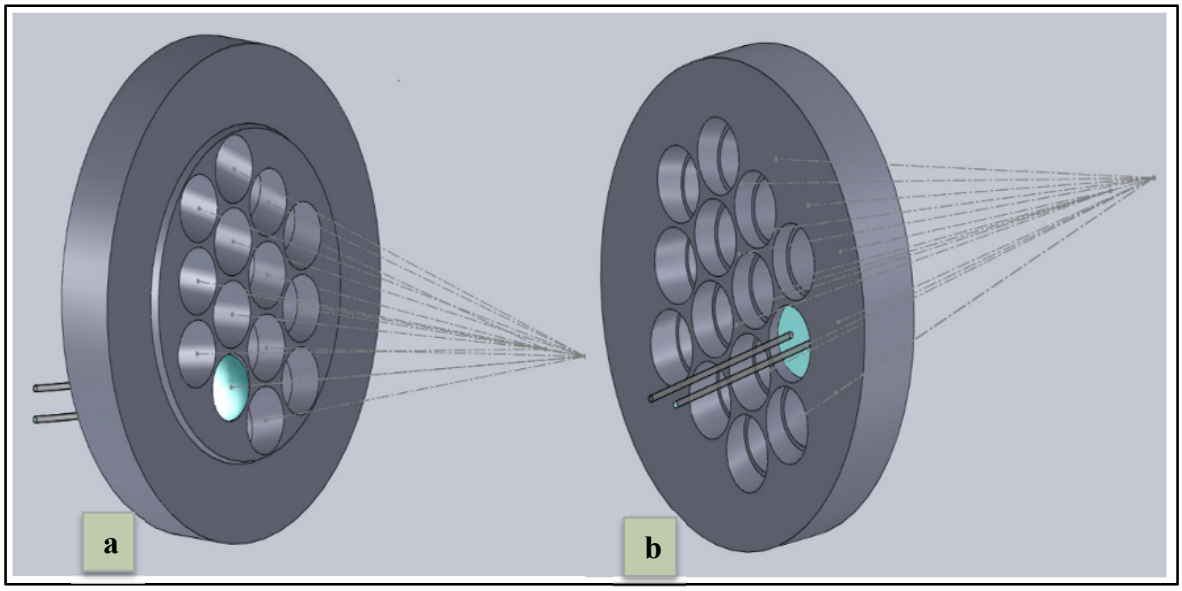


Figure 5.9 Bouchon support des DELs à l'entrée de la sphère intégratrice :
a. vue de face et **b.** vue de de profil

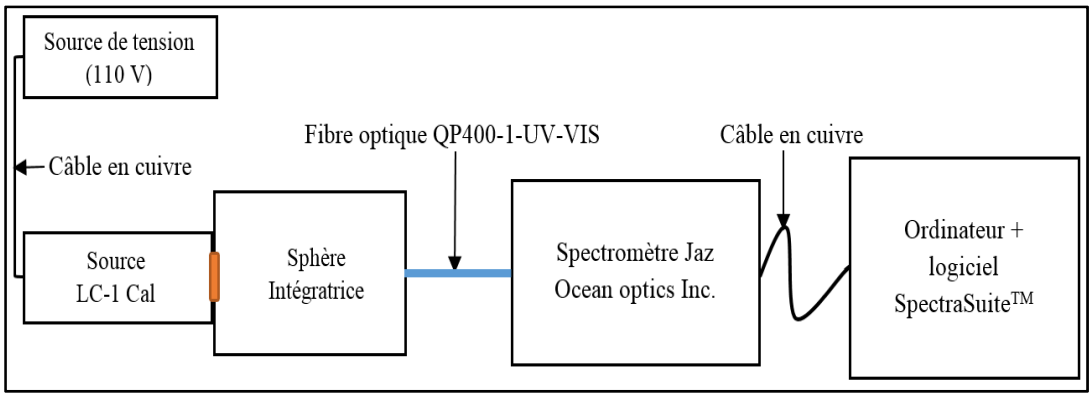


Figure 5.10 Montage expérimental de calibration du spectromètre Jaz

Le tableau 5.3 donne les caractéristiques de la source LS-1-CAL obtenues à partir de SpectraSuite™ en utilisant le spectromètre Jaz.

Tableau 5.3 Caractéristiques de la source LS-1-CAL

Source LS-1-CAL			
x	y	TCP °K	CRI
0,4518	0,4062	2780	98,3

Le spectromètre Jaz, le câble à fibre optique QP400-1-UV-VIS, la source de calibration LS-1-CAL et le logiciel SpectraSuite^{TM} sont tous conçus par Ocean Optics. La sphère intégratrice est produite par un autre fabricant.

SpectraSuite est un outil simple et puissant qui offre une interface permettant de fixer tous les paramètres d'acquisition des données colorimétriques et spectro-radiométriques. Les caractéristiques colorimétriques, photométriques ainsi que l'irradiance spectrale relative des sources ou des objets étudiés sont directement lues en temps réel à partir de SpectraSuite^{TM}. Un autre avantage de SpectraSuite est qu'il offre la possibilité de contrôler tous les paramètres du système et d'effectuer le suivi des références et des temps d'acquisition des différentes expériences.

5.5 Vérification de la validité de SpectraSuite^{TM}

Pour vérifier la validité des résultats obtenus via SpectraSuite dans le cadre de notre travail, nous nous sommes basés sur les deux considérations ci-dessous.

5.5.1 Certification de SpectraSuite^{TM}

La calibration de spectromètres d'Ocean Optics inc.avec SpectraSuite^{TM} comme interface graphique est effectuée au sein de nombreux laboratoires: les laboratoires Dunedin et Winter Park en Floride, le laboratoire Ostfidern en Allemagne et le laboratoire Shanghai, PRC en Chine. Ocean Optics Inc. a obtenu la certification de la calibration de ses spectromètres, associés à SpectraSuite, par la source LS-1-CAL-INT au près du laboratoire Winter Park (Floride). Le numéro du certificat est le *12525 en date du 14 mai 2012*; (voir l'annexe VI) ce qui pourrait servir comme preuve de validité de SpectraSuite.

5.5.2 Caractérisation d'un pointeur laser vert de longueur connue

Nous avons utilisé un pointeur laser vert émettant un faisceau monochromatique de longueur d`onde $\lambda_d = 532\ nm$. En caractérisant ce pointeur par Spectrasuite, on a pu remarqué qu'il

est représenté par le point de coordonnées de chromaticité x = 0.225 et y = 0.780 dans l'espace CIE (x, y) 1931. Ces coordonnées de chromaticité représentent une radiation monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 532\ nm$ qui est bien celle de notre pointeur.

Ces deux considérations nous permettent de considérer SpectraSuite^{TM} comme un outil fiable dans le cadre de notre projet.

5.6 Méthodologie

5.6.1 Approche expérimentale

Un simulateur solaire D_{65} destiné aux applications photovoltaïques est principalement caractérisé par le degré de conformité de son irradiance spectrale aux spectres de référence établis dans les standards ASTM, IEC ou JIS et par sa température de couleur. Une bonne approximation de ces paramètres par l'association de DELs nécessite la connaissance:

- du profil spectral de chacune de ces dernières en fonction de leur courant d'alimentation (voir annexe VII);
- du comportement des caractéristiques colorimétriques et spectrales des sources hybrides en fonction du nombre de DELs et de leurs intensités lumineuses.

Ces deux points essentiels permettent d'évaluer le poids de chacune des composantes DELs dans la composition du simulateur solaire D_{65} à réaliser.

5.6.2 Poids de chacune des composantes DELs

Le poids d'une DEL dans la composition du simulateur solaire D_{65} est d'autant plus important que la variation de son intensité lumineuse affecte de façon notable une ou plusieurs des principales caractéristiques du simulateur telles que la TCP, les valeurs de tristimuli X, Y Z (ou les coordonnées de chromaticité x, y) et la SPD. Le poids pour chaque DEL est évalué en effectuant plusieurs expériences test pour réaliser des sources blanches comportant trois, et diverses combinaisons de six, huit, dix et même douze DELs sans trop se

soucier de leur rapprochement avec l'illuminant normalisé D_{65}. Lors des ajustements des intensités lumineuses des DELs, on a pu noter la dépendance de chacun des paramètres colorimétriques de la source réalisée à l`intensité lumineuse de chaque DEL; l'intensité lumineuse d'une DEL pouvant éventuellement être nulle. Nous avons remarqué que seules les DELs de longueurs d'onde dominantes appartenant au domaine spectral 380 - 680 nm ont une influence majeure sur au moins une des caractéristiques TCP, valeurs de tristimuli X, Y Z (ou coordonnées de chromaticité x, y) des sources réalisées. Le tableau 5.4 regroupe les douze DELs identifiées avoir potentiellement une influence majeure sur les caractéristiques colorimétriques et spectrales du simulateur solaire D_{65} à réaliser.

Tableau 5.4 DELs composant le simulateur solaire D_{65} dont la variation de l'intensité lumineuse influe considérablement sur les caractéristiques colorimétriques

N^o	couleur	λ_d (nm)	N^o	couleur	λ_d (nm)	N^o	couleur	λ_d (nm)
1	Mauve	400	**5**	Verte-Bleu	505	**9**	Rouge-1	627.5
2	Violette	425	**6**	Verte-1	525	**10**	Rouge-2	640
3	Bleue	440	**7**	Verte-2	535	**11**	Rouge-3	660
4	Blanche	460	**8**	Jaune	589	**12**	Rouge-4	680

Les constats faits sur chaque DELs à l'issues de nos différentes expériences sont les suivants:

1. **DEL VL400-5-15** ($\boldsymbol{\lambda_d = 400\ nm}$): La variation son intensité lumineuse est proportionnelle à la valeur du stimulus Z. Les autres paramètres de la source ne sont pratiquement pas affectés.

2. **DEL 425-6-30** ($\boldsymbol{\lambda_d = 425\ nm}$): Une faible variation de son intensité lumineuse permet d'ajuster sensiblement les valeurs de x, y, z et de la TCP et plus finement la valeur de Z.

3. **DEL VL-440-6-30** ($\boldsymbol{\lambda_d = 440\ nm}$): Une variation de son intensité a également une forte influence sur les valeurs de x, y et z ainsi que sur la TCP. Sa SPD qui se superpose avec le pic celle de la DEL blanche fait en sorte que son utilisation n'est pas optimale.

4. **DEL W54L5111P** ($\boldsymbol{\lambda_d = 460\ nm}$): elle représente la composante essentielle de la source test. Elle contrôle fortement l'énergie en agissant simultanément et de façon globalement non proportionnée sur les valeurs de tristimuli X, Y et Z, de la TCP, du CRI, et des coordonnées de chromaticité x, y, et z. Une légère variation de son intensité entraîne une nette modification de la densité spectrale de l'irradiance de la source entre 410 nm et 700 nm. Son intensité lumineuse est proportionnelle aux valeurs de tristimuli X, Y et Z et de la TCP et inversement proportionnelle aux valeurs des coordonnées de chromaticités x et y. Sa longueur d'onde dominante à 465 nm lui permet de jouer en même temps le rôle d'une DEL bleue ce qui nous a permis d'épargner l'utilisation d'une DEL supplémentaire même si cet option peut rendre plus complexe l'optimisation des caractéristiques du simulateur solaire D_{65}.

5. **DEL B5-433-B505** ($\boldsymbol{\lambda_d = 505\ nm}$): la variation de son intensité entraine une forte variation des valeurs de la TCP, du CRI, du stimulus Y et des coordonnées de chromaticités x et y. Elle représente le principal moyen pour faire des ajustements très précis sur la valeur du stimulus X et a simultanément une légère influence sur les autres paramètres colorimétriques de la source. Son intensité est proportionnelle aux valeurs de tristimuli X, Y, Z, à la valeur de la coordonnée y et à la valeur TCP et inversement proportionnelle à la valeur de la coordonnée x.

6. **DEL B5-433-B525** ($\boldsymbol{\lambda_d = 525\ nm}$): la variation de son intensité lumineuse modifie sensiblement les valeurs de y et du CRI et influe légèrement sur la TCP et permet d'ajuster finement la valeur du stimulus Y.

7. **DEL C503B-GCS-CY0C0791** ($\boldsymbol{\lambda_d = 535\ nm}$): La variation de son intensité lumineuse présente les mêmes effets que ceux notés avec la variation de l'intensité lumineuse de la DEL B5-433-B525.

8. **DEL OVLFY3C7** ($\boldsymbol{\lambda_d = 589\ nm}$): elle influe fortement sur les valeurs des stimuli X et Y, du CRI et de la TCP. La variation de son intensité a une incidence globale sur les caractéristiques de la source.

9. **DEL RGB** ($\boldsymbol{\lambda_d = 627.5\ nm}$): elle dicte principalement les valeurs de la TCP et du CRI.

10. **DEL L-53SRC-E** ($\boldsymbol{\lambda_d = 640\ nm}$)**:** elle agit pratiquement sur les mêmes paramètres que la composante rouge de la *LED RGB* ($\lambda_d = 627.5$ nm).

11. **DEL B5B-436-30** ($\boldsymbol{\lambda_d = 660\ nm}$): Elle permet de contrôler efficacement la composante x et la CRI, influe légèrement sur la valeur du TCP sans occasionner des changements majeurs sur les valeurs des autres caractéristiques du simulateur solaire D_{65}.

12. **DEL680-4-30** ($\boldsymbol{\lambda_d = 680\ nm}$): son intensité influe légèrement sur la composante x.

Les intensités lumineuses des DELs complémentaires, considérées comme de poids faibles, ne contribuent essentiellement qu'à la réalisation du match spectral. Les références de ces dernières DELs sont regroupées au tableau 5.5.

Tableau 5.5 DELs dont la variation de l'intensité lumineuse influe faiblement sur les caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65}

N°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Couleur	UV	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
λ_d (nm)	365	720	760	780	820

Les caractéristiques de certaines de ces DEls sont données en détails à l'annexe VII. A partir de ces dix-sept DELs, nous essayerons de réaliser un simulateur solaire D_{65} qui devra respecter toutes les spécifications standards requises entre 350 nm et 850 nm pour la simulation et la caractérisation de cellules ou systèmes solaires photovoltaïques.

CHAPITRE 6

RÉALISATION D'UN SIMULATEUR SOLAIRE D_{65} A BASE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES

6.1 Méthodes de réalisation de sources blanches avec des DELs

Les DELs de couleur ne peuvent générer que des faisceaux quasi-monochromatiques dans le visible sur de très faibles largeurs spectacles ou des faisceaux dans l'UV qui ne peuvent pas être traités par le système visuel humain. Ces faisceaux doivent être convertis pour obtenir de la lumière blanche. Il existe trois méthodes principales pour réaliser une source émettant de la lumière blanche avec des DELs de couleur: la combinaison de luminaires de différentes couleurs pour générer de la lumière blanche, la conversion de longueur d'onde par utilisation d'un phosphore et l'utilisation de puces DELs émettant directement les différentes composantes spectrales de la lumière blanche (Liu and Luo, 2011).

6.1.1 Génération de lumière blanche par conversion du phosphore

Cette méthode de génération de lumière blanche utilise généralement la combinaison d'une DEL bleue avec un phosphore jaune ou la combinaison d'une DEL UV (ou violette) avec un phosphore RGB. En recouvrant une DEL bleue de phosphore jaune, une partie de la lumière bleue émise par la puce est convertie en lumière jaune et l'autre partie est directement transmise. Le mélange de la lumière bleue et de la lumière jaune donne une lumière blanche. La figure 6.1 illustre un principe d'obtention de la lumière blanche en utilisant cette technique.

En ajustant les proportions du mélange et la concentration du phosphore on peut obtenir de la lumière blanche à différentes TCP. Des fabricants tels que Nashia, CREE, Lumileds, etc. produisent en série des DELs blanches de forte puissance (5 à 7 W) avec une température de couleur de l'ordre 5500 K en utilisant une DEL bleue (InGaN) combinée avec du phosphore jaune (YAG-Ce). Dans le cas d'une DEL UV avec un phosphore RGB, la lumière UV émise

par la puce est convertie en lumières rouge, verte et bleue par le phosphore RGB. Ces dernières couleures sont mélangées pour générer de la lumière blanche.

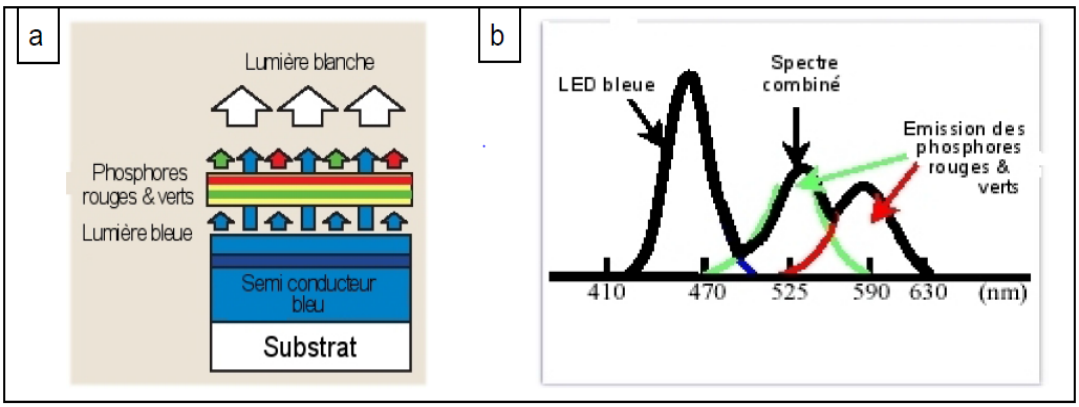


Figure 6.1 Génération de lumière blanche par conversion du phosphore
(Tiré de L. MASSOL)

6.1.2 Génération de lumière blanche par une DEL à puce de lumière blanche: méthode dite de Schubert ou de recyclage de photons

Une puce DEL de lumière blanche permet à une DEL d'avoir la possibilité d'émettre directement de la lumière blanche. Ce qui impose que cette dernière puisse générer au moins deux lumières différentes qui seront combinées pour donner de la lumière blanche. Cette technique est appelée méthode de Schubert ou de recyclage de photons. La figure 6.2 illustre le principe de génération de lumière blanche selon cette technologie.

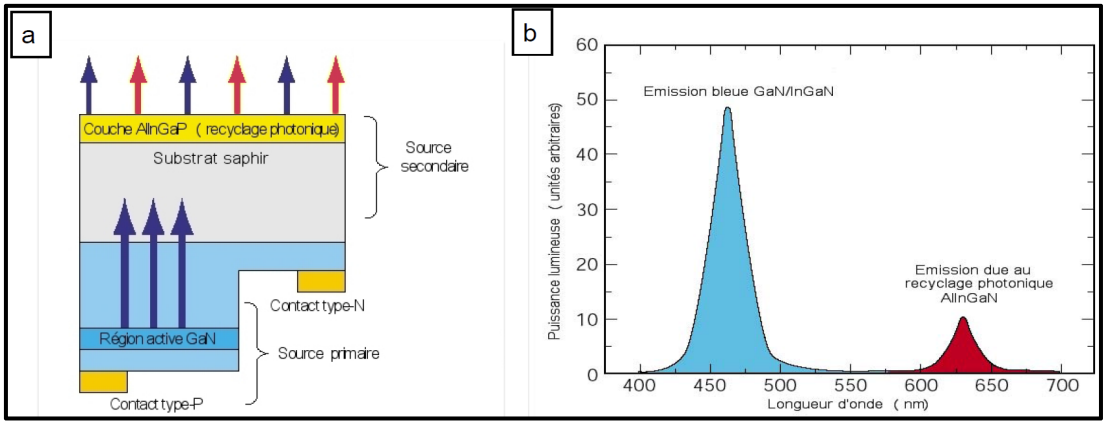


Figure 6.2 Génération de lumière blanche par une DEL à puce de lumière blanche
(Tiré de L. MASSOL)

Par cette méthode, Chien-Hao Huang et al. (Huang and Chen, 2011) ont réalisé une puce DEL émettant de lumière bleue et de la lumière jaune qu'ils ont combinée pour obtenir une lumière blanche.

6.1.3 Génération de lumière blanche par combinaison de différentes couleurs

Nous avons montré dans les sections précédentes qu'il est possible de générer de la lumière blanche à partir de trois primaires monochromatiques, le rouge, le vert et le bleu. R. Muller-Mach et d'autres chercheurs ont étudié deux types de DELs trichromatiques générant de la lumière blanche: 460-530-639 (nm) avec un bon rendement lumineux mais un faible CRI et 450-550-610 (nm) avec un CRI élevé mais très sensible à la température et non stable. La figure 6.3 donne un exemple du principe d'une lumière blanche en associant trois DELs rouge, verte et bleue

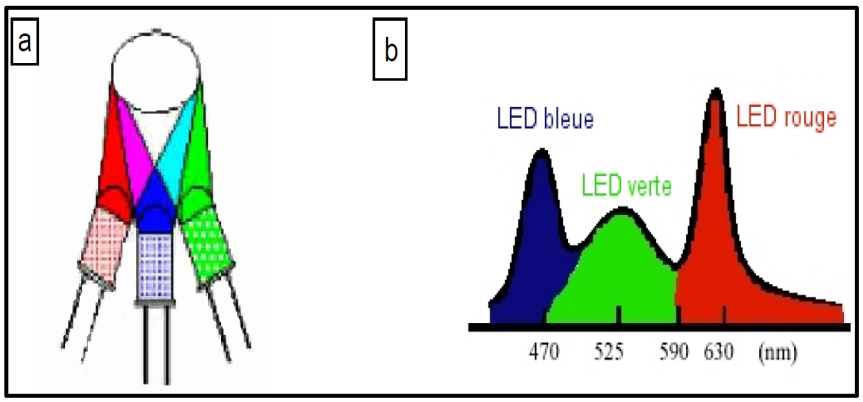


Figure 6.3 Génération de lumière blanche par une combinaison de DELs de couleurs différentes
(Tiré de L. MASSOL)

Le point représentant la source résultante d'un mélange de plusieurs sources monochromatiques se situe à l'intérieur du polygone formé par les points représentant ses différentes composantes dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931, En ajustant les

intensités, on peut produire de la lumière blanche dont la TCP dépend de la proportion de chacune des composantes. Cette méthode est d'une grande simplicité pour la génération de la lumière blanche mais le TCP, l'efficacité lumineuse et la stabilité chromatique doivent être surveillés. Cette dernière méthode est celle qui a été utilisée dans ce travail pour la réalisation du simulateur solaire D_{65}.

6.2 Réalisation du simulateur solaire D_{65}

Il est possible d'obtenir la chromaticité de la lumière aux différentes phases de la lumière du jour et d'optimiser le rendu de couleur final en assemblant un grand nombre de DELs de couleurs différentes. C'est le cas de l'assemblage rouge, ambre, vert, bleu ou de l'assemblage rouge, vert, bleu blanc froid qui améliore le rendu des couleurs par rapport au mélange rouge vert bleu. Aussi, en associant une diode blanche à InGaN, sept DELs de couleurs et du phosphore jaune il est possible de simuler précisément la répartition spectrale de la lumière du jour, ce qui permet d'éviter les effets nuisibles du métamérisme (Mottier, 2008). Sur la base de ces acquis, nous avons choisi de réaliser un simulateur solaire D_{65} à partir d'un assemblage de DELs de couleurs et d'une DEL blanche en l'absence de phosphore supplémentaire.

6.2.1 Simulateur solaire D_{65} à huit DELs

Les huit composantes DEL s sont choisies de sorte que la distribution de l'irradiance de la source obtenue couvre au mieux le domaine spectral de l'illuminant D_{65}; c'est-à-dire de 300 nm à 830 nm. Nous avons également veillé à ce que le profil spectral de cette irradiance présente le minimum de discontinuité sur le domaine spectral considéré. Le verre et le plastique ne transmettant pas au-dessous de 360 nm, nous nous sommes contenté de considérer le domaine spectral 350 - 850 nm avec comme limites aux extrémités une DEL UV de $\lambda_d^1 = 365\,nm$ et une DEL rouge de $\lambda_d^2 = 820\,nm$. Noter également qu'on n'a pas tenu compte des aspects DEL blanche-froide ou DEL blanche-chaude pour le choix de notre DEL blanche. Le tableau 6.1 montre les références des huit composantes DEL s du dispositif expérimental.

Tableau 6.1 Référence des huit DELs composant le simulateur solaire D_{65}

N°	**Couleur**	$\boldsymbol{\lambda_d}$ $\boldsymbol{(nm)}$	**P (mW) @ 20 mA**	**Code**	**Fabriquant**
1	UV	365	2,4 - 6	XSL-365-5E	R. L. GmbH
2	Verte	535	n/sp	C503B-GCS-CY0C0791	CREE
3	Jaune	589	n/sp	OVLFY3C7	TT Electronics
4	Rouge-1	680	25 mW/sr	LED680-02AU	R. L. GmbH
5	Rouge-2	720	07	ELD720-524	R. L. GmbH
6	Rouge-3	760	10	LED760/940-04A	R. L. GmbH
7	Rouge-4	820	18	LED820-01AU	R. L. GmbH
8	Blanche	460	n/sp	W54L5111P	R. L. GmbH

Les paramètres d'acquisition de données choisis sont un temps **d'intégration de 3 ms**, un **Scan Average de 10** et un **Boxcar width de 2** afin d'éviter la saturation du spectromètre et d'optimiser les performances du système. Les figures 6.4 et 6.5 montrent respectivement une photo et un schéma simplifié du montage expérimental du processus de calibration du simulateur solaire D_{65} indépendamment du nombre de DELs utilisés.

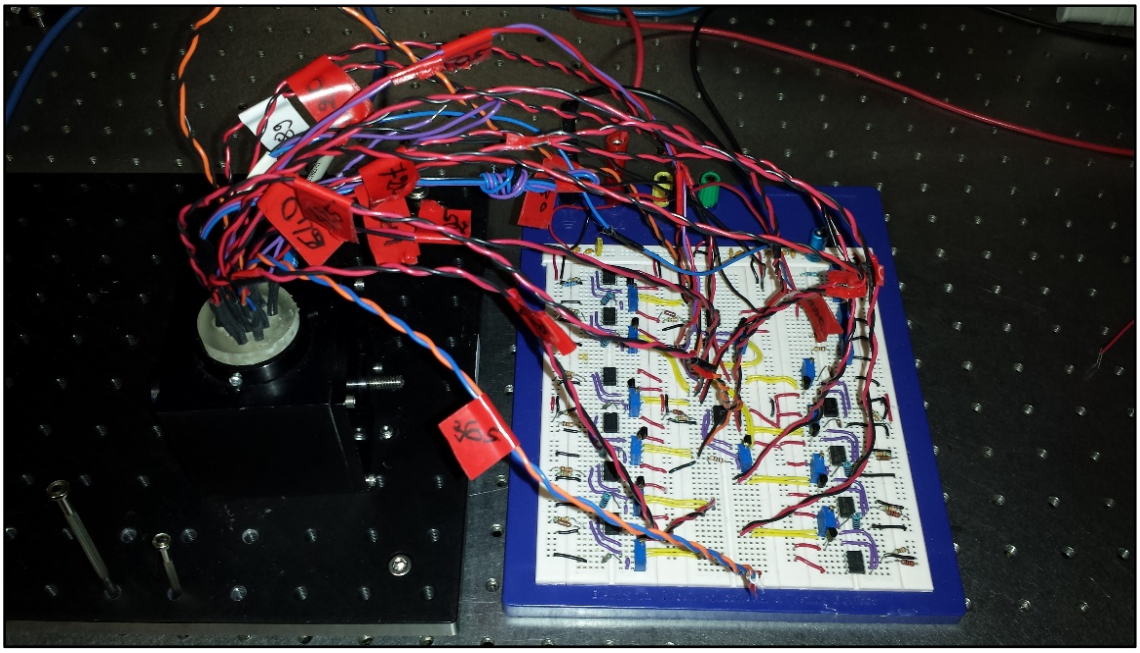


Figure 6.4 Montage expérimental du processus de calibration du simulateur solaire D_{65}

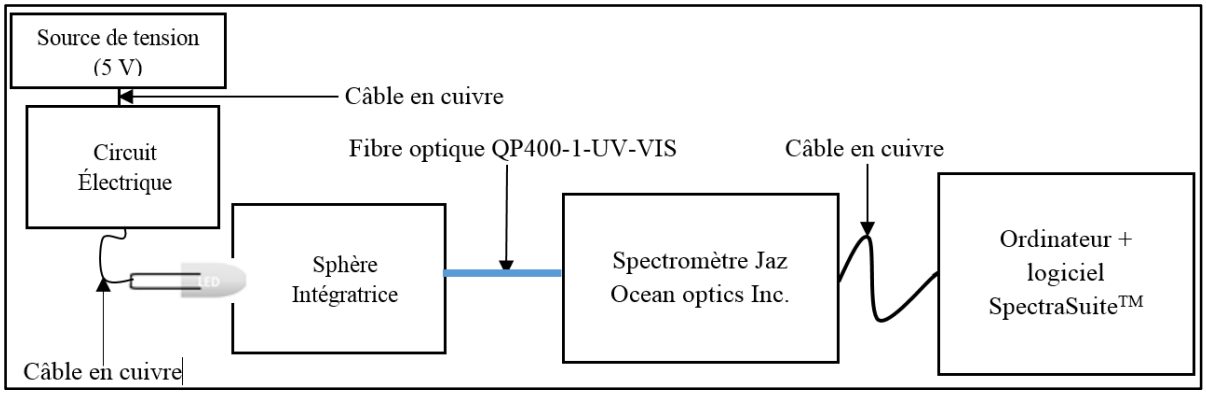


Figure 6.5 Schéma simplifié du montage expérimental utilisé pour la calibration du simulateur solaire D_{65}

Les huit DELs sont fixées à l'entrée d'une sphère intégratrice via le bouchon support. La sphère intégratrice est connectée à un spectromètre Jaz par le câble à fibre optique QP400-1-UV-VIS et le spectromètre Jaz est connecté à un PC via un câble USB en cuivre. Une fois le montage réalisé, le premier défi est d`ajuster les intensités lumineuses des différentes DELs pour obtenir une source blanche ayant une TCP de 6504 K et des coordonnées de chromaticité x et y égales à celles de l'illuminant D_{65} dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931. Par la suite, on procède à l'optimisation du profil spectral de l'irradiance du simulateur, qui doit être le plus semblable que possible à celui de l'illuminant normalisé D_{65}

de la CIE, sans trop modifier les valeurs optimales de la TCP, de x et de y obtenues. La figure 6.6 donne une comparaison du profil spectral de la SPD du simulateur solaire D_{65} à huit DELs réalisé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE. On peut remarquer des disparités entre les deux courbes caractérisées par la présence de pics et de vallées très prononcés au niveau de la courbe représentant la SPD du simulateur solaire D_{65} à huit DELs. Cette limitation est principalement due à l'absence du phosphore supplémentaire pour convertir certaines longueurs d'onde courtes en longueurs d'onde plus longues et à l'étroitesse des spectres d'émission des DELs de couleur.

Du point de vue *"match spectral"*, la comparaison de la distribution spectrale de l'énergie du simulateur aux standards pour le mode AM 1.5 G est illustrée par la figure 6.7. Ce résultat montre que le simulateur solaire D_{65} à huit DELs réalisé est de **Classe B** par rapport à ce critère de performance.

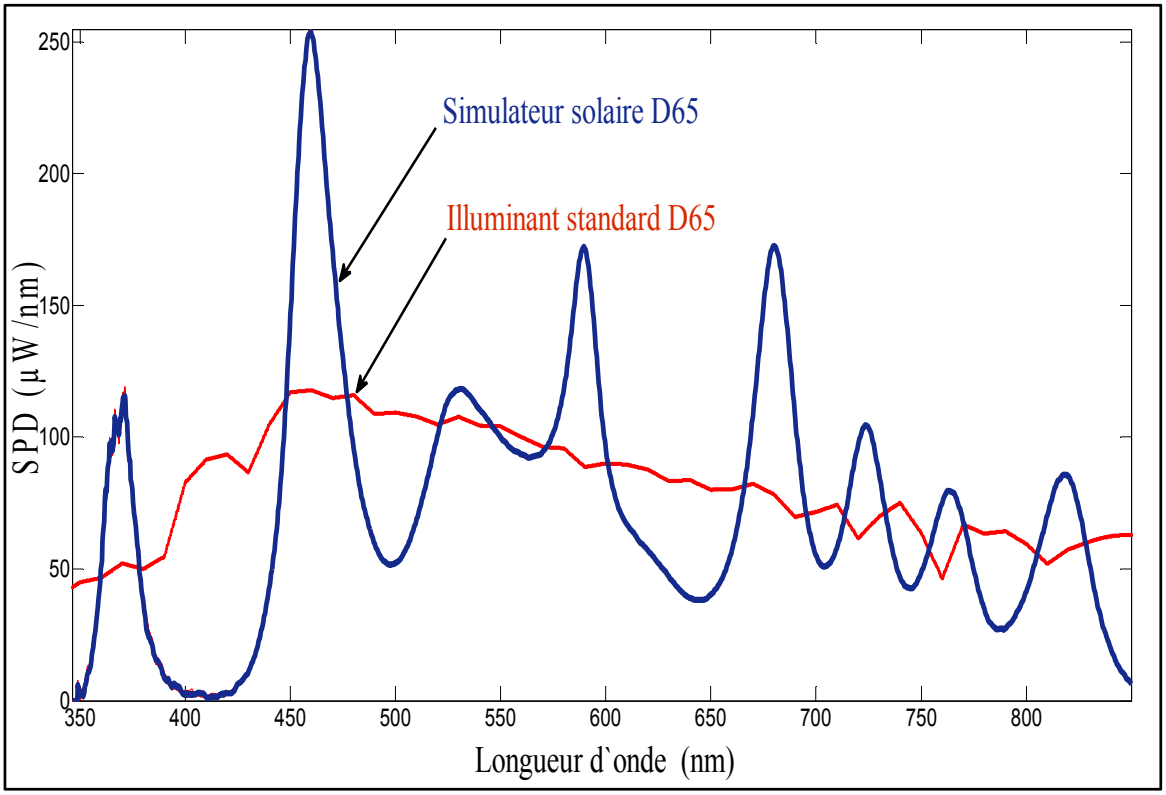


Figure 6.6 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à huit DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

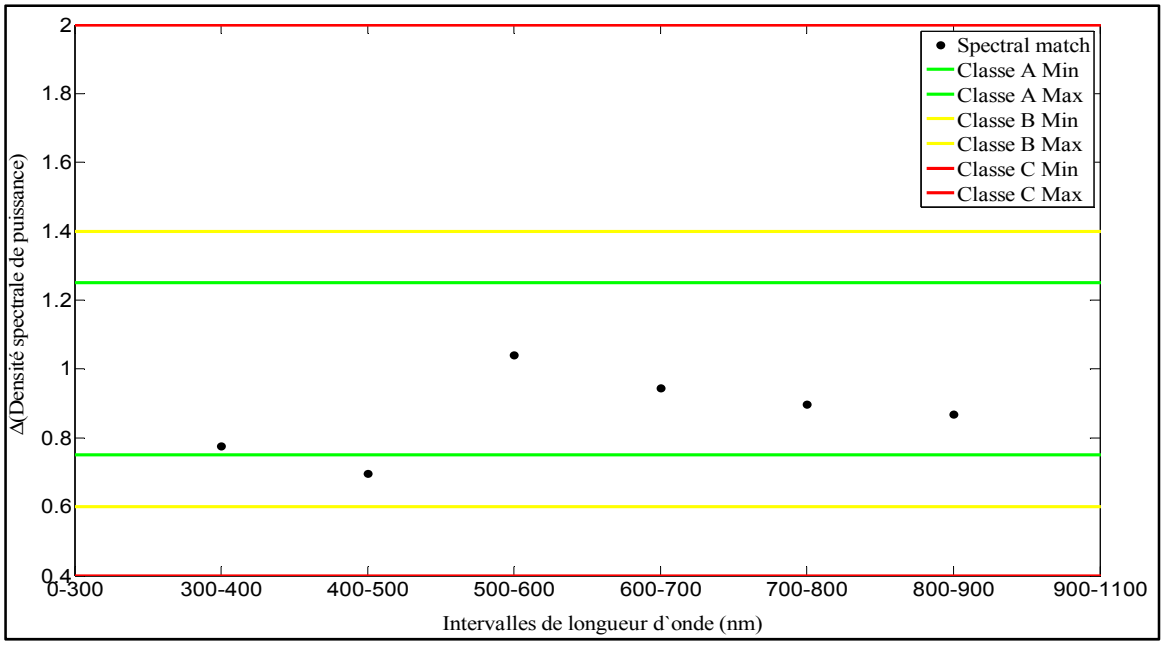


Figure 6.7 "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à huit DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM

Le tableau 6.2 donne un résumé des caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire à huit DELs fournies par SpectraSuite. La colonne des facteurs represente le rapport des valeurs d'un paramètre colorimétrique de l'illuminant normalisé D_{65} et du simulateur solaire D_{65}. On note une bonne optimisation des valeurs de stimuli X, Y et Z, des coordonnées de chromaticité x, y et z et de la TCP. Ce résultat est prévisible dans la mesure où ces paramètres peuvent etre optimisés avec une source blanche réalisée à partir des trois primaires.

Tableau 6.2 Comparaison des caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} à huit DELs à celles de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

Paramètres clorimétriques	Simulateur Solaire D_{65}	Illuminant Normalisé D_{65}	Facteurs
X	95.06	95.04	1.000
Y	99.99	100	1.000
Z	108.86	108.9	1.000
x	0.3126	0.3128	1.00
y	0.3296	0.3290	1.00
z	0.3578	0.3582	1.00
CRI	79.3	100	--
TCP (^{o}K)	6507	6504	--

Puisque l'assemblage de DELs utilisé comporte une DEL blanche, le CRI ne traduira pas fidèlement le rendu de couleur du spectre lumineux résultant (Dick Erdmann 2013). De plus, le CRI n'est pas un critère de performance pour un simulateur solaire destiné à des applications photovoltaïques, cependant, plus le CRI d'une source blanche est élevée, mieux celle-ci représente une approximation de la lumière blanche émise par les lampes incandescentes à halogène ou la lumière naturelle du jour. Des LEDs blanches ayant des CRI de 98 sont commercialisées par BEIJING YUJI INTERNATIONAL (Yuji, 2014).

6.2.2 Simulateur solaire D_{65} à dix LEDs

Pour améliorer le *" spectral match "* du simulateur solaire, nous avons proposé d'ajouter deux DELs; une DEL violet VL400-5-15 ($\lambda_{pic} = 400\,nm$) et la DEL rouge L-53SRC-E ($\lambda_{pic} = 640\,nm$), ce qui porte le nombre de DELs qui constitue le simulateur solaire D_{65} à dix. Ces deux DELs nous permettraient de réduire les grandes vallées situées à au voisinage de leurs longueurs d'onde pics. Dans les mêmes conditions d'expérimentation, le profil spectral de la SPD obtenu comparé à celui de la SPD de l'illuminant D_{65} est présenté à la figure 6.8. On peut noter une réduction considérable l'intensité des pics et des vallées au niveau du profil spectral de la SPD du simulateur; ce qui équivaut à une nette amélioration de son profil spectral sur le domaine spectral considéré.

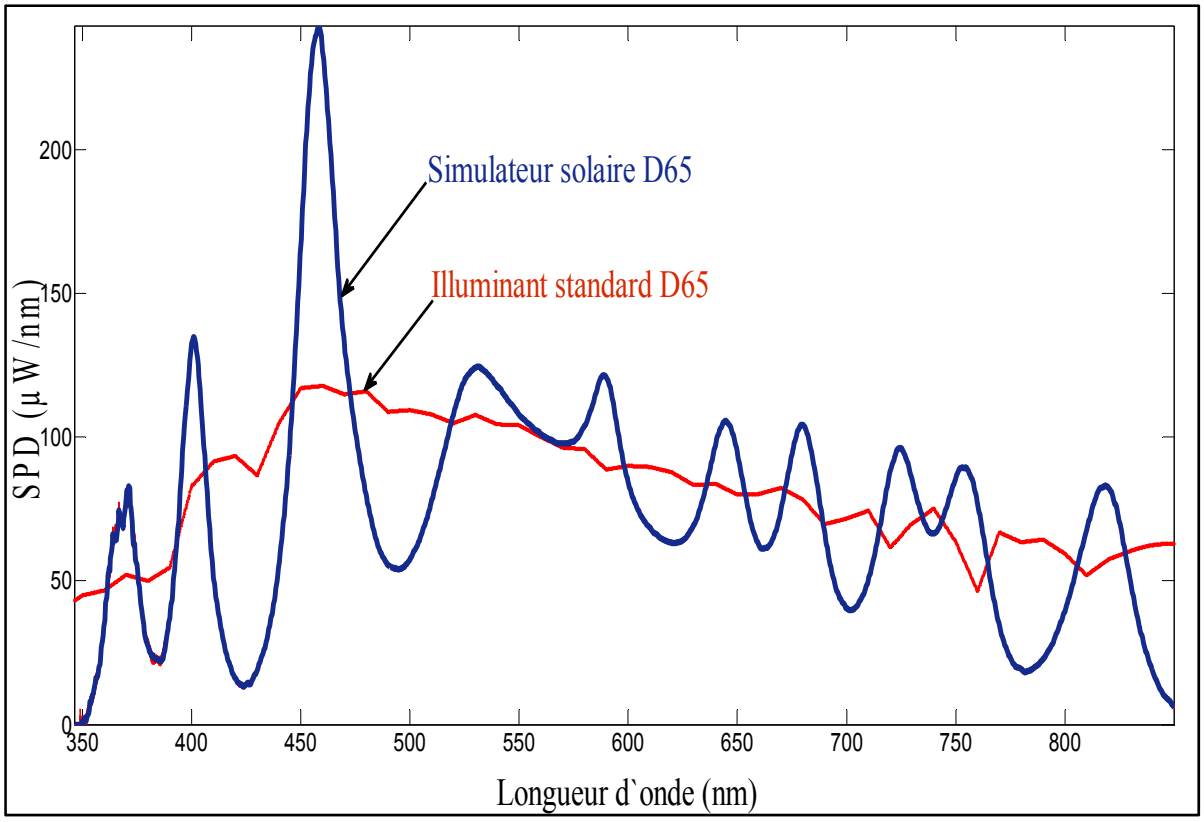


Figure 6.8 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à dix DELs comparé à celui de la DEL de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

Du point de vue *"spectral match "*, la figure 6.9 montre une amélioration qui se traduit par le passage du simulateur solaire D_{65} de la **Classe B** à la **Classe A** de ce critère de performance en mode AM 1.5 G, soit une excellente densité spectrale de l'irradiance approximant la lumière moyenne du jour. Étant donné que l'optimisation des paramètres colorimétriques du simulateur solaire D_{65} est déjà établie avec les huit DELs, nous ne jugerons pas utile de dresser de nouveau un tableau illustrant une comparaison de ces paramètres à ceux de l'illuminant normalisé D_{65} pour le cas du simulateur solaire D_{65} à dix DELs.

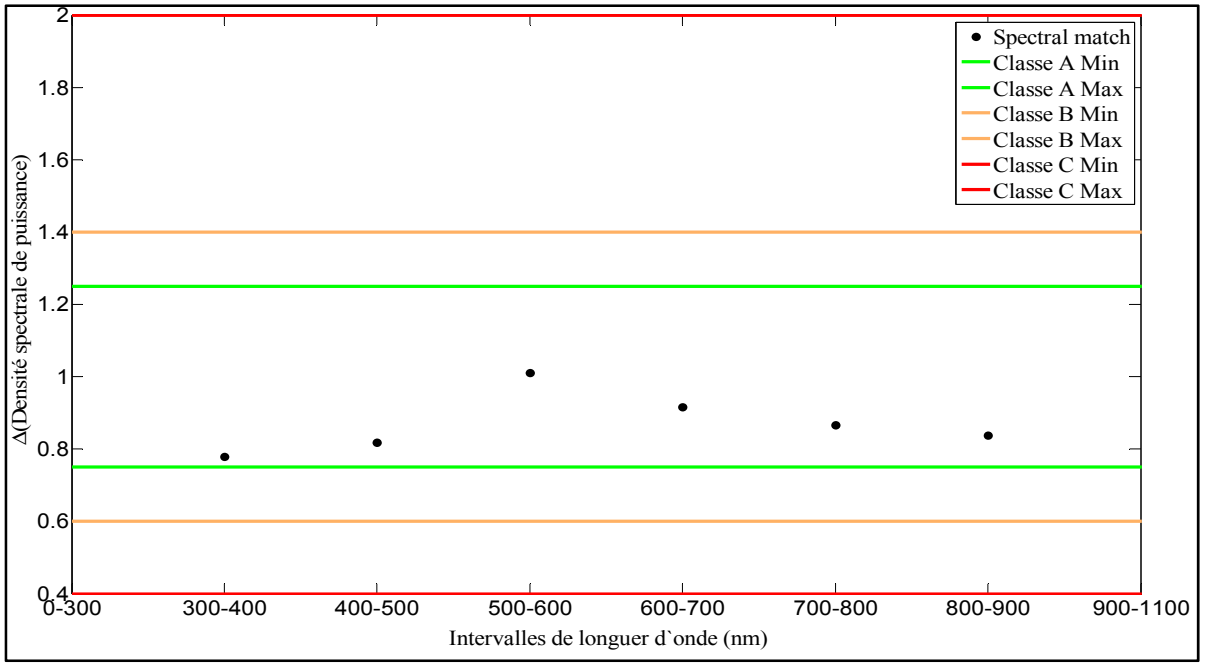


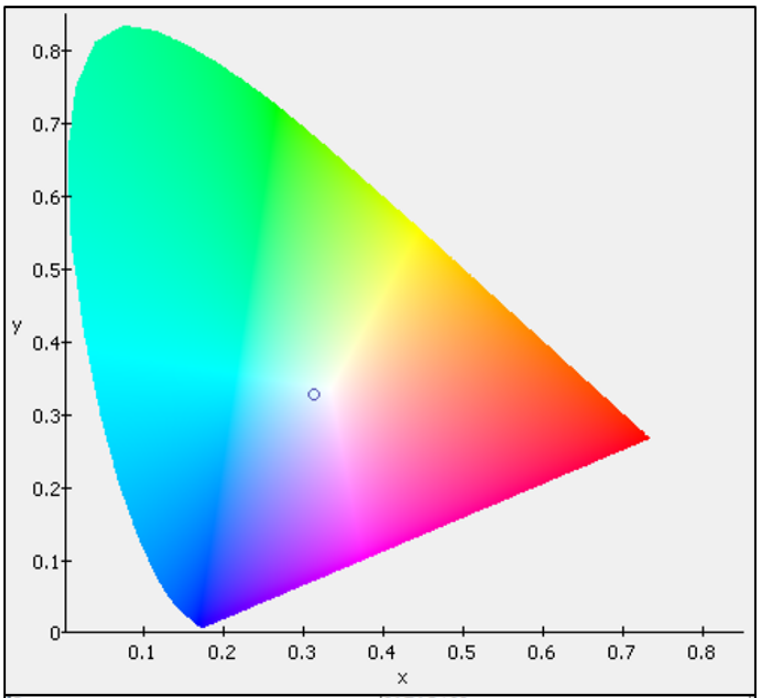
Figure 6.9 "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à dix DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM

Quant au CRI, on note une augmentation de l'ordre de dix unités soit 89,4. Pour une meilleure optimisation du profil spectral et éventuellement porter le CRI à une valeur plus élevée, on a procédé à l'ajout de deux DELs supplémentaires.

6.2.3 imulateur solaire D_{65} douze DELs

Les deux DELs ajoutées sont la LED bleue DEL425-0-30 à $\lambda_{pic} = 425\,nm$ et la DEL vert-bleue B5-433-B505 à $\lambda_{pic} = 505\,nm$. En se référant au profil spectral de la SPD du simulateur à dix DELs, l'ajout de ces deux DELs devrait nous permettre d`améliorer le *"spectral match "*. Les paramètres d'acquisition du système et le processus de calibration du simulateur restent inchangés. Les figures 6.10 et 6.11 donnent respectivement les caractéristiques colorimétriques et le profil spectral de la SPD du simulateur solaire D_{65} réalisé. On note d'excellentes caractéristiques colorimétriques avec une TCP de 6502 K et un CRI de 98.5 qui franchissent de loin le seuil d'éligibilité de 92 d'une source lumineuse comme simulateur solaire. La présence de pics plus prononcés au niveau de la SPD que ceux observés au niveau de celle du simulateur solaire à dix DELs, illustrés par la figure 6.10,

s'explique par le fait que le simulateur solaire D_{65} à douze DELs présente une puissance optique légèrement supérieure, de façon uniforme, à celle du simulateur solaire à dix DELs. L'intérêt est de disposer d'une marge de puissance supplémentaire pour prévoir les atténuations lors des expériences de test où le simulateur est placé à une distance plus ou moins importante de la surface test. On a également un meilleur équilibre entre les intensités des pics du spectre que dans le cas précédent.



Source	JAZA2160
Observer	2-degree
Illuminant	D65
Color Mode	Emissive
X	94.82
Y	99.63
Z	108.68
x	0.3128
y	0.3287
z	0.3585
CRI Ra	98.5 (6502K)

Figure 6.10 Caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} à douze DELs

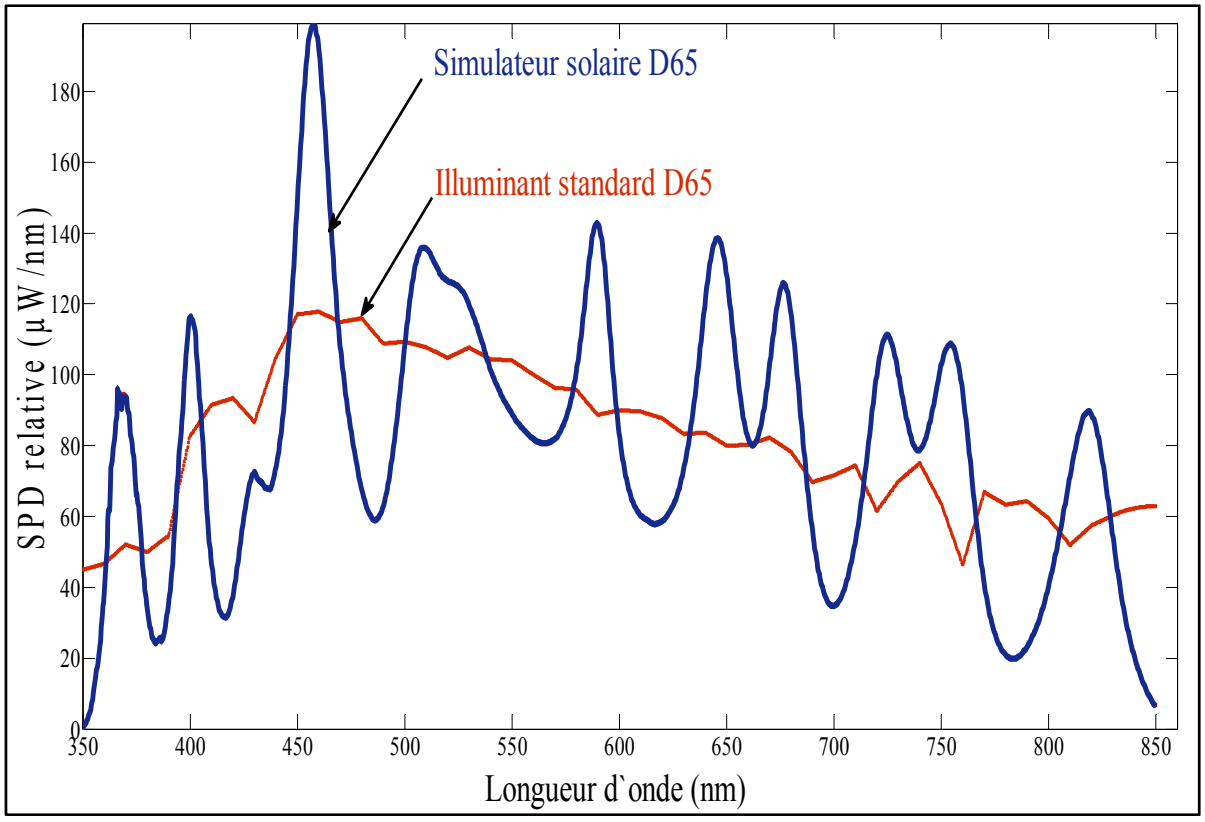


Figure 6.11 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à douze DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

En reprenant l'évaluation du *"spectral match"*, les résultats obtenus sont compilés à la figure 6.12. On remarque que, la variation de l'intensité de l'irradiance spectrale I du simulateur à douze DELs sur le domaine spectral 350 nm - 900 nm vérifie la condition établie par l'équation 6.1 pour un simulateur solaire de classe A dans la classification standard ASTM 927 E 10 au mode AM1.5G.

$$0.75I_0 \leq I \leq 1.25I_0 \qquad (6.1)$$

Avec

I_0 la valeur moyenne de l'irradiance spectrale définie dans la norme ASTM E927-10.

Cette validation renforce d'avantage la **Classe A** du simulateur solaire du point de vue *"spectral match "*.

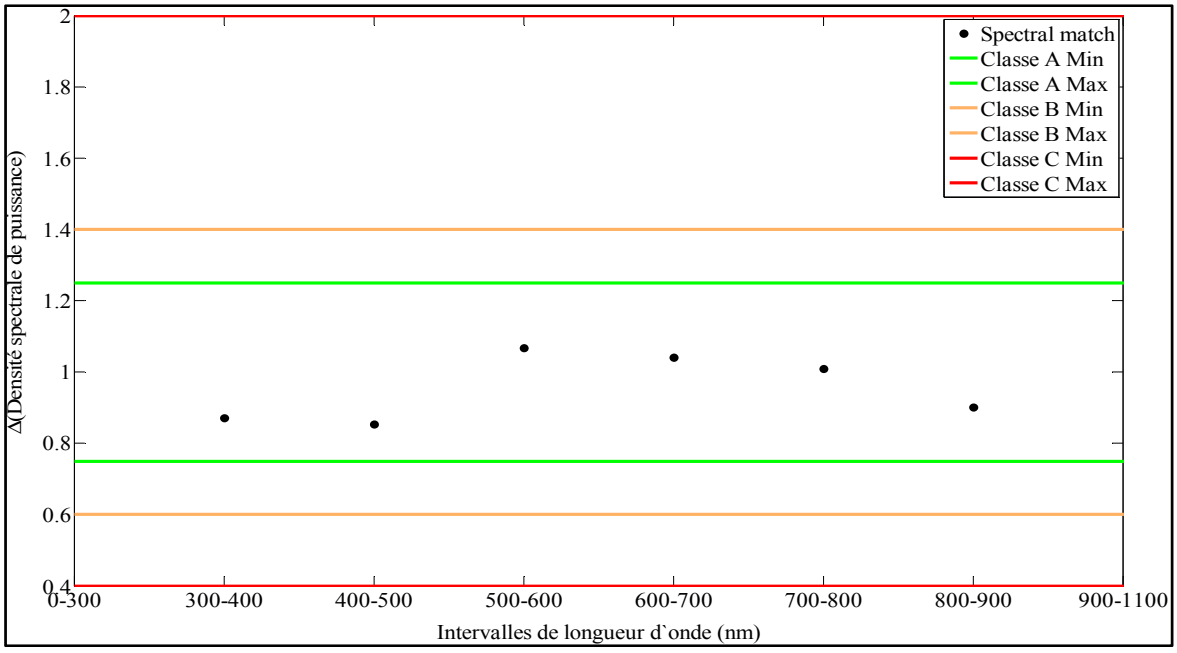


Figure 6.12 " Spectral match "de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à douze DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM

Le bilan montre que sur la base des spécifications standard, seules la non-uniformité spatiale et la stabilité temporelle de l'irradiance restent à déterminer pour le simulateur solaire D_{65}.

6.2.3.1 Non-uniformité spatiale de l`irradiance

La détermination de la non-uniformité spectrale de l'irradiance nécessite une nouvelle calibration du système d'acquisition des données. Pour cette prise de mesures, on remplace la sphère intégratrice par le diffuseur DG 10-600-MD (diffuseur gaussien) du fabricant Thorlabs (à la place d'un diffuseur sinusoïdal CC-3 (diffuseur lambertien) qui serait le composant idéal). L'environnement est mis à l'abri de toute lumière parasite. Les autres étapes de la calibration restent pratiquement inchangées. Après la calibration, le simulateur est fixé sur un support rotatif grâce à un moteur électrique lui permettant de tourner horizontalement autour de l`axe central du câble QP400-1-UV-VIS. On place de nouveau le diffuseur DG 10-600-MD devant le simulateur pour une meilleure uniformité de la lumière de sortie. Pour la prise de mesures, on fixe les paramètres d`acquisition du système ***temps d'intégration à 1 ms***, ***le Scan Average à 1*** et ***le Boxcar width à 0***. La figure 6.13 montre la

photo du montage expérimental; un schéma simplifié du dispositif est présenté à la figure 6.14.

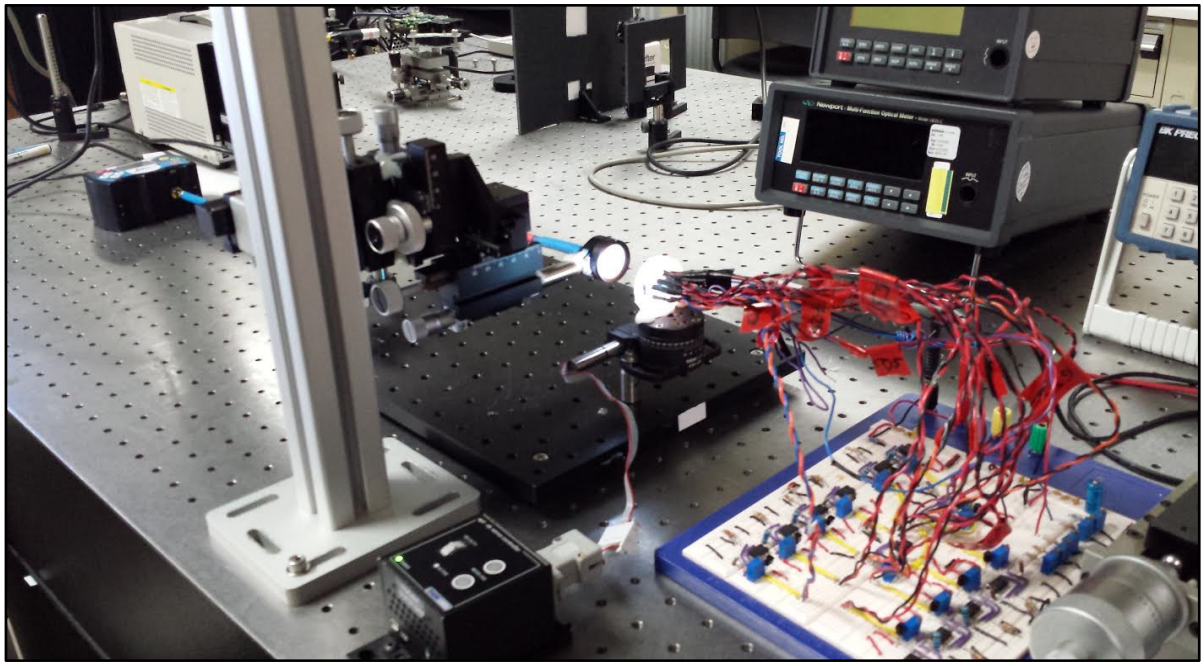


Figure 6.13 Dispositif expérimental pour la mesure de la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire à douze DELs

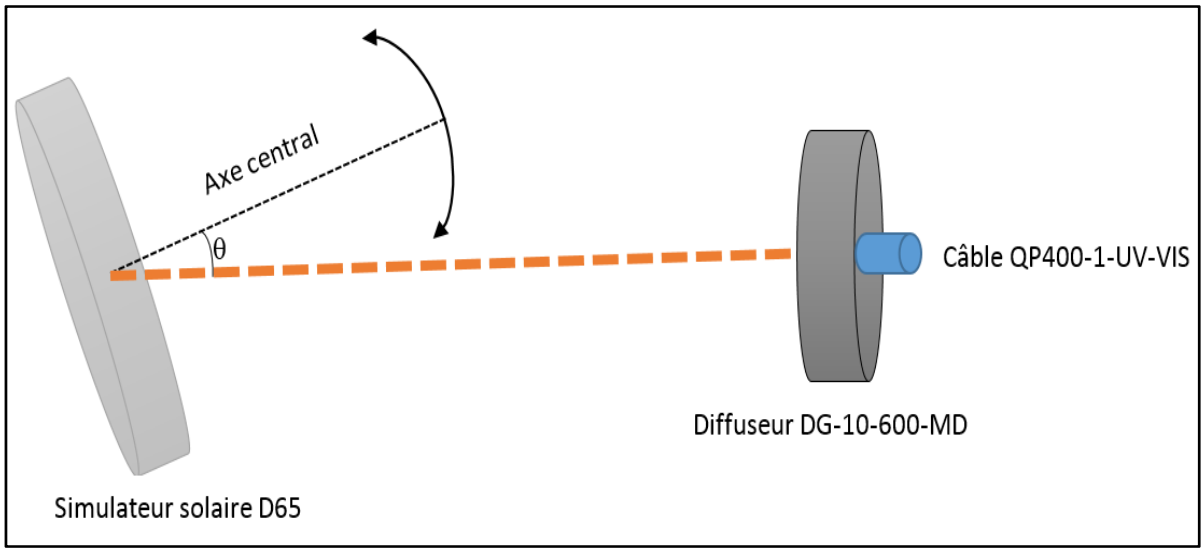


Figure 6.14 Technique d'évaluation de la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65}

L'évaluation de l'uniformité spatiale de l'irradiance est effectuée sur des surfaces test situées à des distances de 10 et 15 cm du simulateur solaire. On effectue des rotations du simulateur par pas d'angles d`un degré au tour de l'axe central (ligne en pointillés) du câble QP400-1-UV-VIS et le spectromètre enregistre l'irradiance spectrale à chaque position. Les résultats obtenus de la compilation des données recueillies à l'aide d'un programme Matlab sont présentés aux figures 6.15 et 6.16. Une évaluation sur une surface teste située à 5 cm nécessite un filtre supplémentaire, à cause de la forte non-uniformité de l'irradiance spectrale du simulateur solaire notée à cette position, ce qui entraîne une forte diminution de la puissance.

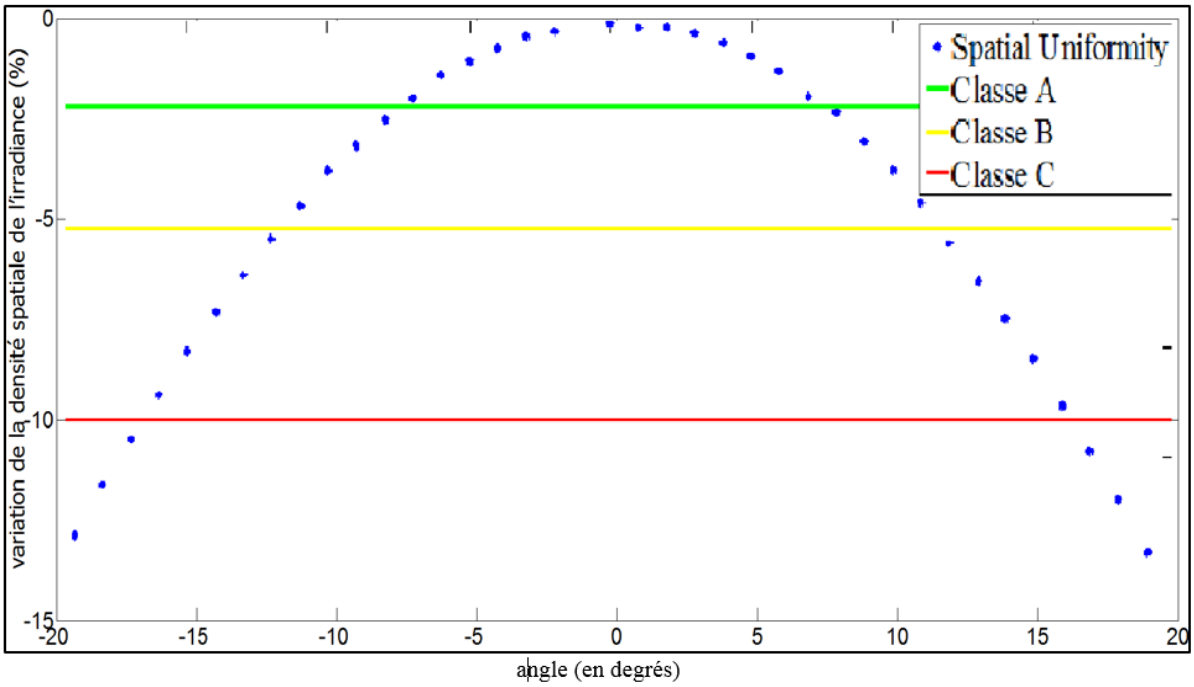


Figure 6.15 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à douze DELs sur une surface test située à 10 cm

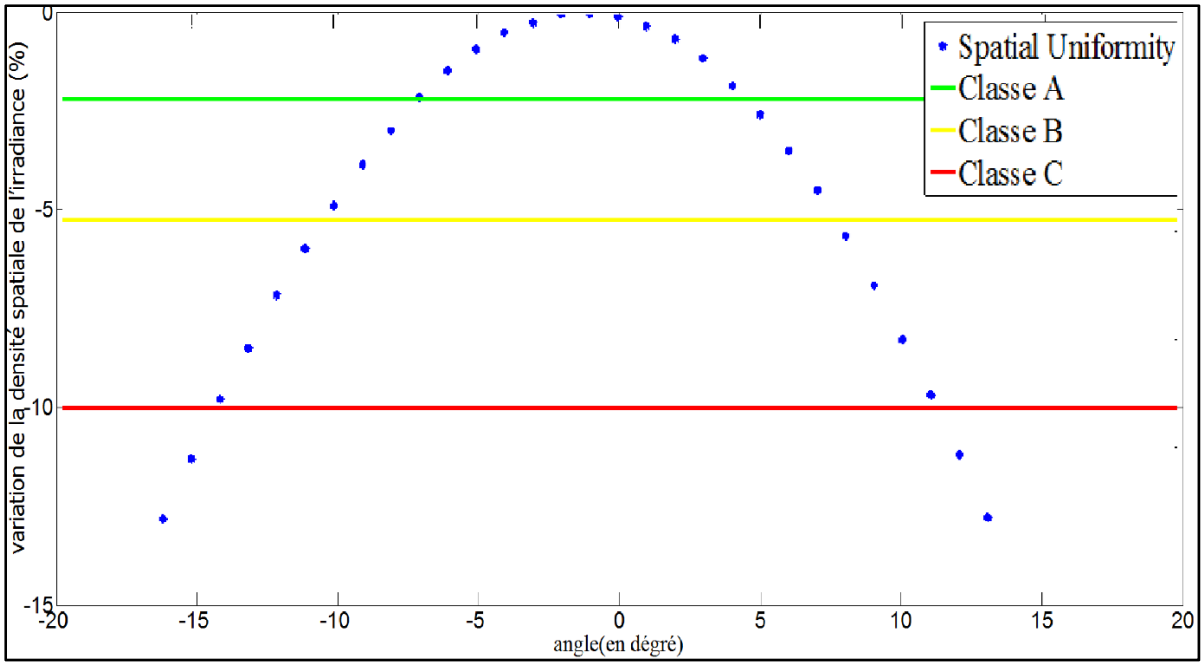


Figure 6.16 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à douze DELs sur une surface test située à 15 cm

L'analyse des résultats consiste à évaluer la variation de la densité spatiale de l'irradiance du simulateur sur la section de surface test illuminée sous le cône de demi-angle au sommet θ et déduire la classe du simulateur solaire correspondant à la non-uniformité spatiale de l'irradiance sur cette section de surface. La section de surface illuminée sous le cône de demi-angle θ est donnée par l'équation 6.2.

$$S_{Test} = \pi(d * \tan\theta)^2 \tag{6.2}$$

Avec

d: distance entre le simulateur solaire D_{65} et la surface test

S_{Test}: section de surface test illuminée sous une classe donnée

Les surfaces test pour lesquels la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur est successivement inférieure ou égale à 3, 5 et 10% respectivement permises pour un simulateur solaire de classe A, B et C de ce critère de performance sont celles représentées par les sections de courbes situées au-dessus de la droite représentant le seuil de tolérance en non-

uniformité spatiale de l'irradiance de la classe correspondante. Le tableau 6.3 donne les sections de surfaces test correspondant à chaque classe du simulateur de ce critère de performance en fonction de la distance entre la surface test et le simulateur.

Tableau 6.3 Classes du simulateur solaire D_{65} à douze DELs du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance en fonction de la distance du simulateur à la surface test et de l'aire de la surface illuminée

Distances (cm)	**10**			**15**		
Classe	A	B	C	A	B	C
θ (degrés)	07.50	11.75	16.30	05.75	09.00	12.60
$\boldsymbol{S_{Test}}$ **(cm^2)**	05.445	13.592	26.864	6.920	17.732	35.317

Ces résultats montrent que l'uniformité spatiale de l'irradiance est optimale sur une section de surface test située aux voisinages de 10 cm du simulateur solaire. Une surface test distante de 15 cm du simulateur offre une légère augmentation des sections de surfaces correspondant aux différentes classes mais les demi-angles au sommet de leurs cônes d'illumination diminuent comparés à ceux des sections de surface test correspondantes situées à 10 cm du simulateur. Ceci indique une uniformité spatiale de l'irradiance plus optimale sur une surface test distante de 10 cm du simulateur que sur celle située à 15 cm. Cela peut se justifier par le fait que le bouchon support des DELs soit conçu de telle sorte que tous les axes de rayonnement des DELs composant le simulateur convergent au centre du fond de la sphère intégratrice qui se situe à environ 8.5 cm de son ouverture. Cependant, puisque toutes les DELs n'ont pas des diagrammes de rayonnement identiques, la détermination de la position exacte de la surface test qui donne la meilleure uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur peut être délicate. Il est également très difficile de faire une interprétation approfondie des résultats obtenus par cette méthode car la densité de puissance maximale dans le câble QP400-1-UV-VIS ne correspond pas au profil spectral de l'irradiance du simulateur solaire représenté aux figures 6.11 et 6.12. L'utilisation d`une lentille de focalisation pourrait être une solution permettant une caractérisation plus rigoureuse, cependant, cette option pourrait modifier la distribution spatiale de l'irradiance sur les

surfaces test et conduire à des résultats qui ne rendent pas compte du profil spectral réel du simulateur solaire.

6.2.3.2 Évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance

Le simulateur solaire D_{65} fonctionne en mode statique et n'intègre pas un système d'acquisition de données, on peut utiliser l'équation 4.2 pour évaluer son instabilité temporelle d'irradiance. Le système de mesure est celui utilisant le mode de calibration avec sphère intégratrice. Nous avons procédé à une série d'acquisition de la SPD par pas de 5 millisecondes sur une durée de 5 minutes avec comme paramètres d'acquisition ***temps d'intégration à 1 ms***, ***Scan Average à 1*** et ***Boxcar width à 0***. Les données recueillies sont compilées à l'aide d'un programme Matlab pour évaluer le comportement temporel de l'irradiance spectrale du simulateur et la comparer aux standards. La figure 6.17 montre une fluctuation maximale de l'irradiance spectrale égale à 0.7106% dans l'intervalle de temps considéré. Cette valeur est nettement inférieure au seuil de 2% établi dans les standards pour un simulateur solaire de **Classe A** selon ce critère de performance.

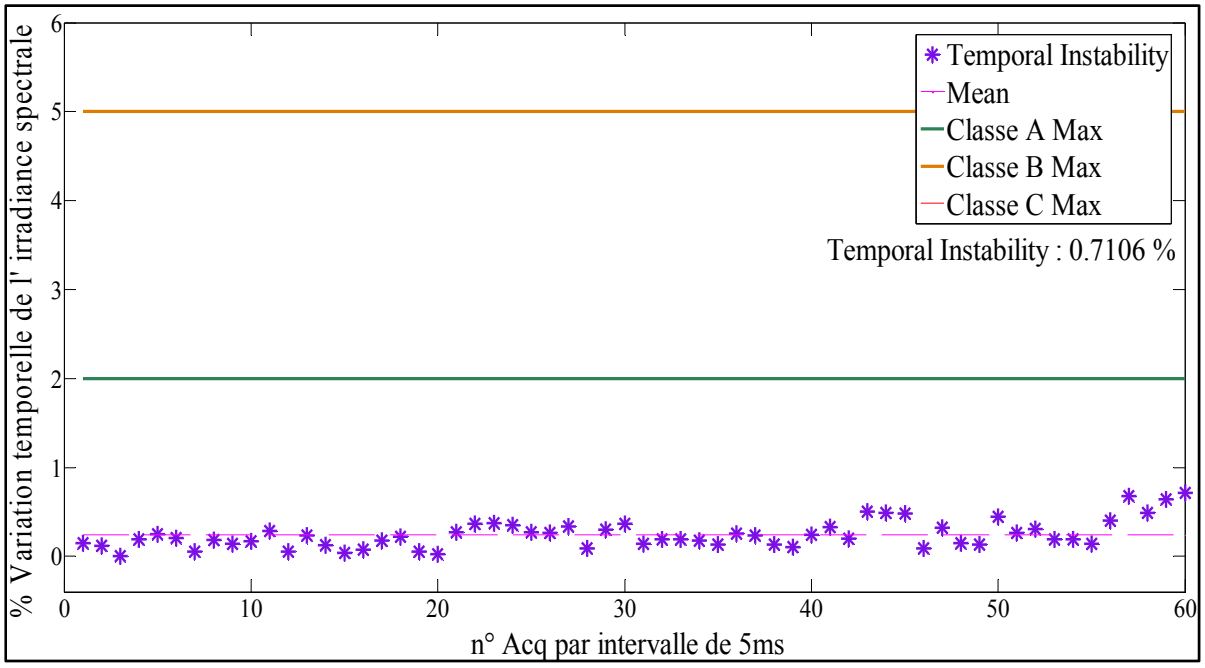


Figure 6.17 Instabilité temporelle de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à douze DELs mesurée sur un intervalle de temps de 300 s par pas de 5 ms

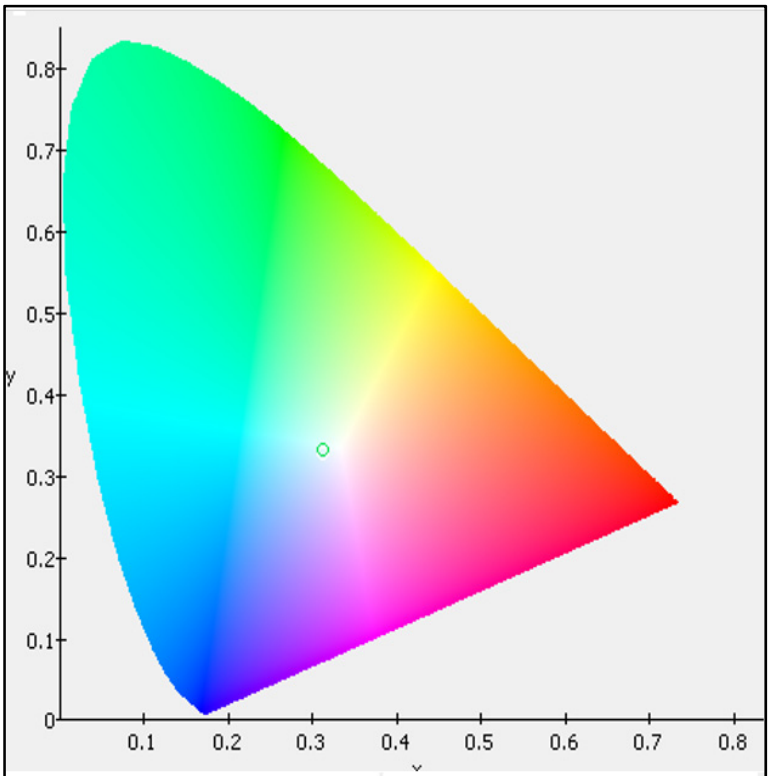
En résumé, nous avons réalisé un simulateur solaire D_{65} à douze DELs de Classe A en match spectral et instabilité temporelle de l'irradiance et de Classe A en uniformité spatiale de l'irradiance sur des sections de surfaces test de **5.445 cm^2** et de **6.920 cm2** distantes respectivement de **10 cm** et **15 cm** du simulateur solaire. Puisque le bouchon support des DELs peut supporter un maximum de quatorze, nous avons eu la curiosité de porter le nombre de DELs du simulateur solaire à quatorze dans le but d'améliorer la section de surface test distante de 10 cm illuminée par le simulateur solaire de **classe AAA**.

6.2.4 Simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs

Avec le simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs, nous visons à améliorer la surface test distante de 10 cm du simulateur solaire D_{65} à douze DELs de classe AAA. Les DELs supplémentaires sont la composante rouge de la RGBE ($\lambda_{pic} = 627.5$ nm) et la 780-01AU ($\lambda_{pic} = 780$ nm). Le tableau 6.4 résume les caractéristiques des quatorze DELs constituant le simulateur solaire D_{65}. Les paramètres d`acquisition du système ainsi que le processus de calibration du simulateur restent les mêmes que ceux de la calibration du simulateur à douze DELs. Cependant, il est bon de préciser que chaque fois que l'on déconnecte le spectromètre d'un côté, on doit refaire une nouvelle calibration pour la prise de mesures. Les figures 6.18 et 6.19 et 6.20 présentent respectivement les caractéristiques colorimétriques, le profil et le match spectral de la SPD du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs comparées aux données standard. Les caractéristiques colorimétriques TCP et CRI n'ont pratiquement pas changé comparativement à celles du simulateur à douze DELs. Cependant on a un profil spectral qui donne une meilleure approximation de celui de l'illuminant D_{65} de la CIE comme le montre la figure 6.19.

Tableau 6.4 Références des quatorze DELs composant le simulateur solaire D_{65}

N°	$\lambda_d\ (nm)$	**P (mW) @ 20 mA**	**Code**	**½ θ cône de rayonnement**	**Fabriquant**
1	365	2,4 - 6	XSL-365-5E	15	R. L. GmbH
2	400	08.1 - 11,5	VL400-5-15	15	R. L. GmbH
3	425	06 - 08	LED425-6-30	15	R. L. GmbH
4	505	n	B5-433-B505	15	R. L. GmbH
5	535	07 - 10	C503B-GCS-CY0C0791	30	CREE
6	589	n/sp	OVLFY3C7	20	TT Electronics
7	*627.5*	n/sp	*LEDRGBE*	*30*	*Thorlabs*
8	640	n/sp	L-53SRC-E	30	Kingbright
9	680	25 mW/sr	LED680-02AU	07	R. L. GmbH
10	720	07	ELD720-524	20	R. L. GmbH
11	760	10	LED760/940-04A	07	R. L. GmbH
12	*780*	*18*	*LED780-01AU*	*20*	*R. L. GmbH*
13	820	18	LED820-01AU	10	R. L. GmbH
14	460	n/sp	W54L5111P	15	R. L. GmbH



Property	Value
Source	JAZA2160
Observer	2-degree
Illuminant	D65
Color Mode	Emissive
X	135.02
Y	144.00
Z	153.45
x	0.3122
y	0.3330
z	0.3548
CRI Ra	98.6 (6503K)

Figure 6.18 Caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs

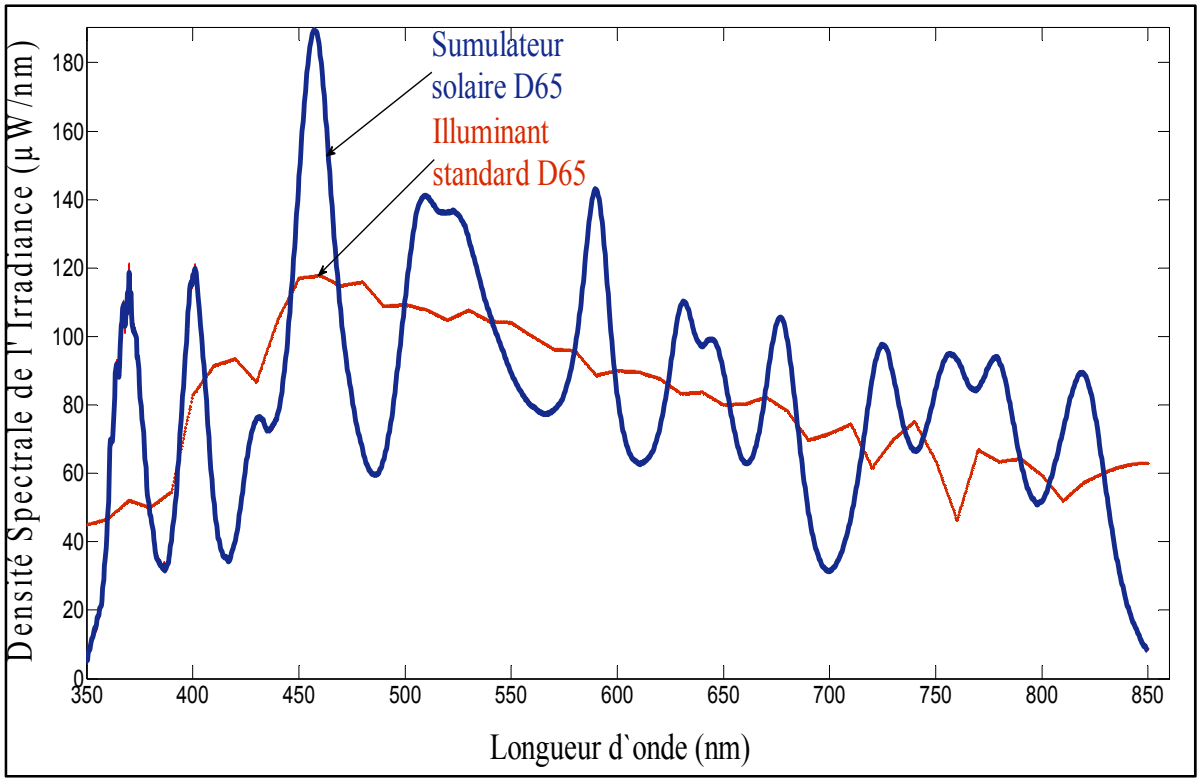


Figure 6.19 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à quatorze DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

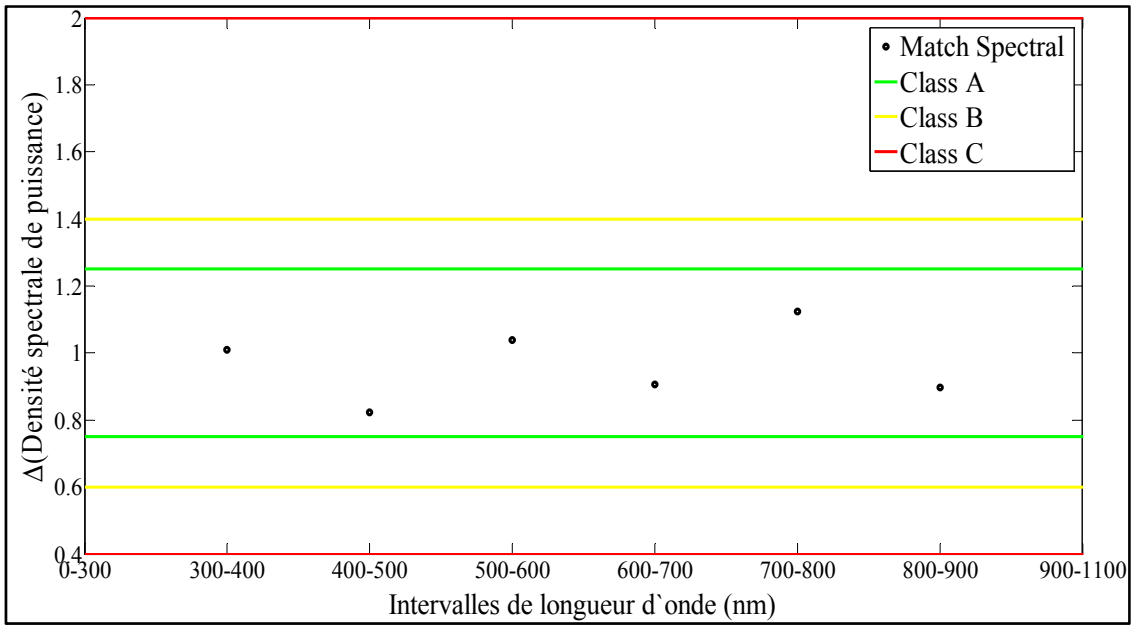


Figure 6.20 "Spectral match " de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM

6.2.4.1 Lissage du profil spectral de la SPD du simulateur solaire à quatorze DELs

On ne dispose pas d'un modèle mathématique des ellipses de MacAdam. Cependant leur représentation sur le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931 de la figure 2.5 nous a permis de faire les approximations ci-dessous :

- $380\ \text{nm} \leq \lambda \leq 550\ \text{nm}$, les ellipses de MacAdam s'étendent en moyenne sur 5 nm,
- $550\ \text{nm} \leq \lambda \leq 650\ \text{nm}$, les ellipses de MacAdam s'étendent en moyenne sur 30 nm,
- $650\ \text{nm} \leq \lambda \leq 680\ \text{nm}$, les ellipses de MacAdam s'étendent en moyenne sur 10 nm,
- $350\ \text{nm} \leq \lambda \leq 380\ \text{nm}$ et $680\ \text{nm} \leq \lambda \leq 850\ \text{nm}$: les ellipses de MacAdam s'étendent en moyenne sur 5 nm par extrapolation.

Sur un domaine de longueurs d'onde donné, la SPD du simulateur solaire est obtenue en faisant la somme des SPDs constantes par pas de $\Delta\lambda$ équivalente à la largeur spectrale couverte par les ellipses de MacAdam de ce domaine. Les valeurs constantes des SPDs sur sur les différents pas $\Delta\lambda$ de longueur d'onde d'un domaine spectral sont obtenues en faisant successivement la moyenne arithmétique des valeurs extrêmes de la SPD du simulateur solaire aux longueurs d`onde extrèmes de chaque $\Delta\lambda$. Le profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} à quatorze DELs lissé sur la base de ces approximations comparé à celui de la SPD de l'illuminant D_{65} est représenté à la figure 6.21.

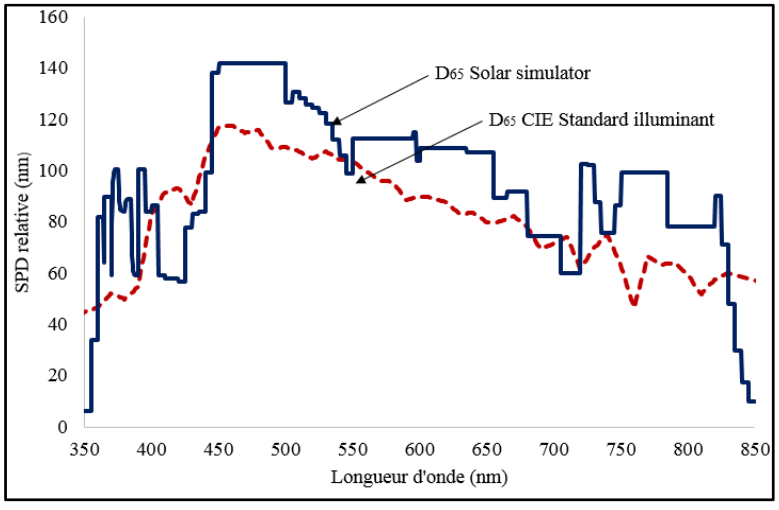


Figure 6.21 Profil spectral lissé de la SPD du simulateur D_{65} à quatorze DELs en tenant compte des ellipses de MacAdam comparé à celui de la SPD de l'illuminant D_{65}.

6.2.4.2 Non-uniformité spatiale de l'irradiance

Après avoir effectué les mesures des données colorimétriques et spectrales du simulateur D_{65} à quatorze DELs, on reprend la même procédure de calibration de la section 6.2.3.1 en conservant les mêmes paramètres d'acquisition pour l'évaluation de la non-uniformité spatiale de l'irradiance sur une surface test distante de 10 cm du simulateur solaire. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6.22.

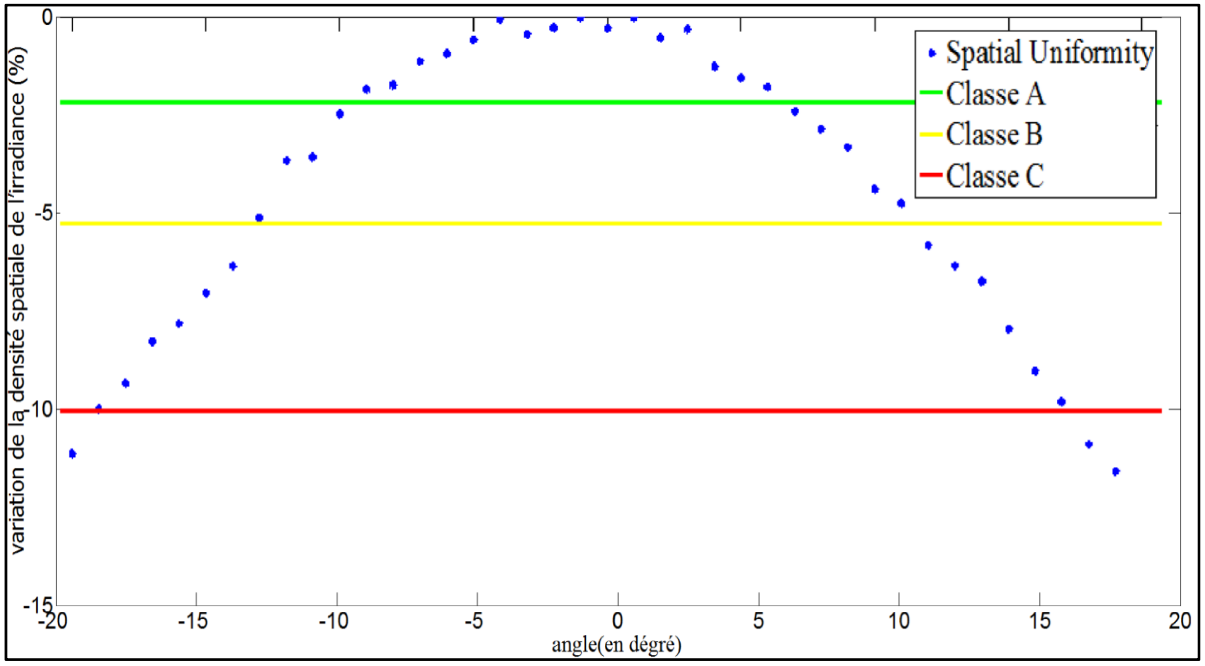


Figure 6.22 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs sur une surface test située à 10 cm

La détermination de la section de surface test illuminée par le simulateur solaire de **classe AAA** se fait selon le même principe utilisé dans le cas du simulateur solaire à douze DELs. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 6.5.

Tableau 6.5 Classe du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance en fonction de l'aire d'une surface teste distante de 10 cm

Distance (cm)	**10**		
Classe	A	B	C
θ (^{o})	08.10	12.30	18.00
S_{Test} (cm^2)	6.363	13.592	27.125

Nous pouvons remarquer qu'à 10 cm du simulateur, les aires des sections de surface correspondant aux classes A, B et C selon la non-uniformité spatiale de l'irradiance sont pratiquement voisines de celles obtenues sous illumination par le simulateur solaire à douze DELs dans les mêmes conditions. Cela peut paraître logique dans la mesure où les axes des faisceaux de toutes les DELs convergent à une distance voisine de 10 cm du simulateur, la contribution spectrale de chacune d'elles se fait de manière quasi-uniforme sur une surface test située au voisinage de ce point de concourt. Les surfaces test distantes de 10 cm sous illumination par les simulateurs solaires à douze et à quatorze DELs de **classe AAA** sont respectivement 5.445 cm^2 et 6.363 cm^2, soit une augmentation d'aire de l'ordre de 16.86 %.

6.2.4.3 Évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance

L'évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance se fait selon le même procédé utilisé pour le simulateur solaire à douze DELs. La figure 6.23 donne le résultat obtenu déterminé par rapport au standard G927 E-10 de l'ASTM. La valeur de 0.516% d'instabilité temporelle renforce la **classe A** de notre simulateur solaire D_{65} par rapport à ce critère de performance.

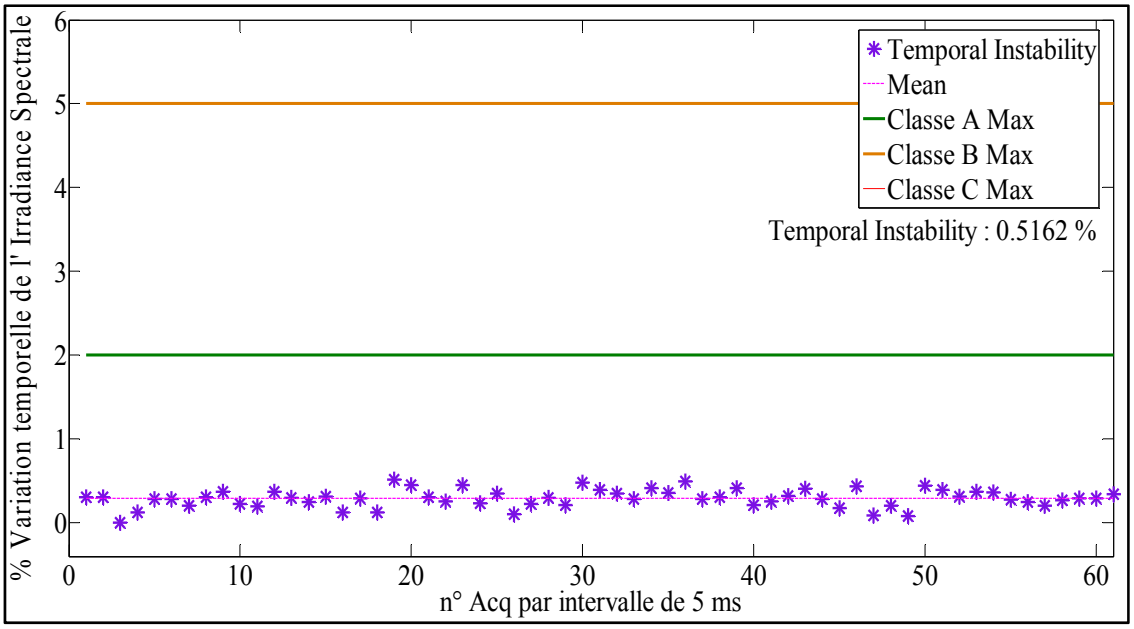


Figure 6.23 Instabilité temporelle de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs mesurée sur un intervalle de temps de 300 s par pas de 5 ms

6.2.4.4 Paramètres calibrations du simulateur solaire

Les paramètres d'acquisition des données de caractérisation du simulateur par SpectraSuite sont primordiaux pour la reproductibilité des résultats. Cependant, les caractéristiques du simulateur demeurent très sensibles aux fluctuations des courants d'alimentation des DELs (l'équible du circuit d'alimentation est perdu chaque fois qu'on ajoute ou retire une ou plusieurs DELs) et à la disposition de ces dernières sur le bouchon support. Le changement de la position d'une DEL sur le bouchon peut fortement modifier sa contribution en irradiance et de facto, modifier considérablement les caractéristiques colorimétriques et spectrales du simulateur solaire. Ces limitations peuvent être dues aux erreurs de fabrication sur les dimensions des DELs et des trous du support des DELs. Par conséquent, la contribution en puissance de chaque composante DEL du simulateur solaire reste le paramètre fiable pour la reproductibilité des résultats. Le tableau 6.6 donne la puissance totale du simulateur solaire à quatorze DELs réalisé ainsi que la contribution en puissance de chacune de ses composantes DELs.

Tableau 6.6 Puissance optique totale P_{opt} du simulateur solaire à quatorze DELs et la contribution en puissance (en %) de chacune de ses composantes DELs

N°	**Led365**	**Led400**	**Led425**	**Led505**	**Led535**	**Led589**	**Led627**
P_{op} **(mW)**	2.65	2.64	1.50	3.33	1.73	1.91	0.932
Puissance totale du simulateur D65 à quatorze LEDs - Puissance totale du - -							
%	4.69	4.67	2.65	5.89	2.75	3.06	1.65

N°	**Led640**	**Led680**	**Led720**	**Led760**	**Led780**	**Led820**	**Led-W**
P_{op} **(mW)**	1.94	3.25	3.03	2,82	3.25	4.36	23.20
- - simulateur D65 à quatorze LEDs (mW)						*56.542*	
%	3.43	5.75	5.36	4.99	5.75	7.71	41.03

6.2.4.5 Contribution spectrale de la DEL W54L5111

Compte tenu du domaine spectral couvert par la DEL blanche, il est intéressant de se faire une idée de son poids sur le profil spectral du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs. La figure 6.24 donne le profile spectral ainsi que les caractéristiques colorimétriques de son rayonnement lumineux sous un courant d`alimentation de 0.31 mA. On remarque une forte contribution spectrale de la part de cette DEL au niveau de la SPD du simulateur, Cependant, son diagramme de rayonnement assez étroit peut pénaliser l'uniformité de la distribution spatiale de la puissance de ce dernier sur une surface test. Quant à son utilisation à forte intensité pour augmenter la puissance du simulateur, on note une dérive de la TCP vers de très grandes valeurs due à la forte radiation bleue autour de 465 nm; ce qui rend très délicat l'optimisation du simulateur.

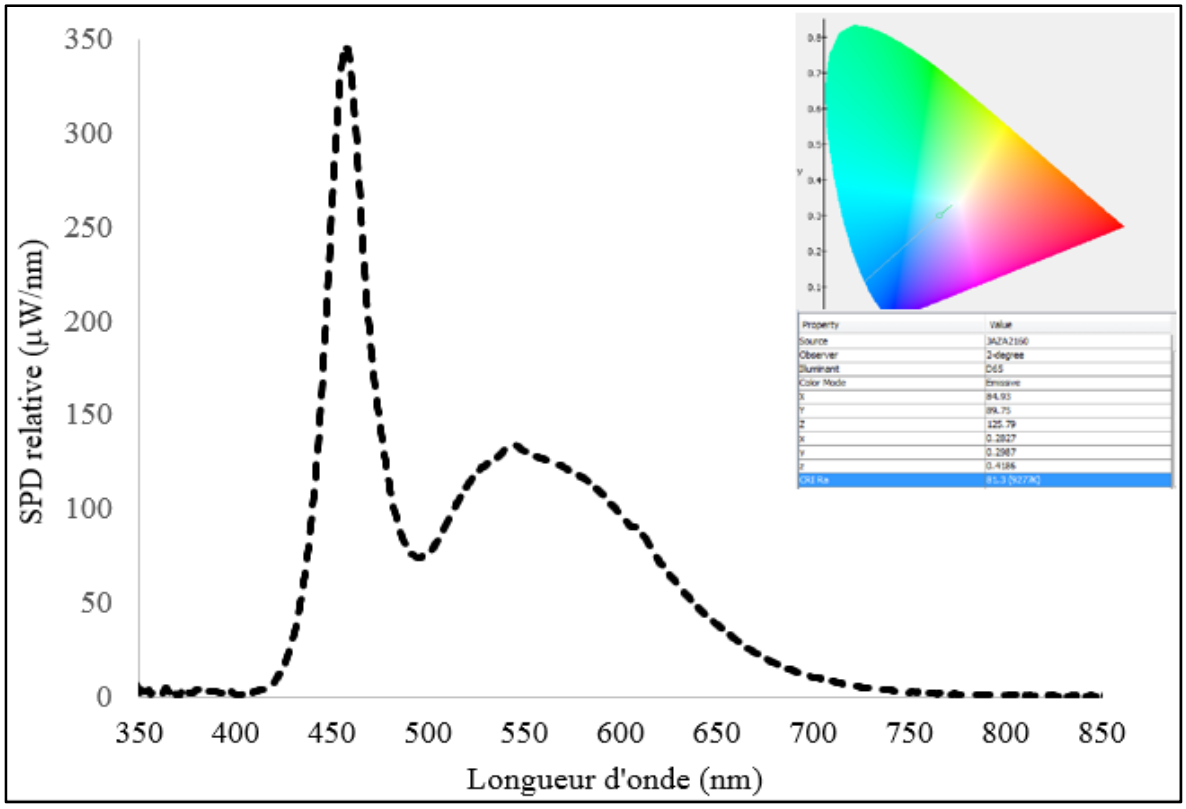


Figure 6.24 Contribution en SPD de la DEL W54L5111P sous une alimentation d'un courant de 0.31 mA et à la température de la salle dans la SPD du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs

6.2.4.6 Mesure de densité de puissance sur une surface test distante de 10 cm du simulateur solaire D_{65}

Après l'optimisation et la caractérisation du simulateur D_{65} via SpectraSuite, il est nécessaire d'évaluer directement sa densité de puissance sur une surface test illuminée. Ces mesures sont effectuées sur une surface test distante de 10 cm du simulateur en utilisant le détecteur au silicium 818 SL de Thorlabs comme l'illustre la photo présentée à la figure 6.25. Ce détecteur à une couverture spectrale de 400 nm à 1100 nm et une surface active de 1 cm^2. Nous avons fixé la longueur d'onde centrale du détecteur à $\lambda = 600\,nm$ par le simple fait qu'elle correspond au centre du domaine spectral du simulateur solaire D_{65}. Vues les dimensions de la source par rapport à la surface active du détecteur, nous avons procédé à des prises de mesures par pas de 0.50 cm sur l'axe horizontal puis vertical du rayonnement du simulateur de part et d'autre d'une position centrale correspondant à la puissance

maximale mesurée sur la surface test. La moyenne des densités de puissance mesurées aux quatre positions équivalentes r_i de part et d'autres de la position correspondant à la densité maximale équivaut à la densité spatiale de puissance sur la section de surface $S_{ri-0.5 \rightarrow ri}$ exprimé en cm^2 comprise entre les circonférences consécutives de rayon $r_i - 0.5$ et ri. Le détecteur ayant une surface active circulaire de 1 cm^2, le rayon varie par pas de 0.5 cm entre $0{,}564\ c$m et 3.060 cm avec comme limite inférieure le rayon de la surface active du détecteur et la limite supérieure est fixée par des contraintes mécaniques liées au dispositif expérimental. La densité spatiale de puissance maximale mesurée à l'origine est obtenue sur une surface circulaire (surface active du détecteur) de rayon $r_1 = 0.564$ cm. Les valeurs des densités de puissances mesurées pour différentes valeurs ri sont indiquées au tableau 6.7. La densité spatiale de puissance $\mathrm{D}_{\mathrm{r}_i}$ sur chaque portion de surface test comprise entre les rayons r_i - 0.5 et r_i est donnée par l'équation 6.3 et la figure 6.26 donne les variations de densités spatiales de puissance en fonction de la position sur la surface test et de la distance qui la sépare du simulateur solaire.

$$\mathrm{D}_{\mathrm{r}_i} = \mathrm{D}_{\mathrm{r}_{i-0,5} \rightarrow \mathrm{r}_i} = \frac{P_{r_i - 0,5} - P_{r_i}}{S_{r_i} - S_{r_i - 0,5}} \tag{6.3}$$

Avec

P_{r_i} : puissance en milliwatts lue au niveau du détecteur à la position r_i

$P_{r_{i-0,5}}$: puissance en milliwatts lue au niveau du détecteur à la position $\mathrm{r}_i - 0{,}5\ cm$

S_{r_i} : aire en centimètres carrés de la surface test de rayon r_i

$S_{r_{i-0.5}}$: aire en centimètres carrés de la surface test de rayon $\mathrm{r}_i - 0{,}5\ cm$

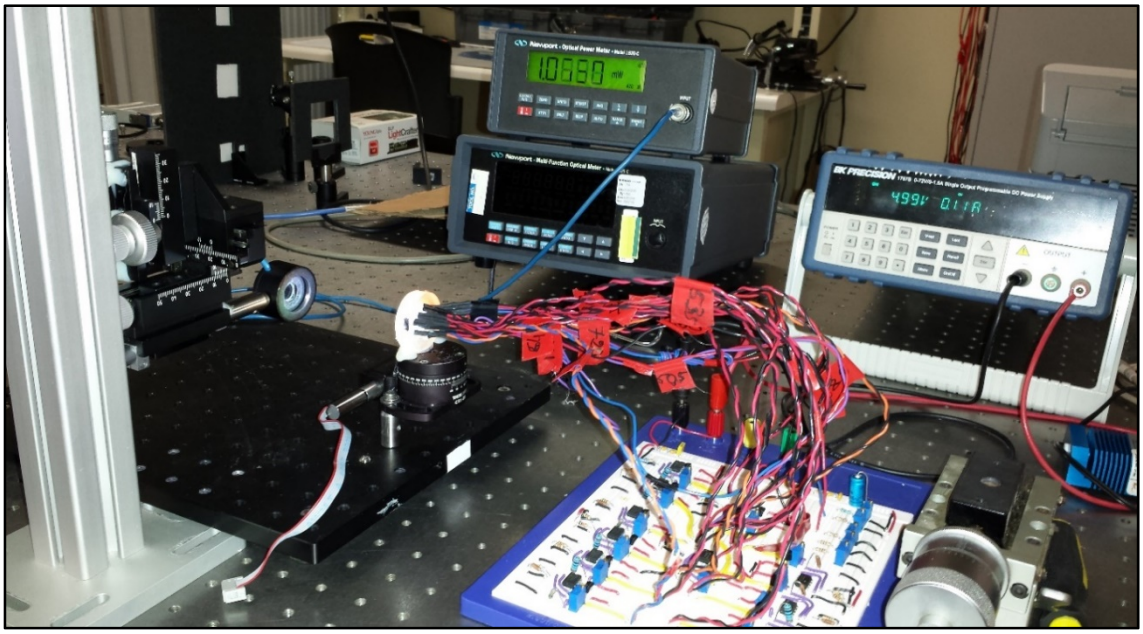


Figure 6.25 Montage de la mesure de la densité spatiale de puissance du simulateur solaire à quatorze DELs sur une surface test distante de 10 cm

Tableau 6.7 Densité spatiale de puissance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs sur differentes sections de surface en fonction du rayon d'illumination d'une surface test distante de 10 cm

Rayon (cm)	**Section de Srsurface (cm^2)**	**Densité de puissance sur distante de 10 cm ($mW.cm^{-2}$)**
0.000	0.000	1.020
0.000 - 0.564	1,000	1.020
0.564 - 1.060	2,530	0.959
1.060 - 1.620	5,745	0.802
1.620 - 2.180	9,185	0.590
2.180 - 2.640	12,710	0.361
2.640 - 3.060	16,707	0.195

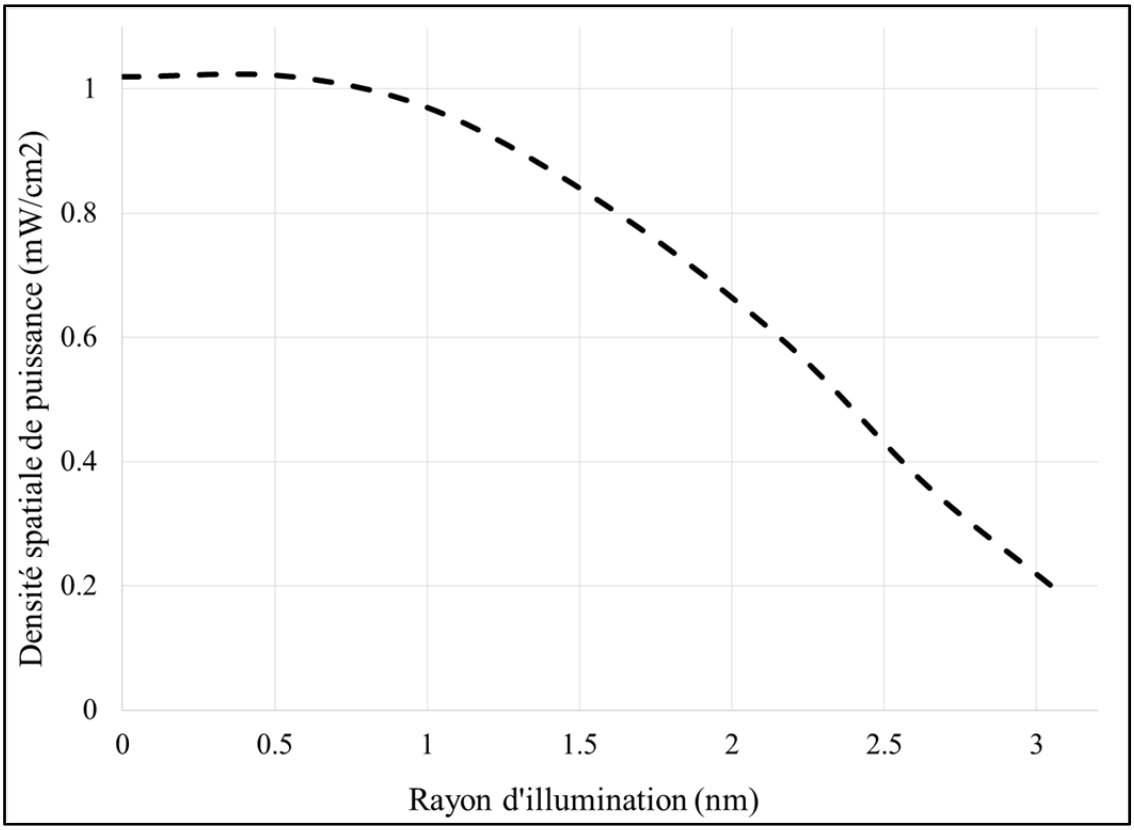


Figure 6.26 Variation de la densité spatiale de puissance du simulateur D_{65} à quatorze DELs en fonction du rayon d'illumination (r_i) sur une surface test distante de 10 cm

En considérant la surface test distante de d $= 10$ cm du simulateur, la densité puissance maximale indiquée à l'origine par le détecteur est $D_{max} = 1.02\ mW/cm^2$. A la circonférence de la surface illuminée sous le cône de demi-angle au sommet $\theta(A)$ = 8.10 degrés ($r_\theta(A) = 1.423\ cm$) correspondant à la section de surface test distante de 10 cm sous illumination par le simulateur à quatorze DELs de **classe AAA**, la densité spatiale de puissance est de 0.802 mW/cm^2. Ceci équivaut à une variation de la densité spatiale de puissance par rapport à la position $r_1 = 0.564$ de l'ordre de 21.40%. La différence de cette valeur à celle de 25 % trouvée à la section 6.24.2 pour la même section de surface test selon ce critère de performance pourrait s'expliquer par le fait que le profil de la réponse spectrale du détecteur 818 SL ne soit pas le même que celui du spectromètre sur le domaine spectral du simulateur solaire. De plus, la longueur d'onde centrale que nous avons callée à $\lambda = 600\ nm$ peut ne pas être celle qui correspond à la meilleure sensibilité du détecteur vis-à-vis de l'irradiance spectrale du simulateur solaire. Ces limitations peuvent être à l'origine des

différences notées au niveau de la variation de la densité spatiale de puissance sur la surface test distante de 10 cm du simulateur solaire. En valeur moyenne, la section de surface test distante de 10 cm sous illumination par le simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs de **classe AAA** reçoit une densité spatiale de puissance de 0.927 mW/cm^2. Cette valeur de est de l'ordre du centième de la valeur standard (100 mW/cm^2) idéale pour la caractérisation de cellules solaires photovoltaïques; cependant, cette limitation n'est qu'une question d'ingénierie!

6.2.4.7 Position du simulateur par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système CIE (u, v) 1960

A partir des coordonnées de chromaticité (x, y) d'une source dans le système CIE (x, y) 1931, on peut déduire ceux (u, v) et (u', v') des systèmes de coordonnées respectifs CIE (u, v) 1960 et CIE (u', v') 1976 à partir des équations de transfert 6.4 et 6.5.

$$u' = u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \tag{6.4}$$

$$v' = \frac{3}{2}v = \frac{9x}{-2x + 12y + 3} \tag{6.5}$$

Le tableau donne les coordonnées de chromaticité u et v du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs et la figure 6.27 indique la position du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système de coordonnées CIE (u, v) 1960.

Tableau 6.8 Coordonnées de chromaticité du simulateur solaire à quatorze DELs comparées à celles de l'illuminant normalisé D_{65} dans les systèmes CIE (x, y) 1931 et CIE (u, v) 1960

Type de source	**CIE (x, y) 1931**		**CIE (u, v) 1960**	
	x	y	u	v
D_{65} Illuminant	0.3127	0.3290	0.198	0.312

Simulateur solaire D_{65}	0.312	0.333	0.196	0.313

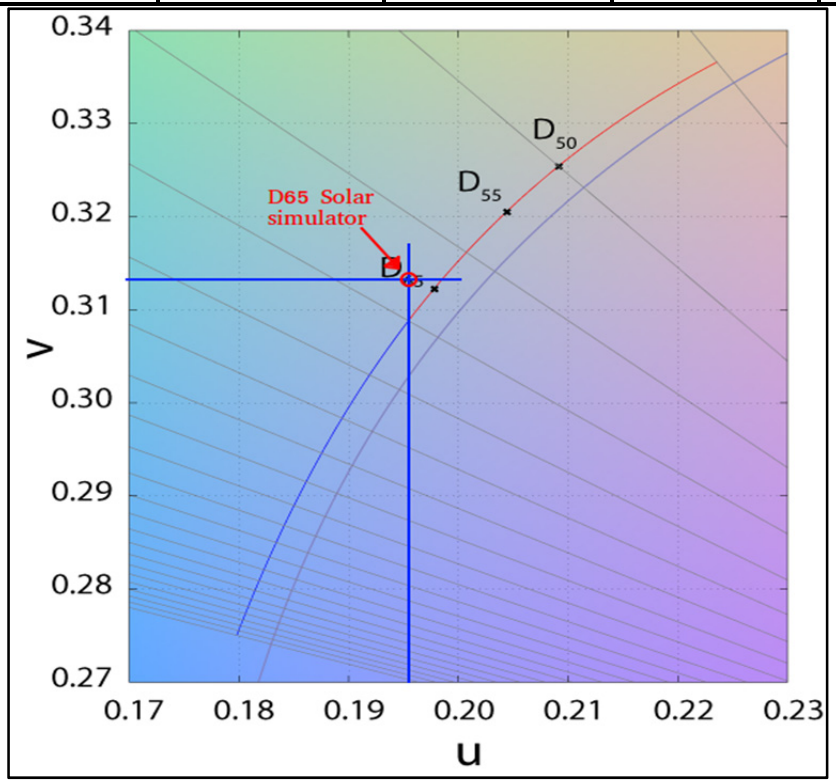


Figure 6.27 Position du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système CIE (u, v) 1960
Adaptée de Wikipédia (2014)

Le calcul de la distance séparant la position de l'illuminant D_{65} à celle du simulateur en utilisant l'équation 3.1 adaptée au système de coordonnées CIE (u, v) 1960 est de l'ordre de 0.4×10^{-2}; une valeur nettement inférieure au seuil 5×10^{-2} recommandée par la CIE pour que le simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs puisse être comparable au radiateur de Planck ayant une température de couleur de 6504 K.

CONCLUSION

Les efforts consentis dans ce travail ont eu comme objectif la réalisation d'un simulateur solaire D_{65} à partir d'un assemblage de DELs de forme broche pour des applications en photovoltaïque. Pour ce type d'applications, les caractéristiques essentielles d'un simulateur solaire sont l'énergie, le match de l'irradiance spectrale par rapport à un standard défini, l'uniformité spatiale de l'irradiance et la stabilité temporelle de l'irradiance sur une surface test. La majorité des systèmes photovoltaiques ont comme constituant de base le silicium; les données standard définies pour la caractérisation des simulateurs solaires sont souvent établies en se basant sur les propriétés physiques du silicium telles que son énergie de bande interdite et son coefficient d'absorption.

Le marché du photovoltaïque dispose de simulateurs solaires performants mais leurs caractérisitiques (coût, poids et dimensions) demeurent des facteurs limitants pour leur utilisation à grande échelle. En associant treize DELs de couleurs et une DEL blanche, on a pu réaliser un simulateur solaire D_{65} de **classe AAA** par rapport aux critères de performance que sont le *"match spectral"*, la stabilité temporelle et l'uniformité spatiale de l'irradiance spectrale sur une surface test de 6.363 cm^2 distante de 10 cm du simulateur et sur le domaine spectral 350 nm - 900 nm. Le grand intérêt de ce travail est surtout le faible coût de réalisation et la portabilité du simulateur solaire réalisé qui sont des éléments essentiels pour la rentabilité et l'utilisation à grande échelle. La grande stabilité du rayonnement et la longue durée de vie de ses composantes DELs, surtout lorsque celles-ci sont alimentées par de faibles courants, confèrent au simulateur solaire D_{65} réalisé une place de choix dans les applications nécessitant une grande stabilité spectrale. Aussi, ces résultats ouvrent des bonnes perspectives à la miniaturisation et la réduction des coûts des simulateurs solaires dans le marché photovoltaïque. La commercialisation de ce produit pourrait contribuer favorablement à une utilisation plus flexible des simulateurs solaires aussi bien au sein des laboratoires de recherche que dans l'industrie photovoltaïque. L'avantage de la méthode est d'éviter l'utilisation des luminophores et de permettre le bon contrôle dynamique l'irradiance spectrale.

Les données standard relatives à la caractérisation d'un simulateur solaire sont généralement établies sur le domaine spectral 400 nm - 1100nm. La limitation de la couverture spectrale du simulateur solaire D_{65} réalisé entre 350 nm et 900 nm est liée à trois contraintes majeures:

- la couche de protection en plastique des puces des DELs en forme broche ne transmettent pas au-dessous de 350 nm;
- les bandes spectrales du spectromètre Jaz et de la source de calibration LC-1-CAL s`étendent respectivement de 350 nm à 1000 nm et 350 nm à 1100 nm avec un signal très bruité au-delà 900 nm;
- le nombre maximal de DELs pouvant être utilisé pour la réalisation du simulateur solaire D_{65} est limité par la capacité du bouchon support à l'orifice de la sphère intégratrice.

Cependant, l'énergie contenue dans le domaine visible (380 nm - 780 nm) est suffisante pour garantir un fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque à base de silicium (Honsberg and Bowden, 2013); ce qui nous rend confortables dans le domaine spectral de notre simulateur solaire D_{65}.

Le défaut majeur de la technologie réside au niveau du contrôle individuel de chacune des quatorze DELs élémentaires qui constituent le simulateur D_{65}. Il faut aussi prendre en compte le fait que les diodes de chaque couleur élémentaire nécessitent une tension d'alimentation différente. Une conséquence directe de ces défauts est que: comparée à une lampe classique de même flux lumineux, la surface de la source composite est considérable. Les quatorze DELs émettent dans des cônes de rayonnement différents, d`où la forte sensibilité de l'uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire à la position de chaque DEL sur le support. Aussi, les DELs sont fixées sur le bouchon en plastique de telle sorte que tous les axes de leurs diagrammes de rayonnement concourent au centre du fond de la sphère intégratrice situé à environ 8.5 cm; si toutes les DELs avaient des cônes de rayonnement identiques, l'uniformité spatiale de l'irradiance serait optimale sur une surface test distante de 8.5 cm du simulateur solaire D_{65}, ce qui simplifierait fortement la caractérisation du point de vue spectral. Un choix rigoureux du profil des diagrammes de rayonnement des différentes DELs composant le simulateur D_{65} pourrait être un moyen efficace pour l'amélioration de ses performances.

ANNEXE I

SPÉCIFICITÉS DES ILLUMINANTS FLUORESCENTS STANDARDS

Tableau-A I-1 Illuminants fluorescents standards

Illuminant CIE	Coordonnée x	Coordonnée y	Température couleur (K)	IRC	dénomination usuelle
F1	0,3131	0,3371	6430	76	*Daylight*
F2	0,3721	0,3751	4230	64	*Cool White*
F3	0,4091	0,3941	3450	57	*White*
F4	0,4402	0,4031	2940	51	*Warm White*
F5	0,3138	0,3452	6350	72	*Daylight*
F6	0,3779	0,3882	4150	59	*Lite White*

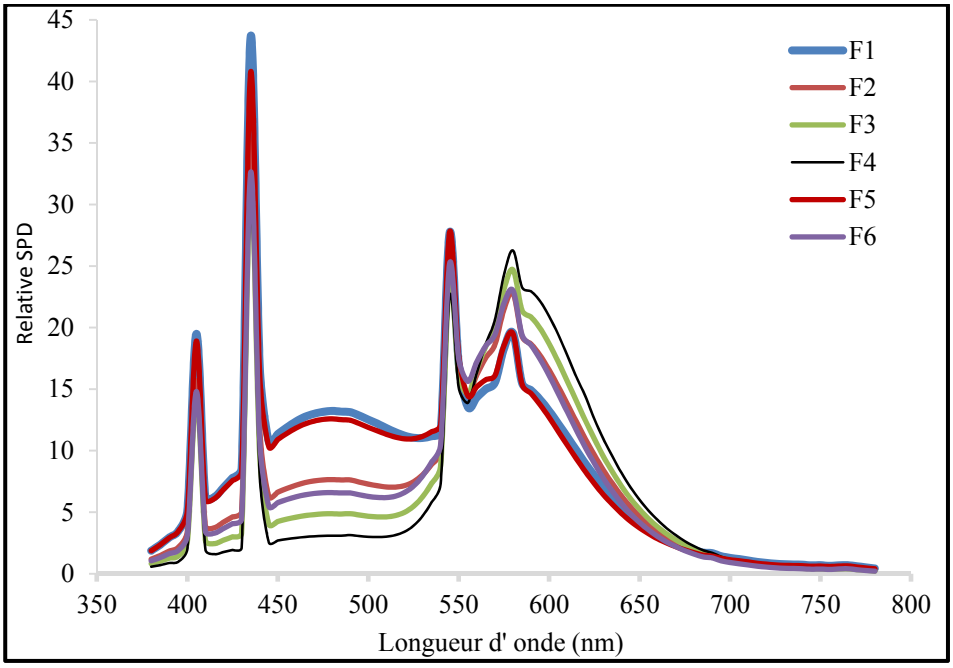


Figure-A I-1 Spectres des illuminants fluorescents standards

Tableau-A I-2 Illuminants fluorescents à large bande

Illuminant CIE	Coordonnée x	Coordonnée y	Température couleur (K)	IRC	dénomination usuelle
F7	0,3129	0,3292	6500	90	D65 *Daylight*
F8	0,3458	0,3586	5000	95	D50 Sylvania F40 *design* 50
F9	0,3741	0,3727	4150	90	*Cool White Deluxe*

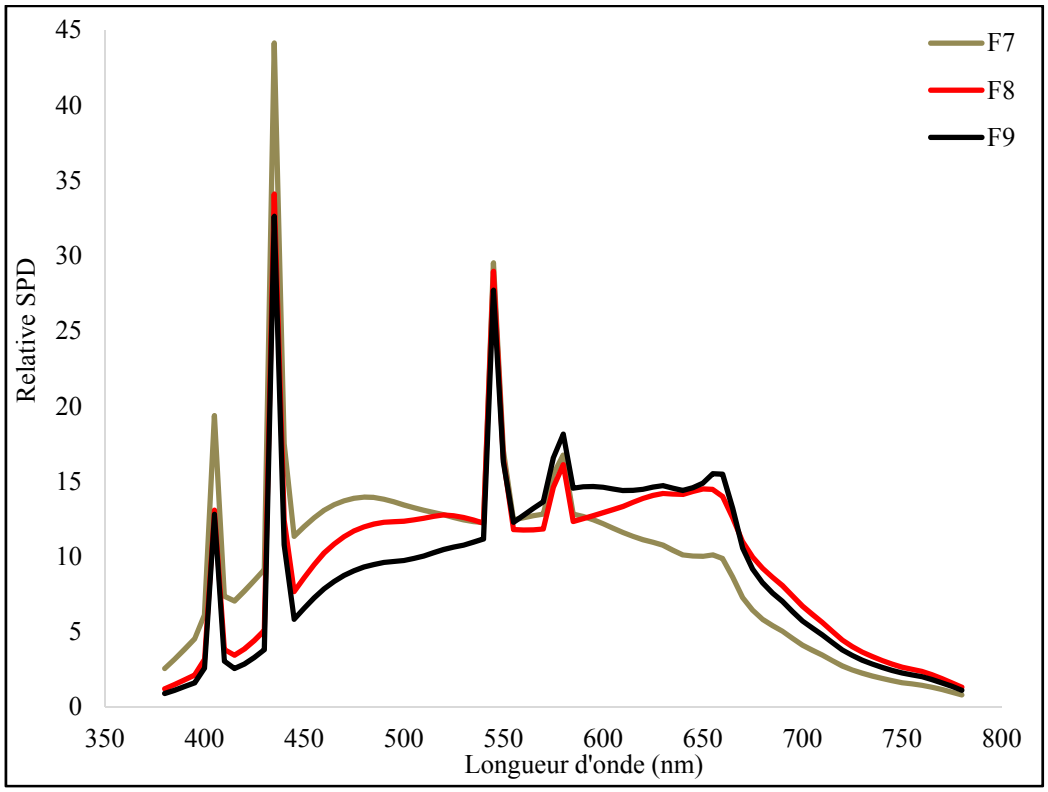


Figure-A I-2 Spectres des illuminants fluorescents à bande large

Tableau-A I-3 Illuminants fluorescents à bande étroite

Illuminant CIE	Coordonnée x	Coordonnée y	Température couleur (K)	IRC	dénomination usuelle
F10	0,3458	0,3588	5000	81	TL85 Ultralume 50
F11	0,3805	0,3769	4000	83	TL84 SP41 Ultralume 40
F12	0,4370	0,4042	3000	83	TL83 Ultralume 30

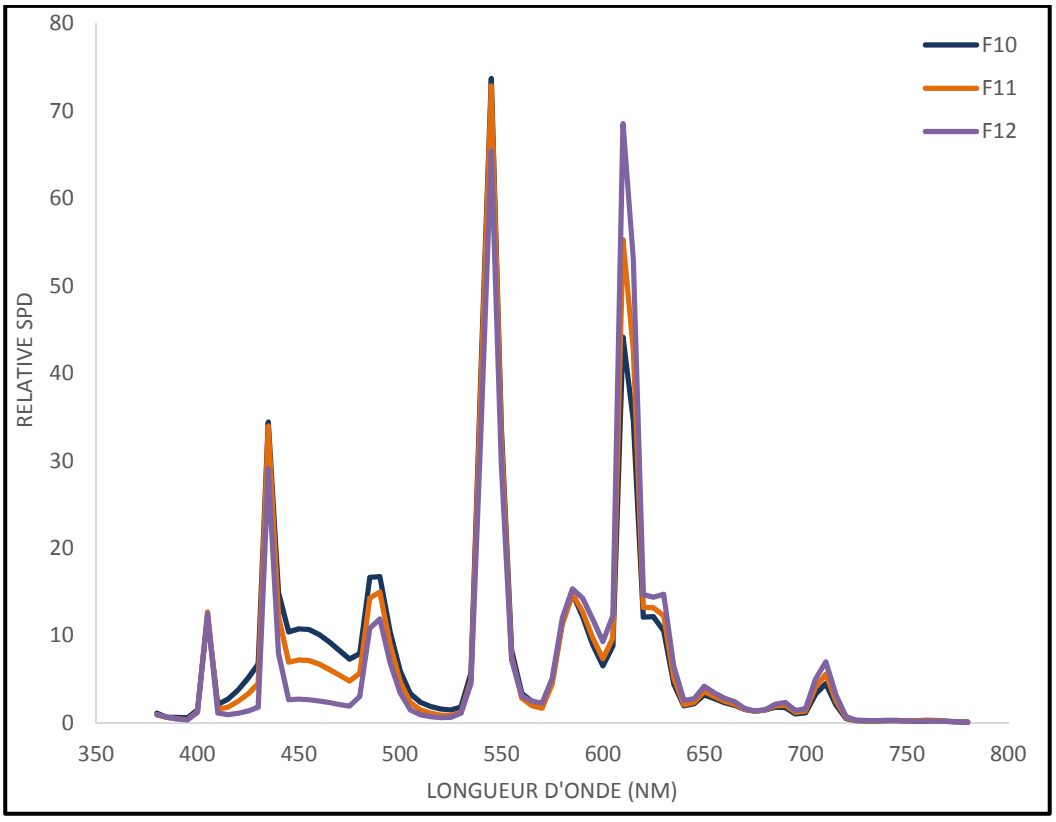


Figure-A I-3 Spectres des illuminants fluorescents à bande étroite

ANNEXE II

LOWESS SMOOTHED $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ AND $S_2(\lambda)$ EIGENVECTOR

Wavelength / nm	$S_{0,s}(\lambda)$	$S_{1,s}(\lambda)$	$S_{2,s}(\lambda)$
300	0,914218	0,348648	0,310987
301	2,499837	1,640810	0,588797
302	4,066354	2,913151	0,860926
303	5,613333	4,165049	1,127100
304	7,140340	5,395878	1,387041
305	8,646938	6,605017	1,640475
306	10,132690	7,791841	1,887125
307	11,597170	8,955728	2,126716
308	13,039930	10,096050	2,358970
309	14,460530	11,212190	2,583612
310	15,858560	12,303530	2,800366
311	17,236210	13,373980	3,011224
312	18,595840	14,427300	3,217988
313	19,937160	15,462600	3,420096
314	21,259900	16,479000	3,616987
315	22,563800	17,475610	3,808101
316	23,848580	18,451550	3,992875
317	25,113970	19,405930	4,170750
318	26,359700	20,337870	4,341163
319	27.585490	21,246470	4,503555
320	28,791080	22,130860	4,657362
321	29,978260	22,995440	4,805441
322	31,148920	23,844580	4,950487
323	32,302930	24,677310	5,091705
324	33,440170	25,492700	5,228296
325	34,560510	26,289800	5,359465
326	35,663810	27,067640	5,484414
327	36,749960	27,825300	5,602348
328	37,818820	28,561810	5,712468
329	38,870260	29,276220	5,813979
330	39,904160	29,967590	5,906083
331	40,922530	30,641390	5,993827
332	41,927160	31,302730	6,081620
333	42,917610	31,950120	6,167707
334	43,893450	32,582060	6,250334
335	44,854230	33,197070	6,327748
336	45,799530	33,793650	6,398194
337	46,728890	34,370300	6,459918
338	47,641880	34,925550	6,511166
339	48,538050	35,457890	6,550185
340	49,416990	35,965840	6,575220

Wavelength / nm	$S_{0,S}(\lambda)$	$S_{1,S}(\lambda)$	$S_{2,S}(\lambda)$
341	50,283680	36,459530	6,592172
342	51,141950	36,947510	6,608006
343	51,989550	37,425930	6,622567
344	52,824230	37,890920	6,635695
345	53,643720	38,338640	6,647236
346	54,445800	38,765230	6,657030
347	55,228190	39,166840	6,664921
348	55,988670	39,539600	6,670752
349	56,724970	39,879660	6,674366
350	57,434840	40,183160	6,675606
351	58,136650	40,473080	6,667687
352	58,844030	40,769190	6,645094
353	59,547630	41,062830	6,609578
354	60,238110	41,345380	6,562885
355	60,906120	41,608180	6,506767
356	61,542330	41,842580	6,442970
357	62,137390	42,039940	6,373244
358	62,681950	42,191620	6,299337
359	63,166680	42,288960	6,222999
360	63,582230	42,323330	6,145978
361	63,932490	42,298560	6,058499
362	64,235180	42,230550	5,951588
363	64,501670	42,128730	5,828196
364	64,743340	42,002560	5,691272
365	64,971580	41,861480	5,543767
366	65,197770	41,714940	5,388630
367	65,433290	41,572380	5,228810
368	65,689530	41,443250	5,067260
369	65,977850	41,337000	4,906927
370	66,309650	41,263060	4,750762
371	66,690330	41,208510	4,593285
372	67,114480	41,154880	4,428262
373	67,577220	41,103290	4,257513
374	68,073720	41,054090	4,082856
375	68,599100	41,010820	3,906112
376	69,148530	40,972220	3,729100
377	69,717130	40,940210	3,553639
378	70,300060	40,915930	3,381550
379	70,892460	40,900540	3,214650
380	71,489480	40,895150	3,054760
381	72,105000	40,907560	2,900089
382	72,753070	40,942200	2,747662
383	73,429070	40,995240	2,597524

Wavelength / nm	$S_{0,S}(\lambda)$	$S_{1,S}(\lambda)$	$S_{2,S}(\lambda)$
384	74,128360	41,062810	2,449719
385	74,846300	41,141070	2,304291
386	75,578260	41,226160	2,161284
387	76,319610	41,314230	2,020744
388	77,065720	41,401420	1,882714
389	77,811950	41,483890	1,747239
390	78,553670	41,557770	1,614364
391	79,295320	41,629250	1,483952
392	80,044310	41,705750	1,355796
393	80,800440	41,785310	1,229826
394	81,563530	41,865950	1,105978
395	82,333380	41,945730	0,984181
396	83,109790	42,022660	0,864371
397	83,892580	42,094800	0,746478
398	84,681550	42,160170	0,630436
399	85,476510	42,216810	0,516178
400	86,277270	42,262750	0,403635
401	87,086070	42,302910	0,292077
402	87,904470	42,342850	0,181106
403	88,731270	42,381650	0,071158
404	89,565240	42,418350	-0,037330
405	90,405180	42,452000	-0,143920
406	91,249860	42,481660	-0,248190
407	92,098090	42,506370	-0,349690
408	92,948650	42,525200	-0,447980
409	93,800320	42,537190	-0,542640
410	94,651890	42,541390	-0,633220
411	95,511020	42,537510	-0,721090
412	96,383270	42,526320	-0,807620
413	97,264210	42,508510	-0,892410
414	98,149440	42,484760	-0,975060
415	99,034550	42,455760	-1,055180
416	99,915140	42,422190	-1,132350
417	100,786800	42,384730	-1,206190
418	101,645100	42,344070	-1,276290
419	102,485700	42,300900	-1,342260
420	103,304100	42,255900	-1,403680
421	104,112700	42,200770	-1,461200
422	104,923200	42,127910	-1,515880
423	105,730300	42,039040	-1,567980
424	106,528800	41,935860	-1,617750
425	107,313500	41,820090	-1,665460
426	108,079100	41,693450	-1,711360

Wavelength / nm	$S_{0,S}(\lambda)$	$S_{1,S}(\lambda)$	$S_{2,S}(\lambda)$
427	108,820300	41,557630	-1,755710
428	109,532000	41,414360	-1,798770
429	110,208900	41,265350	-1,840800
430	110,845700	41,112310	-1,882050
431	111,453600	40,945490	-1,922220
432	112,046200	40,755770	-1,960950
433	112,621800	40,545800	-1,998410
434	113,178800	40,318240	-2,034780
435	113,715600	40,075760	-2,070240
436	114,230500	39,821000	-2,104970
437	114,721800	39,556640	-2,139130
438	115,188000	39,285320	-2,172910
439	115,627400	39,009720	-2,206480
440	116,038300	38,732470	-2,240020
441	116,424600	38,445430	-2,273910
442	116,792100	38,140610	-2,308220
443	117,142400	37,820950	-2,342590
444	117,477000	37,489380	-2,376690
445	117,797400	37,148840	-2,410160
446	118,105200	36,802270	-2,442680
447	118,401900	36,452600	-2,473890
448	118,689100	36,102770	-2,503450
449	118,968100	35,755710	-2,531020
450	119,240700	35,414370	-2,556260
451	119,513300	35,075540	-2,581070
452	119,788500	34,734410	-2,607000
453	120,062100	34,391460	-2,633150
454	120,329800	34,047170	-2,658670
455	120,587300	33,702010	-2,682660
456	120,830300	33,356480	-2,704260
457	121,054500	33,011060	-2,722590
458	121,255700	32,666220	-2,736760
459	121,429500	32,322450	-2,745910
460	121,571700	31,980230	-2,749150
461	121,696800	31,640840	-2,748420
462	121,820500	31,304500	-2,746310
463	121,939800	30,970080	-2,742920
464	122,052200	30,636450	-2,738370
465	122,154800	30,302490	-2,732770
466	122,244900	29,967080	-2,726230
467	122,319800	29,629090	-2,718880
468	122,376600	29,287400	-2,710810
469	122,412800	28,940890	-2,702150

Wavelength / nm	$S_{0,s}(\lambda)$	$S_{1,s}(\lambda)$	$S_{2,s}(\lambda)$
470	122,425400	28,588420	-2,693000
471	122,399000	28,230890	-2,680430
472	122,324000	27,869880	-2,662040
473	122,206900	27,505290	-2,638730
474	122,054000	27,137070	-2,611390
475	121,871800	26,765120	-2,580930
476	121,666700	26,389370	-2,548240
477	121,445100	26,009740	-2,514230
478	121,213500	25,626150	-2,479800
479	120,978200	25,238520	-2,445840
480	120,745600	24,846770	-2,413260
481	120,491700	24,448610	-2,380690
482	120,193400	24,042750	-2,346400
483	119,858500	23,630630	-2,310730
484	119,494800	23,213650	-2,274000
485	119,110200	22,793260	-2,236560
486	118,712500	22,370870	-2,198740
487	118,309400	21,947910	-2,160870
488	117,909000	21,525810	-2,123300
489	117,518800	21,105990	-2,086360
490	117,146900	20,689880	-2,050390
491	116,781300	20,274660	-2,015020
492	116,407100	19,857270	-1,979700
493	116,028000	19,438810	-1,944480
494	115,647700	19,020360	-1,909420
495	115,269700	18,603020	-1,874570
496	114,897700	18,187860	-1,839970
497	114,535300	17,775990	-1,805690
498	114,186100	17,368490	-1,771770
499	113,853700	16,966450	-1,738270
500	113,541800	16,570960	-1,705240
501	113,246100	16,180560	-1,672640
502	112,959600	15,793250	-1,640400
503	112,682100	15,409260	-1,608490
504	112,413300	15,028830	-1,576910
505	112,152800	14,652190	-1,545620
506	111,900500	14,279580	-1,514620
507	111,655900	13,911230	-1,483890
508	111,418900	13,547390	-1,453400
509	111,189100	13,188280	-1,423140
510	110,966200	12,834140	-1,393090
511	110,751300	12,484560	-1,363130
512	110,544800	12,138920	-1,333190

Wavelength / nm	$S_{0,s}(\lambda)$	$S_{1,s}(\lambda)$	$S_{2,s}(\lambda)$
513	110,345500	11,797240	-1,303360
514	110,152200	11,459480	-1,273730
515	109,963900	11,125640	-1,244400
516	109,779200	10,795720	-1,215450
517	109,597000	10,469690	-1,186980
518	109,416100	10,147540	-1,159070
519	109,235400	9,829260	-1,131800
520	109,053700	9,514840	-1,105280
521	108,873100	9,203850	-1,079320
522	108,695900	8,895950	-1,053700
523	108,521400	8,591300	-1,028470
524	108,348700	8,290050	-1,003660
525	108,177100	7,992370	-0,979320
526	108,005700	7,698410	-0,955500
527	107,833800	7,408310	-0,932230
528	107,660500	7,122250	-0,909570
529	107,485100	6,840370	-0,887540
530	107,306600	6,562830	-0,866210
531	107,127500	6,288770	-0,845820
532	106,949800	6,017440	-0,826460
533	106,772400	5,749160	-0,807870
534	106,594100	5,484250	-0,789820
535	106,414000	5,223020	-0,772070
536	106,230900	4,965800	-0,754380
537	106,043800	4,712910	-0,736500
538	105,851500	4,464650	-0,718190
539	105,653100	4,221360	-0,699210
540	105,447300	3,983350	-0,679320
541	105,233600	3,749890	-0,658960
542	105,012300	3,520100	-0,638600
543	104,784100	3,294030	-0,618060
544	104,549500	3,071750	-0,597170
545	104,309200	2,853300	-0,575740
546	104,063600	2,638760	-0,553590
547	103,813500	2,428190	-0,530540
548	103,559400	2,221640	-0,506400
549	103,301900	2,019170	-0,481010
550	103,041600	1,820860	-0,454180
551	102,775700	1,626720	-0,425680
552	102,501900	1,436550	-0,395440
553	102,221500	1,250080	-0,363520
554	101,935600	1,067020	-0,329970
555	101,645600	0,887110	-0,294830

Wavelength / nm	$S_{0,s}(\lambda)$	$S_{1,s}(\lambda)$	$S_{2,s}(\lambda)$
556	101,352700	0,710010	-0,258160
557	101,058100	0,535600	-0,219990
558	100,763000	0,363400	-0,180400
559	100,468800	0,193340	-0,139420
560	100,176500	0,024980	-0,097100
561	99,883800	-0,140920	-0,052680
562	99,587880	-0,303760	-0,005530
563	99,289760	-0,463960	0,044130
564	98,990430	-0,621910	0,096058
565	98,690860	-0,778040	0,150027
566	98,392060	-0,932740	0,205802
567	98,095000	-1,086440	0,263154
568	97,800670	-1,239540	0,321849
569	97,510070	-1,392450	0,381656
570	97,224170	-1,545590	0,442342
571	96,940840	-1,698490	0,504683
572	96,657810	-1,850510	0,569445
573	96,375900	-2,001710	0,636386
574	96,095940	-2,152180	0,705260
575	95,818740	-2,302010	0,775823
576	95,545120	-2,451280	0,847831
577	95,275900	-2,600050	0,921039
578	95,011900	-2,748430	0,995205
579	94,753950	-2,896490	1,070082
580	94,502850	-3,044310	1,145428
581	94,257320	-3,191890	1,221681
582	94,015590	-3,339120	1,299375
583	93,777810	-3,485980	1,378408
584	93,544110	-3,632430	1,458678
585	93,314620	-3,778450	1,540084
586	93,089480	-3,923990	1,622524
587	92,868820	-4,069030	1,705895
588	92,652780	-4,213530	1,790097
589	92,441490	-4,357470	1,875026
590	92,235100	-4,500790	1,960582
591	92,033680	-4,643730	2,047163
592	91,836960	-4,786430	2,135119
593	91,644520	-4,928780	2,224272
594	91,455970	-5,070660	2,314445
595	91,270870	-5,211960	2,405460
596	91,088810	-5,352550	2,497140
597	90,909400	-5,492320	2,589307
598	90,732200	-5,631160	2,681785

Wavelength / nm	$S_{0,s}(\lambda)$	$S_{1,s}(\lambda)$	$S_{2,s}(\lambda)$
599	90,556810	-5,768940	2,774396
600	90,382810	-5,905550	2,866963
601	90,210790	-6,041180	2,959838
602	90,041420	-6,176080	3,053408
603	89,874470	-6,310200	3,147538
604	89,709670	-6,443500	3,242097
605	89,546790	-6,575920	3,336953
606	89,385560	-6,707420	3,431973
607	89,225740	-6,837950	3,527025
608	89,067080	-6,967470	3,621977
609	88,909330	-7,095940	3,716696
610	88,752240	-7,223300	3,811051
611	88,594730	-7,349280	3,905003
612	88,436460	-7,473800	3,998669
613	88,278250	-7,597080	4,092148
614	88,120910	-7,719370	4,185538
615	87,965270	-7,840880	4,278938
616	87,812150	-7,961860	4,372446
617	87,662380	-8,082530	4,466163
618	87,516760	-8,203120	4,560186
619	87,376130	-8,323860	4,654614
620	87,241300	-8,445000	4,749546
621	87,110840	-8,566470	4,844806
622	86,982880	-8,688020	4,940195
623	86,857650	-8,809540	5,035777
624	86,735360	-8,930950	5,131620
625	86,616200	-9,052140	5,227787
626	86,500390	-9,173010	5,324346
627	86,388150	-9,293480	5,421361
628	86,279680	-9,413450	5,518899
629	86,175190	-9,532810	5,617024
630	86,074890	-9,651470	5,715802
631	85,980380	-9,770400	5,815548
632	85,892130	-9,890210	5,916373
633	85,808600	-10,010300	6,018041
634	85,728260	-10,130200	6,120315
635	85,649590	-10,249200	6,222957
636	85,571070	-10,366800	6,325732
637	85,491170	-10,482400	6,428402
638	85,408360	-10,595500	6,530729
639	85,321130	-10,705400	6,632478
640	85,227930	-10,811600	6,733411
641	85,129110	-10,914900	6,834096

Wavelength / nm	$S_{0,S}(\lambda)$	$S_{1,S}(\lambda)$	$S_{2,S}(\lambda)$
642	85,026270	-11,016600	6,935096
643	84,919750	-11,116400	7,036165
644	84,809920	-11,214300	7,137060
645	84,697150	-11,310200	7,237535
646	84,581790	-11,404000	7,337346
647	84,464210	-11,495600	7,436249
648	84,344770	-11,585000	7,533999
649	84,223840	-11,672000	7,630350
650	84,101770	-11,756500	7,725059
651	83,977200	-11,838900	7,819140
652	83,848910	-11,919800	7,913432
653	83,717490	-11,999000	8,007433
654	83,583510	-12,076400	8,100639
655	83,447560	-12,152100	8,192549
656	83,310210	-12,225800	8,282659
657	83,172050	-12,297500	8,370465
658	83,033660	-12,367200	8,455465
659	82,895610	-12,434700	8,537155
660	82,758490	-12,500000	8,615033
661	82,624050	-12,564500	8,691514
662	82,492630	-12,629200	8,768613
663	82,362760	-12,693400	8,845227
664	82,232950	-12,756300	8,920251
665	82,101710	-12,817100	8,992582
666	81,967540	-12,875100	9,061116
667	81,828960	-12,929600	9,124749
668	81,684470	-12,979700	9,182378
669	81,532600	-13,024800	9,232899
670	81,371850	-13,064100	9,275208
671	81,200790	-13,100800	9,313278
672	81,019580	-13,138000	9,351212
673	80,829140	-13,174700	9,388098
674	80,630380	-13,209700	9,423024
675	80,424200	-13,242200	9,455079
676	80,211510	-13,271100	9,483349
677	79,993220	-13,295300	9,506925
678	79,770250	-13,313900	9,524893
679	79,543500	-13,325800	9,536343
680	79,313870	-13,330000	9,540362
681	79,074190	-13,329200	9,538324
682	78,819210	-13,327100	9,532508
683	78,552760	-13,323600	9,523363
684	78,278660	-13,319000	9,511338

Wavelength / nm	$S_{0,s}(\lambda)$	$S_{1,s}(\lambda)$	$S_{2,s}(\lambda)$
685	78,000740	-13,313400	9,496882
686	77,722830	-13,306800	9,480444
687	77,448750	-13,299500	9,462472
688	77,182330	-13,291500	9,443417
689	76,927390	-13,283000	9,423725
690	76,687760	-13,274000	9,403848
691	76,458540	-13,262500	9,381364
692	76,232740	-13,246700	9,354012
693	76,011020	-13,227000	9,322478
694	75,794090	-13,204100	9,287445
695	75,582600	-13,178500	9,249600
696	75,377240	-13,150800	9,209628
697	75,178690	-13,121600	9,168214
698	74,987630	-13,091400	9,126043
699	74,804740	-13,060800	9,083800
700	74,630700	-13,030300	9,042170
701	74,467710	-12,999000	9,000154
702	74,315800	-12,965400	8,956417
703	74,172400	-12,929700	8,911141
704	74,034950	-12,892100	8,864508
705	73,900860	-12,852700	8,816700
706	73,767570	-12,811700	8,767900
707	73,632500	-12,769200	8,718290
708	73,493080	-12,725300	8,668051
709	73,346750	-12,680300	8,617367
710	73,190920	-12,634200	8,566419
711	73,026830	-12,586000	8,514441
712	72,857620	-12,534600	8,460795
713	72,683570	-12,480600	8,405854
714	72,504960	-12,424500	8,349992
715	72,322100	-12,366700	8,293583
716	72,135260	-12,307800	8,237001
717	71,944740	-12,248200	8,180619
718	71,750820	-12,188500	8,124813
719	71,553790	-12,129100	8,069954
720	71,353940	-12,070600	8,016418
721	71,148510	-12,012000	7,963455
722	70,935520	-11,952300	7,910253
723	70,716400	-11,891900	7,857093
724	70,492570	-11,831100	7,804255
725	70,265460	-11,770100	7,752017
726	70,036510	-11,709300	7,700661
727	69,807150	-11,649100	7,650465

Wavelength / nm	$S_{0,S}(\lambda)$	$S_{1,S}(\lambda)$	$S_{2,S}(\lambda)$
728	69,578800	-11,589600	7,601709
729	69,352890	-11,531300	7,554674
730	69,130860	-11,474400	7,509639
731	68,908510	-11,418000	7,465744
732	68,682020	-11,361100	7,422152
733	68,453390	-11,304200	7,379175
734	68,224630	-11,247800	7,337125
735	67,997720	-11,192400	7,296314
736	67,774660	-11,138300	7,257055
737	67,557450	-11,086200	7,219659
738	67,348090	-11,036400	7,184439
739	67,148580	-10,989500	7,151706
740	66,960900	-10,945800	7,121774
741	66,781270	-10,904100	7,093453
742	66,605040	-10,863000	7,065563
743	66,432970	-10,822800	7,038434
744	66,265790	-10,784000	7,012395
745	66,104250	-10,746800	6,987772
746	65,949090	-10,711700	6,964895
747	65,801050	-10,679100	6,944092
748	65,660880	-10,649300	6,925691
749	65,529310	-10,622600	6,910021
750	65,407090	-10,599600	6,897409
751	65,295100	-10,579700	6,887301
752	65,192420	-10,562100	6,878702
753	65,097030	-10,546300	6,871284
754	65,006920	-10,531800	6,864718
755	64,920100	-10,518200	6,858674
756	64,834550	-10,505100	6,852824
757	64,748270	-10,491800	6,846840
758	64,659260	-10,478100	6,840392
759	64,565500	-10,463300	6,833151
760	64,464990	-10,447100	6,824790
761	64,358510	-10,429700	6,815316
762	64,248440	-10,411800	6,805027
763	64,135210	-10,393300	6,794022
764	64,019270	-10,374400	6,782401
765	63,901030	-10,355000	6,770265
766	63,780940	-10,335200	6,757713
767	63,659420	-10,315000	6,744847
768	63,536910	-10,294500	6,731765
769	63,413840	-10,273800	6,718568
770	63,290640	-10,252800	6,705357

Wavelength / nm	$S_{0,s}(\lambda)$	$S_{1,s}(\lambda)$	$S_{2,s}(\lambda)$
771	63,164480	-10,231000	6,691683
772	63,033330	-10,208100	6,677182
773	62,898790	-10,184300	6,662076
774	62,762450	-10,160100	6,646590
775	62,625940	-10,135600	6,630946
776	62,490850	-10,111300	6,615369
777	62,358780	-10,087500	6,600082
778	62,231340	-10,064400	6,585309
779	62,110140	-10,042500	6,571273
780	61,996780	-10,021900	6,558197
781	61,889040	-10,002400	6,545805
782	61,783790	-9,983250	6,533685
783	61,681220	-9,964600	6,521860
784	61,581570	-9,946440	6,510353
785	61,485030	-9,928790	6,499186
786	61,391820	-9,911700	6,488381
787	61,302150	-9,895170	6,477962
788	61,216240	-9,879250	6,467951
789	61,134300	-9,863950	6,458370
790	61,056540	-9,849320	6,449243
791	60,982070	-9,835230	6,440488
792	60,909910	-9,821580	6,432008
793	60,840120	-9,808350	6,423804
794	60,772800	-9,795550	6,415876
795	60,707990	-9,783150	6,408224
796	60,645790	-9,771170	6,400849
797	60,586250	-9,759600	6,393751
798	60,529460	-9,748420	6,386930
799	60,475490	-9,737640	6,380386
800	60,424410	-9,727260	6,374120
801	60,375460	-9,717200	6,368082
802	60,327960	-9,707440	6,362224
803	60,282030	-9,697950	6,356550
804	60,237820	-9,688760	6,351065
805	60,195450	-9,679860	6,345775
806	60,155060	-9,671250	6,340682
807	60,116800	-9,662930	6,335793
808	60,080790	-9,654900	6,331112
809	60,047170	-9,647170	6,326643
810	60,016090	-9,639740	6,322392
811	59,986300	-9,632520	6,318280
812	59,956760	-9,625430	6,314245
813	59,927920	-9,618520	6,310313

Wavelength / nm	$S_{0,s}(\lambda)$	$S_{1,s}(\lambda)$	$S_{2,s}(\lambda)$
814	59,900210	-9,611810	6,306510
815	59,874050	-9,605320	6,302863
816	59,849880	-9,599090	6,299396
817	59,828130	-9,593160	6,296136
818	59,809240	-9,587540	6,293110
819	59,793640	-9,582270	6,290342
820	59,781760	-9,577380	6,287860
821	59,772010	-9,572760	6,285561
822	59,762620	-9,568280	6,283338
823	59,753740	-9,563960	6,281207
824	59,745530	-9,559830	6,279186
825	59,738150	-9,555890	6,277289
826	59,731750	-9,552160	6,275535
827	59,726510	-9,548680	6,273939
828	59,722560	-9,545450	6,272517
829	59,720080	-9,542490	6,271287
830	59,719220	-9,539820	6,270266

ANNEXE III

LOWESS SMOOTHED D_{50}, D_{60}, D_{65}, D_{70}, D_{75}, ID_{50} AND ID_{65} SPECTRA

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
300	0,658975	0,573493	0,560155	0,590946	0,648186	0,721014	0	0
301	1,008442	1,091483	1,308050	1,598161	1,925757	2,269781	0	0
302	1,357554	1,607348	2,050708	2,596351	3,190208	3,801234	0	0
303	1,706310	2,121072	2,788066	3,585372	4,441293	5,315014	0	0
304	2,054709	2,632642	3,520062	4,565081	5,678768	6,810762	0	0
305	2,402750	3,142044	4,246633	5,535334	6,902387	8,288118	0	0
306	2,750434	3,649264	4,967717	6,495989	8,111906	9,746722	0	0
307	3,097759	4,154288	5,683251	7,446902	9,307079	11,18622	0	0
308	3,444725	4,657101	6,393173	8,387931	10,48766	12,60624	0	0
309	3,791332	5,157690	7,097421	9,318932	11,65341	14,00644	0	0
310	4,137579	5,656040	7,795933	10,23976	12,80407	15,38645	0	0
311	4,483201	6,151879	8,488647	11,15080	13,94063	16,74793	0	0
312	4,828053	6,645089	9,175687	12,05261	15,06423	18,09271	0	0
313	5,172312	7,135892	9,857266	12,94535	16,17492	19,42068	0	0
314	5,516158	7,624510	10,53360	13,82916	17,27272	20,73174	0	0,370920
315	5,859767	8,111163	11,20490	14,70418	18,35767	22,02577	0,011169	0,776641
316	6,203317	8,596072	11,87138	15,57056	19,42979	23,30266	0,164514	1,195621
317	6,546986	9,079460	12,53326	16,42845	20,48913	24,56230	0,325959	1,626302
318	6,890952	9,561548	13,19074	17,27799	21,53571	25,80459	0,493443	2,067123
319	7,235393	10,04256	13,84405	18,11932	22,56957	27,02941	0,664906	2,516527
320	7,580486	10,52271	14,49340	18,95259	23,59074	28,23665	0,838290	2,972953
321	7,925766	11,00142	15,13829	19,77768	24,59964	29,42744	1,019100	3,440874
322	8,270789	11,47815	15,77831	20,59453	25,59680	30,60300	1,213475	3,925105
323	8,615769	11,95318	16,41375	21,40340	26,58239	31,76336	1,420305	4,424607
324	8,960916	12,42677	17,04491	22,20456	27,55659	32,90857	1,638483	4,938338
325	9,306445	12,89922	17,67210	22,99827	28,51955	34,03868	1,866899	5,465257
326	9,652567	13,37079	18,29562	23,78479	29,47147	35,15373	2,104445	6,004324
327	9,999495	13,84176	18,91576	24,56439	30,41250	36,25377	2,350012	6,554497
328	10,34744	14,31241	19,53284	25,33733	31,34283	37,33883	2,602490	7,114737
329	10,69662	14,78302	20,14715	26,10386	32,26261	38,40898	2,860772	7,684002
330	11,04724	15,25386	20,75899	26,86427	33,17203	39,46424	3,123748	8,261251
331	11,39894	15,72444	21,36794	27,61846	34,07160	40,50589	3,394758	8,849343
332	11,75129	16,19420	21,97348	28,36624	34,96167	41,53499	3,677420	9,451452
333	12,10443	16,66332	22,57579	29,10770	35,84218	42,55131	3,971043	10,06701
334	12,45851	17,13198	23,17502	29,84294	36,71309	43,55460	4,274938	10,69544
335	12,81364	17,60034	23,77136	30,57205	37,57435	44,54462	4,588413	11,33618
336	13,16998	18,06858	24,36496	31,29510	38,42590	45,52113	4,910780	11,98866
337	13,52766	18,53687	24,95599	32,01220	39,26768	46,48388	5,241347	12,65230
338	13,88681	19,00539	25,54463	32,72343	40,09966	47,43262	5,579424	13,32655
339	14,24757	19,47430	26,13104	33,42889	40,92176	48,36713	5,924322	14,01082
340	14,61007	19,94379	26,71538	34,12866	41,73395	49,28715	6,275349	14,70456

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
341	14,97466	20,41431	27,29850	34,82433	42,53890	50,19669	6,634688	15,40902
342	15,34141	20,88592	27,88071	35,51681	43,33839	51,09866	7,004747	16,12595
343	15,71001	21,35823	28,46139	36,20513	44,13101	51,99111	7,385179	16,85547
344	16,08020	21,83084	29,03992	36,88834	44,91537	52,87213	7,775635	17,59770
345	16,45169	22,30336	29,61568	37,56547	45,69005	53,73978	8,175766	18,35278
346	16,82419	22,77538	30,18806	38,23556	46,45366	54,59215	8,585224	19,12084
347	17,19742	23,24651	30,75643	38,89765	47,20479	55,42731	9,003660	19,90200
348	17,57109	23,71635	31,32018	39,55079	47,94203	56,24332	9,430727	20,69639
349	17,94493	24,18449	31,87870	40,19402	48,66398	57,03827	9,866075	21,50413
350	18,31865	24,65055	32,43135	40,82637	49,36924	57,81022	10,30936	22,32537
351	18,69472	25,11797	32,98336	41,45570	50,06911	58,57462	10,76233	23,16084
352	19,07483	25,58907	33,53834	42,08762	50,77181	59,34284	11,22682	24,01141
353	19,45747	26,06180	34,09326	42,71775	51,47131	60,10686	11,70254	24,87731
354	19,84117	26,53408	34,64510	43,34175	52,16158	60,85868	12,18922	25,75882
355	20,22441	27,00385	35,19084	43,95526	52,83656	61,59028	12,68659	26,65618
356	20,60572	27,46906	35,72745	44,55391	53,49024	62,29365	13,19439	27,56966
357	20,98359	27,92763	36,25191	45,13334	54,11658	62,96077	13,71233	28,49951
358	21,35654	28,37750	36,76120	45,68921	54,70954	63,58364	14,24015	29,44599
359	21,72308	28,81661	37,25229	46,21715	55,26308	64,15424	14,77757	30,40937
360	22,08171	29,24290	37,72217	46,71281	55,77117	64,66455	15,32432	31,38989
361	22,42623	29,64862	38,16224	47,16803	56,22760	65,11186	15,88297	32,39578
362	22,75485	30,03188	38,57161	47,58435	56,63792	65,50726	16,45569	33,43207
363	23,07271	30,39944	38,95881	47,97197	57,01374	65,86349	17,04167	34,49426
364	23,38492	30,75803	39,33235	48,34108	57,36667	66,19325	17,64009	35,57783
365	23,69661	31,11438	39,70075	48,70185	57,70832	66,50925	18,25013	36,67825
366	24,01292	31,47524	40,07252	49,06448	58,05029	66,82423	18,87097	37,79101
367	24,33896	31,84734	40,45619	49,43916	58,40419	67,15089	19,50178	38,91160
368	24,67986	32,23743	40,86026	49,83607	58,78164	67,50194	20,14176	40,03549
369	25,04074	32,65224	41,29325	50,26540	59,19423	67,89012	20,79007	41,15816
370	25,42674	33,09851	41,76369	50,73734	59,65359	68,32813	21,44590	42,27511
371	25,84187	33,58114	42,27673	51,25712	60,16511	68,82179	22,11653	43,39873
372	26,28446	34,09765	42,82857	51,81966	60,72273	69,36454	22,80722	44,54065
373	26,75115	34,64372	43,41429	52,41963	61,32084	69,95053	23,51409	45,69519
374	27,23855	35,21504	44,02898	53,05173	61,95384	70,57395	24,23325	46,85665
375	27,74329	35,80729	44,66772	53,71062	62,61613	71,22894	24,96083	48,01935
376	28,26198	36,41615	45,32559	54,39100	63,30211	71,90967	25,69296	49,17759
377	28,79126	37,03731	45,99767	55,08755	64,00617	72,61031	26,42575	50,32569
378	29,32774	37,66645	46,67904	55,79495	64,72270	73,32501	27,15531	51,45796
379	29,86805	38,29924	47,36478	56,50788	65,44611	74,04795	27,87779	52,56872
380	30,40880	38,93139	48,04998	57,22104	66,17080	74,77327	28,58928	53,65226
381	30,95507	39,56980	48,74339	57,94499	66,90916	75,51525	29,29314	54,71531
382	31,51350	40,22317	49,45546	58,69174	67,67469	76,28887	29,99524	55,76783

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
383	32,08311	40,88983	50,18376	59,45810	68,46341	77,08937	30,69554	56,80906
384	32,66289	41,56812	50,92588	60,24087	69,27135	77,91201	31,39398	57,83823
385	33,25187	42,25637	51,67941	61,03686	70,09453	78,75203	32,09051	58,85455
386	33,84903	42,95291	52,44191	61,84287	70,92899	79,60471	32,78508	59,85725
387	34,45339	43,65609	53,21098	62,65570	71,77074	80,46528	33,47765	60,84557
388	35,06396	44,36423	53,98420	63,47217	72,61582	81,32899	34,16815	61,81871
389	35,67973	45,07566	54,75914	64,28908	73,46024	82,19111	34,85655	62,77592
390	36,29972	45,78873	55,53339	65,10322	74,30004	83,04688	35,54278	63,71641
391	36,92368	46,50375	56,30817	65,91684	75,13849	83,90064	36,22273	64,63600
392	37,55267	47,22274	57,08671	66,73452	75,98159	84,75980	36,89417	65,53362
393	38,18767	47,94654	57,86968	67,55667	76,82946	85,62420	37,55990	66,41318
394	38,82965	48,67604	58,65772	68,38367	77,68222	86,49366	38,22271	67,27859
395	39,47958	49,41211	59,45148	69,21592	78,53997	87,36801	38,88541	68,13375
396	40,13843	50,15559	60,25163	70,05381	79,40283	88,24710	39,55078	68,98257
397	40,80718	50,90737	61,05880	70,89772	80,27091	89,13075	40,22162	69,82895
398	41,48679	51,66831	61,87365	71,74805	81,14433	90,01880	40,90072	70,67682
399	42,17825	52,43928	62,69684	72,60520	82,02320	90,91109	41,59089	71,53007
400	42,88251	53,22113	63,52901	73,46954	82,90764	91,80744	42,29491	72,39260
401	43,60126	54,01538	64,37177	74,34292	83,79974	92,71025	43,01056	73,25983
402	44,33481	54,82219	65,22550	75,22606	84,70065	93,62108	43,73390	74,12514
403	45,08213	55,64046	66,08901	76,11769	85,60901	94,53850	44,46513	74,98943
404	45,84217	56,46910	66,96111	77,01652	86,52346	95,46108	45,20446	75,85359
405	46,61390	57,30700	67,84062	77,92128	87,44263	96,38739	45,95211	76,71852
406	47,39627	58,15306	68,72633	78,83069	88,36518	97,31601	46,70829	77,58512
407	48,18825	59,00618	69,61706	79,74347	89,28974	98,24552	47,47322	78,45429
408	48,98880	59,86526	70,51163	80,65834	90,21496	99,17447	48,24709	79,32692
409	49,79687	60,72919	71,40883	81,57403	91,13948	100,1014	49,03013	80,2039
410	50,61143	61,59687	72,30748	82,48926	92,06195	101,0250	49,82254	81,08614
411	51,43898	62,47489	73,21449	83,41136	92,99016	101,9535	50,62938	81,97871
412	52,28445	63,36815	74,13499	84,34577	93,92986	102,8929	51,45347	82,88352
413	53,14445	64,27304	75,06508	85,28831	94,87662	103,8385	52,29172	83,79673
414	54,01558	65,18596	76,00091	86,23484	95,82598	104,7856	53,14099	84,71450
415	54,89446	66,10328	76,93859	87,18118	96,77350	105,7295	53,99819	85,63299
416	55,77768	67,02142	77,87423	88,12317	97,71474	106,6654	54,86019	86,54836
417	56,66186	67,93675	78,80398	89,05666	98,64524	107,5887	55,72389	87,45676
418	57,54359	68,84566	79,72394	89,97748	99,56058	108,4946	56,58616	88,35436
419	58,41949	69,74455	80,63024	90,88148	100,4563	109,3784	57,44390	89,23731
420	59,28616	70,62981	81,51900	91,76448	101,3280	110,2354	58,29400	90,10178
421	60,15083	71,50930	82,39916	92,63676	102,1873	111,0788	59,14338	90,95766
422	61,02101	72,39120	83,27988	93,50863	103,0459	111,9217	59,99913	91,81464
423	61,89380	73,27237	84,15760	94,37597	103,8990	112,7585	60,85837	92,66859
424	62,76627	74,14967	85,02876	95,23470	104,7418	113,5838	61,71818	93,51535

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
425	63,63551	75,01995	85,88981	96,08071	105,5697	114,3921	62,57569	94,35078
426	64,49859	75,88008	86,73719	96,90989	106,3779	115,1781	63,42799	95,17072
427	65,35259	76,72692	87,56734	97,71815	107,1617	115,9363	64,27220	95,97104
428	66,19459	77,55733	88,37671	98,50139	107,9163	116,6612	65,10541	96,74758
429	67,02168	78,36816	89,16174	99,25549	108,6370	117,3475	65,92473	97,49619
430	67,83093	79,15627	89,91886	99,97637	109,3190	117,9896	66,72727	98,21274
431	68,62595	79,92604	90,65380	100,6716	109,9723	118,6004	67,51624	98,90386
432	69,41209	80,68372	91,37433	101,3509	110,6091	119,1947	68,29667	99,57876
433	70,18898	81,42899	92,07999	102,0136	111,2281	119,7708	69,06840	100,2371
434	70,95631	82,16153	92,77029	102,6588	111,8280	120,3267	69,83128	100,8786
435	71,71372	82,88101	93,44478	103,2858	112,4076	120,8604	70,58515	101,5030
436	72,46087	83,58712	94,10298	103,8938	112,9656	121,3702	71,32986	102,1098
437	73,19742	84,27952	94,74443	104,4821	113,5009	121,8540	72,06526	102,6989
438	73,92304	84,95791	95,36866	105,0497	114,0121	122,3099	72,79119	103,2698
439	74,63738	85,62196	95,97519	105,5961	114,4980	122,7360	73,50750	103,8222
440	75,34010	86,27134	96,56356	106,1203	114,9573	123,1305	74,21404	104,3559
441	76,03137	86,90632	97,13448	106,6241	115,3932	123,4988	74,91050	104,8711
442	76,71196	87,52794	97,68970	107,1104	115,8105	123,8483	75,59713	105,3692
443	77,38245	88,13701	98,23028	107,5804	116,2106	124,1805	76,27459	105,8518
444	78,04338	88,73437	98,75733	108,0355	116,5948	124,4964	76,94353	106,3205
445	78,69531	89,32086	99,27191	108,4769	116,9645	124,7973	77,60460	106,7769
446	79,33880	89,89728	99,77511	108,9059	117,3209	125,0844	78,25846	107,2224
447	79,97442	90,46449	100,2680	109,3237	117,6655	125,3589	78,90576	107,6586
448	80,60271	91,02330	100,7517	109,7316	117,9994	125,6220	79,54716	108,0872
449	81,22425	91,57454	101,2273	110,1308	118,3241	125,8750	80,18331	108,5096
450	81,83958	92,11905	101,6958	110,5227	118,6409	126,1191	80,81486	108,9274
451	82,45301	92,66169	102,1627	110,9135	118,9574	126,3644	81,44593	109,3459
452	83,06655	93,20458	102,6303	111,3057	119,2768	126,6163	82,07822	109,7667
453	83,67728	93,74440	103,0948	111,6952	119,5945	126,8684	82,70883	110,1858
454	84,28229	94,27785	103,5527	112,0779	119,9056	127,1147	83,33483	110,5994
455	84,87868	94,80162	104,0001	112,4498	120,2054	127,3491	83,95330	111,0035
456	85,46353	95,31241	104,4334	112,8066	120,4891	127,5652	84,56134	111,3942
457	86,03394	95,80690	104,8490	113,1443	120,7518	127,7570	85,15601	111,7676
458	86,58699	96,28178	105,2432	113,4587	120,9887	127,9182	85,73441	112,1198
459	87,11979	96,73375	105,6123	113,7458	121,1952	128,0428	86,29360	112,4468
460	87,62942	97,15951	105,9525	114,0013	121,3664	128,1246	86,83068	112,7447
461	88,12720	97,57447	106,2863	114,2452	121,5189	128,1813	87,35655	113,0357
462	88,62336	97,99190	106,6314	114,4951	121,6703	128,2346	87,88107	113,3383
463	89,11330	98,40528	106,9778	114,7436	121,8170	128,2838	88,39972	113,6424
464	89,59245	98,80807	107,3151	114,9831	121,9557	128,3284	88,90803	113,9381
465	90,05622	99,19375	107,6331	115,2062	122,0826	128,3677	89,40148	114,2155
466	90,50004	99,55577	107,9216	115,4055	122,1944	128,4013	89,87559	114,4647

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
467	90,91931	99,88762	108,1704	115,5735	122,2874	128,4284	90,32586	114,6758
468	91,30946	100,1828	108,3693	115,7027	122,3583	128,4485	90,74778	114,8389
469	91,66590	100,4346	108,5080	115,7857	122,4034	128,4610	91,13687	114,9440
470	91,98405	100,6368	108,5764	115,8151	122,4192	128,4653	91,48863	114,9812
471	92,27765	100,8113	108,6049	115,8042	122,3937	128,4259	91,81577	114,9768
472	92,56204	100,9825	108,6309	115,7729	122,3215	128,3144	92,13269	114,9638
473	92,83503	101,1467	108,6542	115,7234	122,2086	128,1411	92,43741	114,9429
474	93,09443	101,3006	108,6748	115,6577	122,0610	127,9160	92,72796	114,9147
475	93,33806	101,4404	108,6925	115,5779	121,8850	127,6495	93,00236	114,8796
476	93,56373	101,5628	108,7072	115,4862	121,6866	127,3516	93,25862	114,8384
477	93,76925	101,6641	108,7189	115,3847	121,4719	127,0326	93,49478	114,7915
478	93,95243	101,7408	108,7273	115,2754	121,2471	126,7027	93,70886	114,7397
479	94,11108	101,7894	108,7325	115,1605	121,0182	126,3720	93,89887	114,6833
480	94,24302	101,8064	108,7342	115,0421	120,7913	126,0507	94,06284	114,6231
481	94,35387	101,7982	108,7042	114,8955	120,5420	125,7123	94,20544	114,5298
482	94,45213	101,7751	108,6205	114,7002	120,2470	125,3288	94,33411	114,3805
483	94,53992	101,7398	108,4925	114,4648	119,9143	124,9082	94,45103	114,1847
484	94,61938	101,6947	108,3297	114,1979	119,5522	124,4585	94,55839	113,9522
485	94,69263	101,6426	108,1415	113,9081	119,1685	123,9877	94,65837	113,6925
486	94,76181	101,5858	107,9374	113,6039	118,7715	123,5036	94,75316	113,4155
487	94,82903	101,5270	107,7268	113,2940	118,3691	123,0144	94,84494	113,1306
488	94,89643	101,4688	107,5192	112,9869	117,9695	122,5280	94,93590	112,8477
489	94,96613	101,4137	107,3240	112,6911	117,5807	122,0523	95,02823	112,5764
490	95,04027	101,3642	107,1507	112,4154	117,2107	121,5954	95,12410	112,3263
491	95,11489	101,3139	106,9862	112,1472	116,8475	121,1449	95,21933	112,0842
492	95,18558	101,2563	106,8134	111,8710	116,4760	120,6857	95,30937	111,8327
493	95,25381	101,1945	106,6358	111,5901	116,0998	120,2217	95,39587	111,5754
494	95,32105	101,1314	106,4568	111,3080	115,7224	119,7566	95,48048	111,3154
495	95,38878	101,0699	106,2800	111,0282	115,3474	119,2940	95,56485	111,0564
496	95,45846	101,0130	106,1088	110,7541	114,9785	118,8379	95,65063	110,8017
497	95,53156	100,9636	105,9467	110,4891	114,6191	118,3919	95,73948	110,5546
498	95,60956	100,9246	105,7973	110,2367	114,2730	117,9599	95,83304	110,3187
499	95,69391	100,8991	105,6639	110,0003	113,9436	117,5455	95,93297	110,0973
500	95,78610	100,8899	105,5502	109,7834	113,6346	117,1525	96,04092	109,8938
501	95,88945	100,8940	105,4496	109,5814	113,3417	116,7768	96,15901	109,7042
502	96,00509	100,9056	105,3537	109,3872	113,0582	116,4114	96,28726	109,5217
503	96,13122	100,9238	105,2628	109,2006	112,7836	116,0560	96,42414	109,3461
504	96,26605	100,9476	105,1772	109,0215	112,5177	115,7103	96,56815	109,1772
505	96,40776	100,9760	105,0973	108,8496	112,2601	115,3737	96,71775	109,0147
506	96,55456	101,0081	105,0233	108,6847	112,0105	115,0461	96,87144	108,8584
507	96,70464	101,0429	104,9555	108,5266	111,7687	114,7271	97,02770	108,7079
508	96,85620	101,0795	104,8944	108,3751	111,5341	114,4162	97,18501	108,5631

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
509	97,00743	101,1169	104,8401	108,2299	111,3067	114,1132	97,34186	108,4237
510	97,15655	101,1541	104,7931	108,0910	111,0859	113,8177	97,49671	108,2893
511	97,30740	101,1960	104,7523	107,9589	110,8729	113,5308	97,65314	108,1611
512	97,46409	101,2469	104,7159	107,8337	110,6680	113,2530	97,81474	108,0395
513	97,62516	101,3049	104,6831	107,7144	110,4701	112,9832	97,98002	107,9234
514	97,78914	101,3684	104,6532	107,5999	110,2782	112,7203	98,14753	107,8116
515	97,95457	101,4354	104,6254	107,4892	110,0911	112,4630	98,31579	107,7031
516	98,11998	101,5041	104,5989	107,3812	109,9077	112,2104	98,48333	107,5967
517	98,28390	101,5729	104,5729	107,2749	109,7269	111,9611	98,64868	107,4913
518	98,44488	101,6399	104,5465	107,1692	109,5476	111,7142	98,81037	107,3858
519	98,60144	101,7033	104,5191	107,0630	109,3687	111,4684	98,96693	107,2791
520	98,75213	101,7613	104,4898	106,9553	109,1890	111,2226	99,11688	107,1701
521	98,90023	101,8179	104,4601	106,8480	109,0106	110,9788	99,26395	107,0609
522	99,04915	101,8774	104,4318	106,7435	108,8357	110,7393	99,41185	106,9537
523	99,19765	101,9380	104,4041	106,6409	108,6636	110,5032	99,55911	106,8478
524	99,34446	101,9982	104,3766	106,5394	108,4934	110,2698	99,70426	106,7425
525	99,48832	102,0564	104,3487	106,4383	108,3244	110,0383	99,84582	106,6369
526	99,62798	102,1108	104,3198	106,3367	108,1557	109,8079	99,98231	106,5302
527	99,76217	102,1599	104,2894	106,2340	107,9866	109,5778	100,1123	106,4218
528	99,88964	102,2020	104,2568	106,1293	107,8163	109,3472	100,2342	106,3108
529	100,0091	102,2355	104,2216	106,0219	107,6440	109,1154	100,3467	106,1964
530	100,1194	102,2588	104,1831	105,9110	107,4688	108,8816	100,4482	106,0779
531	100,2286	102,2761	104,1413	105,7986	107,2934	108,6484	100,5464	105,9570
532	100,3430	102,2926	104,0966	105,6866	107,1199	108,4181	100,6479	105,8355
533	100,4588	102,3080	104,0486	105,5740	106,9471	108,1894	100,7495	105,7123
534	100,5719	102,3220	103,9970	105,4597	106,7736	107,9610	100,8480	105,5866
535	100,6785	102,3346	103,9414	105,3427	106,5983	107,7314	100,9401	105,4573
536	100,7745	102,3453	103,8817	105,2220	106,4199	107,4995	101,0226	105,3237
537	100,8561	102,3541	103,8174	105,0965	106,2372	107,2637	101,0924	105,1846
538	100,9192	102,3606	103,7484	104,9653	106,0488	107,0228	101,1462	105,0392
539	100,9600	102,3647	103,6741	104,8273	105,8536	106,7755	101,1809	104,8866
540	100,9745	102,3661	103,5945	104,6815	105,6502	106,5204	101,1931	104,7258
541	100,9732	102,3538	103,5041	104,5259	105,4382	106,2576	101,1891	104,5545
542	100,9695	102,3189	103,3990	104,3598	105,2180	105,9884	101,1775	104,3715
543	100,9635	102,2644	103,2808	104,1841	104,9903	105,7131	101,1590	104,1778
544	100,9554	102,1935	103,1509	103,9996	104,7555	105,4320	101,1343	103,9743
545	100,9452	102,1092	103,0111	103,8071	104,5141	105,1455	101,1043	103,7621
546	100,9331	102,0146	102,8629	103,6076	104,2666	104,8537	101,0695	103,5421
547	100,9193	101,9128	102,7079	103,4019	104,0135	104,5571	101,0307	103,3151
548	100,9038	101,8069	102,5477	103,1908	103,7554	104,2558	100,9886	103,0823
549	100,8868	101,7000	102,3838	102,9752	103,4926	103,9503	100,9440	102,8446
550	100,8685	101,5951	102,2180	102,7560	103,2259	103,6407	100,8975	102,6029

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
551	100,8371	101,4837	102,0446	102,5293	102,9521	103,3249	100,8385	102,3530
552	100,7833	101,3567	101,8583	102,2916	102,6689	103,0011	100,7579	102,0912
553	100,7105	101,2164	101,6609	102,0443	102,3776	102,6702	100,6591	101,8189
554	100,6224	101,0650	101,4542	101,7890	102,0793	102,3335	100,5454	101,5379
555	100,5226	100,9048	101,2398	101,5271	101,7753	101,9920	100,4199	101,2494
556	100,4145	100,7381	101,0197	101,2601	101,4670	101,6467	100,2861	100,9552
557	100,3018	100,5671	100,7955	100,9894	101,1554	101,2989	100,1472	100,6568
558	100,1881	100,3942	100,5691	100,7166	100,8419	100,9494	100,0065	100,3556
559	100,0768	100,2215	100,3422	100,4430	100,5277	100,5995	99,86724	100,0532
560	99,97163	100,0513	100,1166	100,1701	100,2140	100,2502	99,73276	99,75113
561	99,86688	99,87934	99,88867	99,8949	99,89825	99,89906	99,59756	99,44616
562	99,75557	99,70079	99,65443	99,61394	99,57742	99,54368	99,45501	99,13477
563	99,63927	99,51704	99,41520	99,32844	99,25263	99,18499	99,30666	98,81816
564	99,51955	99,32953	99,17228	99,03956	98,92495	98,82395	99,15406	98,49753
565	99,39797	99,13967	98,92696	98,74851	98,59543	98,46152	98,99875	98,17406
566	99,27612	98,94888	98,68055	98,45644	98,26515	98,09864	98,84230	97,84897
567	99,15554	98,75859	98,43433	98,16454	97,93516	97,73629	98,68626	97,52344
568	99,03783	98,57022	98,18962	97,87399	97,60654	97,37541	98,53216	97,19868
569	98,92453	98,38518	97,94770	97,58597	97,28034	97,01697	98,38158	96,87589
570	98,81723	98,20490	97,70987	97,30166	96,95763	96,66192	98,23605	96,55625
571	98,71261	98,02673	97,47368	97,01872	96,63621	96,30818	98,09284	96,23746
572	98,60713	97,84770	97,23641	96,73466	96,31375	95,95358	97,94876	95,91697
573	98,50197	97,66875	96,99895	96,45034	95,99112	95,59899	97,80474	95,59568
574	98,39832	97,49081	96,76221	96,16665	95,66917	95,24523	97,66173	95,27446
575	98,29737	97,31484	96,52709	95,88447	95,34877	94,89316	97,52064	94,95418
576	98,20029	97,14177	96,29450	95,60469	95,03079	94,54361	97,38240	94,63574
577	98,10829	96,97255	96,06533	95,32818	94,71609	94,19744	97,24795	94,31999
578	98,02254	96,80811	95,84048	95,05584	94,40554	93,85549	97,11821	94,00784
579	97,94423	96,64941	95,62086	94,78855	94,10000	93,51859	96,99411	93,70014
580	97,87455	96,49737	95,40737	94,52718	93,80034	93,18760	96,87658	93,39779
581	97,80959	96,35039	95,19878	94,27065	93,50551	92,86150	96,76383	93,09979
582	97,74532	96,20639	94,99335	94,01731	93,21394	92,53876	96,65364	92,80458
583	97,68277	96,06557	94,79115	93,76723	92,92570	92,21945	96,54626	92,51225
584	97,62296	95,92811	94,59231	93,52050	92,64085	91,90363	96,44197	92,22287
585	97,56691	95,79422	94,39690	93,27718	92,35947	91,59137	96,34104	91,93649
586	97,51564	95,66410	94,20504	93,03734	92,08160	91,28273	96,24372	91,65320
587	97,47019	95,53795	94,01682	92,80106	91,80732	90,97777	96,15029	91,37306
588	97,43157	95,41596	93,83235	92,56841	91,53669	90,67657	96,06101	91,09614
589	97,40081	95,29834	93,65171	92,33946	91,26979	90,37918	95,97614	90,82251
590	97,37892	95,18529	93,47501	92,11429	91,00667	90,08567	95,89596	90,55223
591	97,36218	95,07671	93,30248	91,89318	90,74761	89,79631	95,82016	90,28562
592	97,34629	94,97213	93,13402	91,67611	90,49263	89,51109	95,74800	90,02269

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
593	97,33146	94,87110	92,96918	91,46268	90,24133	89,22964	95,67906	89,76308
594	97,31792	94,77321	92,80755	91,25249	89,99335	88,95162	95,61293	89,50645
595	97,30588	94,67802	92,64869	91,04514	89,74831	88,67667	95,54918	89,25244
596	97,29555	94,58512	92,49217	90,84022	89,50582	88,40443	95,48742	89,0007
597	97,28714	94,49408	92,33757	90,63733	89,26553	88,13456	95,42721	88,75088
598	97,28086	94,40447	92,18445	90,43607	89,02704	87,86669	95,36816	88,50262
599	97,27694	94,31586	92,03239	90,23604	88,78999	87,60047	95,30983	88,25557
600	97,27559	94,22784	91,88095	90,03684	88,55400	87,33554	95,25183	88,00938
601	97,27631	94,14102	91,73076	89,83902	88,31956	87,07238	95,19480	87,76451
602	97,27832	94,05614	91,58255	89,64327	88,08733	86,81157	95,13949	87,52155
603	97,28143	93,97294	91,43610	89,44939	87,85713	86,55295	95,08561	87,28036
604	97,28543	93,89117	91,29119	89,25721	87,62877	86,29635	95,03288	87,04079
605	97,29012	93,81055	91,14761	89,06651	87,40208	86,04161	94,98102	86,8027
606	97,29531	93,73084	91,00513	88,87711	87,17688	85,78855	94,92973	86,56594
607	97,30078	93,65177	90,86353	88,68882	86,95301	85,53702	94,87873	86,33037
608	97,30634	93,57310	90,72260	88,50144	86,73028	85,28684	94,82774	86,09584
609	97,31179	93,49455	90,58210	88,31478	86,50851	85,03785	94,77646	85,86221
610	97,31691	93,41587	90,44181	88,12864	86,28753	84,78988	94,72462	85,62933
611	97,32163	93,33561	90,30059	87,94200	86,06641	84,54207	94,67054	85,39623
612	97,32611	93,25320	90,15801	87,75448	85,84479	84,29408	94,61356	85,16250
613	97,33055	93,16976	90,01495	87,56686	85,62338	84,04657	94,55498	84,92886
614	97,33514	93,08640	89,87229	87,37990	85,40287	83,80018	94,49607	84,69602
615	97,34010	93,00422	89,73092	87,19439	85,18397	83,55555	94,43812	84,46471
616	97,34561	92,92434	89,59171	87,01109	84,96737	83,31334	94,38239	84,23562
617	97,35187	92,84787	89,45556	86,83080	84,75379	83,07418	94,33018	84,00949
618	97,35909	92,77590	89,32333	86,65427	84,54392	82,83872	94,28276	83,78702
619	97,36746	92,70956	89,19592	86,48229	84,33846	82,60760	94,24140	83,56893
620	97,37719	92,64995	89,07421	86,31562	84,13812	82,38148	94,20740	83,35593
621	97,39228	92,59457	88,95691	86,15330	83,94204	82,15955	94,17729	83,14725
622	97,41586	92,54048	88,84220	85,99381	83,74889	81,94060	94,14725	82,94159
623	97,44680	92,48814	88,73016	85,83720	83,55869	81,72464	94,11802	82,73893
624	97,48398	92,43803	88,62088	85,68346	83,37144	81,51170	94,09031	82,53923
625	97,52627	92,39061	88,51444	85,53263	83,18716	81,30177	94,06487	82,34245
626	97,57256	92,34635	88,41093	85,38473	83,00585	81,09490	94,04241	82,14856
627	97,62172	92,30571	88,31041	85,23977	82,82752	80,89108	94,02368	81,95752
628	97,67261	92,26915	88,21298	85,09778	82,65219	80,69033	94,00940	81,76929
629	97,72413	92,23715	88,11871	84,95878	82,47985	80,49268	94,00029	81,58384
630	97,77514	92,21016	88,02770	84,82278	82,31053	80,29814	93,99709	81,40113
631	97,83264	92,18813	87,94188	84,69189	82,14626	80,10865	93,99827	81,22329
632	97,90200	92,16998	87,86206	84,56713	81,98806	79,92517	94,00146	81,05146
633	97,97970	92,15470	87,78665	84,44690	81,83443	79,74626	94,00616	80,88411
634	98,06224	92,14127	87,71406	84,32963	81,68384	79,57048	94,01186	80,71972

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
635	98,14608	92,12865	87,64267	84,21373	81,53477	79,39638	94,01808	80,55675
636	98,22771	92,11584	87,57090	84,09761	81,38571	79,22254	94,02429	80,39369
637	98,30360	92,10179	87,49715	83,97969	81,23514	79,04750	94,02999	80,22900
638	98,37025	92,08550	87,41981	83,85837	81,08155	78,86982	94,03469	80,06115
639	98,42412	92,06595	87,33729	83,73208	80,92341	78,68807	94,03788	79,88864
640	98,46170	92,04209	87,24799	83,59922	80,75921	78,50080	94,03906	79,70992
641	98,48958	92,01042	87,15154	83,45998	80,58931	78,30846	94,03195	79,52536
642	98,51639	91,96892	87,04907	83,31592	80,41539	78,11275	94,01182	79,33667
643	98,54169	91,91884	86,94121	83,16756	80,23791	77,91406	93,98047	79,14428
644	98,56504	91,86144	86,82861	83,01541	80,05731	77,71281	93,93968	78,94865
645	98,58600	91,79797	86,71190	82,85997	79,87404	77,50940	93,89126	78,75024
646	98,60414	91,72968	86,59172	82,70177	79,68855	77,30424	93,83699	78,54948
647	98,61902	91,65784	86,46870	82,54131	79,50130	77,09773	93,77867	78,34684
648	98,63019	91,58369	86,34348	82,37910	79,31274	76,89028	93,71809	78,14277
649	98,63721	91,50849	86,21671	82,21566	79,12330	76,68230	93,65705	77,93771
650	98,63965	91,43349	86,08902	82,05149	78,93345	76,47420	93,59734	77,73211
651	98,63522	91,35549	85,95832	81,88476	78,74148	76,26435	93,53469	77,52441
652	98,62267	91,27105	85,82268	81,71387	78,54592	76,05141	93,46426	77,31323
653	98,60308	91,18110	85,68294	81,53967	78,34763	75,83622	93,38700	77,09931
654	98,57754	91,08654	85,53995	81,36302	78,14747	75,61962	93,30384	76,88343
655	98,54712	90,98831	85,39456	81,18476	77,94629	75,40244	93,21572	76,66634
656	98,51293	90,88730	85,24761	81,00575	77,74495	75,18553	93,12359	76,44878
657	98,47604	90,78445	85,09995	80,82685	77,54429	74,96972	93,02839	76,23152
658	98,43754	90,68067	84,95243	80,64891	77,34517	74,75585	92,93107	76,01531
659	98,39851	90,57687	84,80590	80,47278	77,14845	74,54476	92,83255	75,80092
660	98,36005	90,47398	84,66119	80,29931	76,95497	74,33728	92,73379	75,58908
661	98,32088	90,37318	84,51983	80,12997	76,76609	74,13470	92,63534	75,38128
662	98,27868	90,27414	84,38178	79,96468	76,58167	73,93682	92,53635	75,17755
663	98,23300	90,17550	84,24555	79,80197	76,40030	73,74228	92,43567	74,97646
664	98,18335	90,07591	84,10967	79,64039	76,22057	73,54974	92,33212	74,77661
665	98,12926	89,97401	83,97265	79,47850	76,04109	73,35782	92,22455	74,5766
666	98,07028	89,86843	83,83303	79,31482	75,86044	73,16518	92,11180	74,37501
667	98,00591	89,75782	83,68931	79,14792	75,67723	72,97046	91,99270	74,17043
668	97,93570	89,64083	83,54003	78,97634	75,49005	72,77229	91,86609	73,96145
669	97,85917	89,51608	83,38371	78,79862	75,29750	72,56933	91,73081	73,74666
670	97,77586	89,38223	83,21886	78,61330	75,09816	72,36020	91,58571	73,52466
671	97,67689	89,23628	83,04447	78,42015	74,89214	72,14515	91,42603	73,29556
672	97,55542	89,07698	82,86100	78,22027	74,68077	71,92561	91,24894	73,06071
673	97,41404	88,90561	82,66926	78,01423	74,46453	71,70200	91,05609	72,82053
674	97,25530	88,72344	82,47001	77,80260	74,24389	71,47477	90,84917	72,57547
675	97,08180	88,53176	82,26404	77,58597	74,01935	71,24436	90,62985	72,32593
676	96,89609	88,33183	82,05214	77,36490	73,79137	71,01119	90,39978	72,07235

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
677	96,70076	88,12493	81,83509	77,13996	73,56044	70,77571	90,16065	71,81515
678	96,49837	87,91233	81,61367	76,91173	73,32703	70,53834	89,91412	71,55475
679	96,29150	87,69531	81,38867	76,68078	73,09162	70,29954	89,66186	71,29160
680	96,08273	87,47515	81,16087	76,44769	72,85470	70,05972	89,40555	71,02610
681	95,86033	87,24346	80,92342	76,20634	72,61052	69,81336	89,13578	70,75306
682	95,61406	86,99377	80,67144	75,95261	72,35533	69,55688	88,84482	70,46902
683	95,34870	86,73015	80,40866	75,69005	72,09257	69,29366	88,53682	70,17708
684	95,06901	86,45671	80,13885	75,42222	71,82570	69,02710	88,21593	69,88030
685	94,77976	86,17753	79,86572	75,15266	71,55817	68,76060	87,88630	69,58176
686	94,48573	85,89672	79,59303	74,88494	71,29341	68,49753	87,55210	69,28454
687	94,19170	85,61836	79,32451	74,62259	71,03489	68,24129	87,21746	68,99171
688	93,90243	85,34655	79,06390	74,36918	70,78605	67,99527	86,88654	68,70635
689	93,62271	85,08538	78,81495	74,12825	70,55034	67,76287	86,56350	68,43155
690	93,35729	84,83895	78,58139	73,90335	70,33120	67,54746	86,25249	68,17037
691	93,10122	84,60261	78,35850	73,68952	70,12339	67,34354	85,94913	67,91888
692	92,84672	84,36934	78,13943	73,47985	69,91986	67,14392	85,64666	67,67141
693	92,59434	84,13965	77,92474	73,27499	69,72137	66,94944	85,34562	67,42845
694	92,34459	83,91404	77,71501	73,07562	69,52869	66,76098	85,04657	67,19047
695	92,09803	83,69303	77,51079	72,88239	69,34258	66,57941	84,75006	66,95794
696	91,85519	83,47712	77,31266	72,69595	69,16382	66,40558	84,45663	66,73135
697	91,61662	83,26683	77,12118	72,51699	68,99315	66,24035	84,16685	66,51117
698	91,38284	83,06265	76,93692	72,34614	68,83135	66,08460	83,88126	66,29788
699	91,15439	82,86511	76,76045	72,18408	68,67918	65,93919	83,60042	66,09195
700	90,93182	82,67470	76,59232	72,03147	68,53740	65,80497	83,32487	65,89387
701	90,71832	82,49430	76,43496	71,89021	68,40746	65,68296	83,05841	65,70700
702	90,51492	82,32467	76,28865	71,76008	68,28861	65,57197	82,80246	65,53233
703	90,31894	82,16313	76,15077	71,63852	68,17836	65,46957	82,55402	65,36678
704	90,12766	82,00699	76,01868	71,52295	68,07422	65,37333	82,31007	65,20725
705	89,93841	81,85358	75,88975	71,41083	67,97369	65,28082	82,06762	65,05066
706	89,74848	81,70021	75,76136	71,29959	67,87429	65,18962	81,82364	64,89392
707	89,55517	81,54421	75,63089	71,18666	67,77352	65,09731	81,57514	64,73394
708	89,35580	81,38290	75,49569	71,06948	67,66889	65,00144	81,31911	64,56763
709	89,14766	81,21360	75,35315	70,94550	67,55790	64,89960	81,05253	64,39191
710	88,92806	81,03362	75,20063	70,81215	67,43807	64,78937	80,77240	64,20369
711	88,69716	80,84364	75,03916	70,67070	67,31083	64,67233	80,47605	64,00152
712	88,45748	80,64648	74,87173	70,52425	67,17938	64,55170	80,16469	63,78739
713	88,20992	80,44275	74,69873	70,37302	67,04379	64,42748	79,84113	63,56330
714	87,95537	80,23303	74,52053	70,21724	66,90417	64,29967	79,50817	63,33127
715	87,69470	80,01790	74,33751	70,05711	66,76062	64,16827	79,16865	63,09331
716	87,42881	79,79796	74,15004	69,89286	66,61322	64,03328	78,82537	62,85146
717	87,15857	79,57380	73,95850	69,72470	66,46208	63,89470	78,48114	62,60771
718	86,88488	79,34601	73,76327	69,55285	66,30729	63,75253	78,13879	62,36409

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
719	86,60862	79,11518	73,56472	69,37753	66,14894	63,60676	77,80111	62,12261
720	86,33067	78,88189	73,36323	69,19895	65,98714	63,45740	77,47094	61,88529
721	86,04730	78,64285	73,15580	69,01435	65,81927	63,30199	77,14364	61,64823
722	85,75540	78,39548	72,94021	68,82174	65,64356	63,13890	76,81374	61,40716
723	85,45676	78,14137	72,71792	68,62252	65,46133	62,96941	76,48273	61,16357
724	85,15318	77,88214	72,49044	68,41807	65,27391	62,79478	76,15213	60,91893
725	84,84647	77,61942	72,25924	68,20980	65,08262	62,61629	75,82343	60,67471
726	84,53842	77,35481	72,02581	67,99909	64,88878	62,43520	75,49816	60,4324
727	84,23084	77,08993	71,79164	67,78734	64,69373	62,25279	75,17780	60,19346
728	83,92553	76,82639	71,55821	67,57595	64,49877	62,07033	74,86387	59,95938
729	83,62428	76,56581	71,32701	67,36631	64,30525	61,88908	74,55788	59,73162
730	83,32890	76,30980	71,09953	67,15980	64,11447	61,71031	74,26132	59,51168
731	83,03402	76,05357	70,87137	66,95235	63,92258	61,53034	73,97272	59,29813
732	82,73474	75,79276	70,63855	66,74022	63,72606	61,34581	73,68947	59,08850
733	82,43363	75,52967	70,40317	66,52538	63,52674	61,15845	73,41138	58,88266
734	82,13324	75,26660	70,16734	66,30977	63,32646	60,97003	73,13827	58,68049
735	81,83614	75,00584	69,93315	66,09535	63,12706	60,78227	72,86997	58,48186
736	81,54487	74,74969	69,70272	65,88408	62,93039	60,59693	72,60629	58,28666
737	81,26200	74,50043	69,47813	65,67792	62,73827	60,41576	72,34705	58,09476
738	80,99007	74,26038	69,26149	65,47881	62,55256	60,24050	72,09208	57,90603
739	80,73166	74,03181	69,05491	65,28871	62,37508	60,07289	71,84118	57,72036
740	80,48930	73,81703	68,86049	65,10957	62,20768	59,91468	71,59418	57,53761
741	80,25758	73,61148	68,67427	64,93791	62,04720	59,76297	71,35120	57,35796
742	80,03014	73,40970	68,49145	64,76935	61,88961	59,61400	71,11236	57,18150
743	79,80818	73,21264	68,31280	64,60458	61,73552	59,46830	70,87746	57,00803
744	79,59287	73,02125	68,13913	64,44425	61,58549	59,32638	70,64630	56,83737
745	79,38540	72,83649	67,97121	64,28905	61,44011	59,18876	70,41868	56,66930
746	79,18695	72,65931	67,80983	64,13964	61,29996	59,05594	70,19440	56,50363
747	78,99870	72,49066	67,65578	63,99668	61,16563	58,92844	69,97326	56,34017
748	78,82185	72,33150	67,50986	63,86086	61,03769	58,80678	69,75506	56,17871
749	78,65756	72,18277	67,37285	63,73284	60,91672	58,69147	69,53961	56,01906
750	78,50703	72,04542	67,24553	63,61329	60,80332	58,58302	69,32671	55,86101
751	78,37084	71,92024	67,12880	63,50316	60,69845	58,48244	69,11628	55,70466
752	78,24702	71,80582	67,02163	63,40169	60,60156	58,38931	68,90843	55,55020
753	78,13294	71,69986	66,92198	63,30703	60,51093	58,30201	68,70317	55,39762
754	78,02597	71,60007	66,82779	63,21730	60,42483	58,21893	68,50054	55,24687
755	77,92345	71,50415	66,73702	63,13065	60,34154	58,13845	68,30057	55,09793
756	77,82275	71,40979	66,64761	63,04520	60,25934	58,05895	68,10327	54,95077
757	77,72125	71,31469	66,55753	62,95910	60,17649	57,97882	67,90868	54,80536
758	77,61628	71,21657	66,46470	62,87048	60,09128	57,89643	67,71684	54,66168
759	77,50523	71,11311	66,36709	62,77747	60,00198	57,81018	67,52775	54,51969
760	77,38545	71,00202	66,26265	62,67822	59,90686	57,71844	67,34147	54,37936

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
761	77,25806	70,88427	66,15223	62,57348	59,80662	57,62183	67,15727	54,24031
762	77,12625	70,76267	66,03834	62,46551	59,70332	57,52229	66,97467	54,10231
763	76,99053	70,63766	65,92138	62,35471	59,59735	57,42019	66,79401	53,96557
764	76,85141	70,50969	65,80175	62,24146	59,48907	57,31588	66,61561	53,83029
765	76,70938	70,37919	65,67987	62,12613	59,37885	57,20971	66,43981	53,69670
766	76,56495	70,24661	65,55613	62,00911	59,26705	57,10206	66,26694	53,56500
767	76,41861	70,11239	65,43094	61,89078	59,15404	56,99328	66,09735	53,43541
768	76,27087	69,97698	65,30471	61,77152	59,04020	56,88372	65,93136	53,30814
769	76,12223	69,84082	65,17785	61,65172	58,92588	56,77376	65,76931	53,18340
770	75,97320	69,70434	65,05075	61,53175	58,81146	56,66375	65,61153	53,06140
771	75,82025	69,56442	64,92054	61,40894	58,69440	56,55126	65,45728	52,94171
772	75,66088	69,41880	64,78518	61,28138	58,57290	56,43456	65,30567	52,82380
773	75,49708	69,26929	64,64633	61,15061	58,44840	56,31504	65,15677	52,70770
774	75,33086	69,11770	64,50562	61,01816	58,32237	56,19409	65,01070	52,59349
775	75,16423	68,96581	64,36472	60,88559	58,19626	56,07310	64,86754	52,48120
776	74,99918	68,81544	64,22527	60,75443	58,07152	55,95345	64,72740	52,37090
777	74,83772	68,66838	64,08893	60,62622	57,94962	55,83654	64,59036	52,26264
778	74,68184	68,52643	63,95734	60,50250	57,83200	55,72376	64,45653	52,15646
779	74,53356	68,39139	63,83217	60,38482	57,72013	55,61649	64,32601	52,05243
780	74,39486	68,26507	63,71507	60,27471	57,61545	55,51613	64,19887	51,95059
781	74,26306	68,14500	63,60375	60,17004	57,51595	55,42072		
782	74,13427	68,02769	63,49500	60,06779	57,41875	55,32752		
783	74,00875	67,91336	63,38902	59,96815	57,32404	55,23673		
784	73,88674	67,80225	63,28603	59,87134	57,23202	55,14852		
785	73,76848	67,69458	63,18625	59,77756	57,14290	55,06309		
786	73,65423	67,59058	63,08989	59,68701	57,05686	54,98064		
787	73,54424	67,49047	62,99717	59,59990	56,97411	54,90135		
788	73,43875	67,39450	62,90830	59,51643	56,89484	54,82542		
789	73,33801	67,30288	62,82349	59,43680	56,81925	54,75304		
790	73,24227	67,21584	62,74296	59,36123	56,74754	54,68439		
791	73,15050	67,13244	62,66581	59,28884	56,67886	54,61867		
792	73,06159	67,05162	62,59105	59,21869	56,61231	54,55498		
793	72,97558	66,97346	62,51875	59,15086	56,54796	54,49340		
794	72,89255	66,89801	62,44897	59,08540	56,48587	54,43400		
795	72,81256	66,82535	62,38178	59,02240	56,42612	54,37685		
796	72,73568	66,75553	62,31726	58,96192	56,36879	54,32203		
797	72,66197	66,68864	62,25548	58,90403	56,31395	54,26961		
798	72,59150	66,62474	62,19649	58,84880	56,26166	54,21966		
799	72,52434	66,56389	62,14038	58,79631	56,21200	54,17227		
800	72,46054	66,50616	62,08721	58,74662	56,16504	54,12749		
801	72,39931	66,45078	62,03623	58,69901	56,12007	54,08464		
802	72,33989	66,39704	61,98675	58,65281	56,07642	54,04303		

Wavelength / nm	sD50	sD55	sD60	sD65	sD70	sD75	sID50	sID65
803	72,28241	66,34506	61,93891	58,60812	56,03422	54,00282		
804	72,22700	66,29498	61,89283	58,56511	55,99360	53,96412		
805	72,17381	66,24693	61,84864	58,52388	55,95470	53,92708		
806	72,12295	66,20103	61,80648	58,48459	55,91765	53,89183		
807	72,07457	66,15743	61,76648	58,44735	55,88259	53,85851		
808	72,02880	66,11626	61,72877	58,41231	55,84965	53,82725		
809	71,98577	66,07764	61,69349	58,37959	55,81895	53,79819		
810	71,94562	66,04171	61,66076	58,34934	55,79065	53,77146		
811	71,90706	66,00724	61,62938	58,32034	55,76353	53,74587		
812	71,86901	65,97318	61,59832	58,29159	55,73661	53,72040		
813	71,83192	65,93995	61,56801	58,26352	55,71030	53,69550		
814	71,79622	65,90799	61,53887	58,23655	55,68502	53,67158		
815	71,76236	65,87773	61,51132	58,21109	55,66119	53,64907		
816	71,73077	65,84959	61,48578	58,18756	55,63925	53,62840		
817	71,70191	65,82400	61,46268	58,16638	55,61960	53,60999		
818	71,67620	65,80139	61,44244	58,14798	55,60268	53,59427		
819	71,65409	65,78218	61,42547	58,13278	55,58889	53,58165		
820	71,63603	65,76681	61,41220	58,12119	55,57867	53,57258		
821	71,62021	65,75357	61,40103	58,11166	55,57050	53,56555		
822	71,60474	65,74065	61,39018	58,10248	55,56268	53,55887		
823	71,58992	65,72828	61,37987	58,09380	55,55533	53,55261		
824	71,57604	65,71674	61,37029	58,08578	55,54856	53,54689		
825	71,56340	65,70628	61,36164	58,07856	55,54250	53,54178		
826	71,55229	65,69714	61,35412	58,07231	55,53727	53,53739		
827	71,54301	65,68959	61,34792	58,06717	55,53299	53,53382		
828	71,53585	65,68389	61,34325	58,06331	55,52979	53,53114		
829	71,53112	65,68028	61,34030	58,06089	55,52777	53,52947		
830	71,52910	65,67901	61,33927	58,06004	55,52708	53,52889		

>

ANNEXE IV

SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF SPRAGUE INTERPOLATED DAYLIGHT ILLUMINANTS: D_{50}, D_{55}, D_{60}, D_{65}, D_{70} and D_{75}

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
300	0,01913806	0,02420002	0,02918800	0,03397657	0,03850179	0,04275381
301	0,13369238	0,05055179	0,01859396	0,01859087	0,03839890	0,07039234
302	0,25076110	0,08515769	0,02018581	0,01810718	0,05508123	0,11612389
303	0,37691405	0,13551555	0,04510241	0,04883375	0,11082311	0,20855889
304	0,51860929	0,21338922	0,11088414	0,13419317	0,23482327	0,38247030
305	0,68200874	0,33304378	0,23881969	0,30162693	0,45995654	0,67558091
306	0,87279384	0,50948079	0,45129291	0,57949989	0,81952556	1,12535055
307	1,09598111	0,75667356	0,76912957	0,99400480	1,34401249	1,76576339
308	1,35573786	1,08580238	1,20894418	1,56606681	2,05783076	2,62411516
309	1,65519775	1,50348976	1,78048680	2,30824798	2,97607673	3,71780048
310	1,99627645	2,01003568	2,48398985	3,22165179	4,10128148	5,05110004
311	2,38088411	2,60360029	3,31654690	4,30396172	5,43272816	6,62550407
312	2,81362174	3,29440233	4,29360062	5,57544420	6,99511808	8,46979752
313	3,29572461	4,08424284	5,41770120	7,03948621	8,79270497	10,58909988
314	3,82444283	4,96343040	6,67384872	8,67693188	10,80301279	12,95822556
315	4,39421392	5,91439226	8,03501510	10,45313665	12,98514279	15,53103634
316	4,99783554	6,91528549	9,46766603	12,32502142	15,28808043	18,24979385
317	5,62763813	7,94360822	10,93728286	14,24812674	17,65900248	21,05451195
318	6,27665755	8,97981073	12,41388456	16,18366691	20,05158400	23,89230924
319	6,93980779	10,01090669	13,87754963	18,10558417	22,43430534	26,72676145
320	7,61505360	11,03408430	15,32393801	20,00760288	24,79875915	29,54725393
321	8,30554327	12,05833314	16,76687773	21,90763274	27,16634860	32,37822668
322	9,01785697	13,09132185	18,21845390	23,82405178	29,56272430	35,25305933
323	9,75080049	14,12984701	19,67390425	25,75085959	31,98088276	38,16391860
324	10,49555919	15,16220751	21,11521166	27,66184421	34,38549137	41,06597216
325	11,23833646	16,17126196	22,51588095	29,51781137	36,72295335	43,89046789
326	11,96299222	17,13748628	23,84571561	31,27381381	38,93147263	46,55781305
327	12,65368138	18,04203111	25,07559455	32,88638058	40,95111881	48,99065349
328	13,29749237	18,86977935	26,18224884	34,32074637	42,73389210	51,12695288
329	13,88708558	19,61240361	27,15303844	35,55808077	44,25378821	52,93307187
330	14,42333189	20,27142373	27,99072898	36,60271761	45,51686329	54,41684733
331	14,91148619	20,85186242	28,70321123	37,46720235	46,54128937	55,60256750
332	15,34375557	21,33905719	29,26669758	38,11754069	47,28249267	56,43508695
333	15,71765339	21,72957861	29,67588811	38,54605896	47,73018305	56,90140483
334	16,03966295	22,03621057	29,95189302	38,78316099	47,92438655	57,05115568
335	16,32232776	22,28261915	30,13352569	38,88477269	47,93886063	56,97597332
336	16,58134183	22,49802153	30,26859580	38,91978649	47,86450924	56,78885486
337	16,83263993	22,71185495	30,40520240	38,95750593	47,79279804	56,60352463
338	17,08948785	22,94844559	30,58302704	39,05509012	47,79916951	56,51379814
339	17,35957270	23,22167747	30,82462682	39,24499833	47,92645809	56,57294607

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
340	17,64209316	23,52966141	31,12672751	39,52243444	48,16830540	56,77305817
341	17,92970264	23,85969715	31,46893017	39,85812086	48,48608269	57,06607019
342	18,22417230	24,21916341	31,86510378	40,27274963	48,90731229	57,48618070
343	18,52765004	24,61242101	32,32262048	40,77709382	49,44631056	58,05125791
344	18,83949576	25,03447544	32,83177343	41,35666388	50,08390108	58,73760861
345	19,15715525	25,47401585	33,37135792	41,97997995	50,77839234	59,49360728
346	19,47703405	25,91645405	33,91425234	42,60684426	51,47655536	60,25332513
347	19,79537126	26,34696341	34,43299935	43,19661348	52,12460144	60,95015924
348	20,10911344	26,75351792	34,90538684	43,71647115	52,67915979	61,53046158
349	20,41678841	27,12993113	35,32002907	44,14970000	53,11825521	61,96716812
350	20,71937917	27,47889514	35,68194766	44,50395432	53,45228579	62,27342793
351	21,01862967	27,80799086	36,00554949	44,80085361	53,71011290	62,48519477
352	21,31060389	28,11026321	36,27943001	45,02381643	53,86967830	62,57486934
353	21,59392075	28,38325224	36,49978357	45,16757175	53,92421415	62,53420167
354	21,87113173	28,63305231	36,67774083	45,24903388	53,89671294	62,39230931
355	22,14731933	28,87138889	36,83431310	45,29981085	53,82988300	62,20306449
356	22,42869561	29,11269542	36,99533663	45,35871290	53,77610403	62,03248133
357	22,72120068	29,37119008	37,18641699	45,46426087	53,78738260	61,94610304
358	23,02910121	29,65795269	37,42787335	45,64719468	53,90530770	61,99638913
359	23,35358897	29,97800143	37,72968283	45,92298172	54,15100624	62,21010260
360	23,69137929	30,32736973	38,08642482	46,28432533	54,51509858	62,57569714
361	24,04112190	30,70068404	38,48736268	46,71448150	54,97460923	63,06396743
362	24,41950847	31,11569831	38,95414626	47,24058944	55,56299448	63,71506848
363	24,82940715	31,57609590	39,49175337	47,86917122	56,28843047	64,53886218
364	25,25623259	32,06614648	40,08041204	48,57478613	57,11896438	65,49649652
365	25,67398206	32,55735389	40,68399625	49,31080749	57,99599549	66,51673435
366	26,05127166	33,01510386	41,25842158	50,02019951	58,84775624	67,51228207
367	26,35737248	33,40531181	41,76004092	50,64629406	59,60279326	68,39611837
368	26,56824679	33,70107064	42,15404011	51,14356749	60,20344844	69,09782291
369	26,67258418	33,88929848	42,42283367	51,48841744	60,61933994	69,57990507
370	26,67783776	33,97738651	42,57446044	51,68993965	60,86084327	69,85413268
371	26,60170629	33,98559161	42,63441729	51,78033091	60,96756480	69,96780252
372	26,43262363	33,90629670	42,59646182	51,75312350	60,93182605	69,91142453
373	26,17055617	33,73998271	42,46076276	51,60768348	60,75190977	69,68204416
374	25,83529365	33,50367728	42,24401578	51,36185495	60,44769283	69,30208829
375	25,46003442	33,22570920	41,97429681	51,04626182	60,05400916	68,81156401
376	25,08497080	32,94046292	41,68591553	50,69860960	59,61401276	68,26025741
377	24,75087441	32,68313305	41,41426871	50,35798721	59,17254059	67,69993236
378	24,49268150	32,48447881	41,19069362	50,05916872	58,76947559	67,17652928
379	24,33307825	32,36557854	41,03732148	49,82691519	58,43310964	66,72236393
380	24,27608610	32,33258417	40,96193079	49,67027642	58,17350648	66,34832617
381	24,30327032	32,36886267	40,94716062	49,56965586	57,96796439	66,02812622
382	24,39563949	32,44546186	40,95596738	49,48130022	57,76707283	65,70749944

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
383	24,55516586	32,56274311	40,98801193	49,40474236	57,57059529	65,38666349
384	24,80091453	32,74904609	41,07953276	49,38304239	57,42754665	65,11989646
385	25,16268753	33,05061115	41,29030318	49,48732934	57,41873048	64,99637864
386	25,67466797	33,52150174	41,69058850	49,80134268	57,63927616	65,12103442
387	26,36906413	34,21352685	42,34810329	50,40597395	58,18117610	65,59537408
388	27,26975359	35,16616338	43,31496854	51,36380837	59,11582295	66,49833563
389	28,38592736	36,39647862	44,61466889	52,70366641	60,47654677	67,86712661
390	29,70573397	37,88905259	46,22900985	54,40514538	62,24115225	69,67806596
391	31,21507980	39,62072948	48,12777980	56,43241043	64,36923353	71,88695462
392	32,95460942	41,64305248	50,37173002	58,85411273	66,93630010	74,57533629
393	34,92708676	43,96095865	52,96755940	61,67840954	69,95173693	77,75364787
394	37,08488390	46,51488695	55,84567038	64,82712531	73,32994501	81,32977628
395	39,34681892	49,20228834	58,88557505	68,16446351	76,92189654	85,14309565
396	41,61499364	51,89913573	61,94130131	71,52571854	80,54669004	88,99850462
397	43,79163147	54,48143405	64,86679895	74,74598753	84,02310555	92,70046352
398	45,79591517	56,84673028	67,54134577	77,68888224	87,20115979	96,08703161
399	47,58082465	58,93562344	69,89495368	80,27524091	89,99366123	99,06390436
400	49,14997478	60,75327466	71,93377482	82,51184009	92,40776536	101,63845062
401	50,54019304	62,34764052	73,71495369	84,46355292	94,51494374	103,88786575
402	51,72121907	63,68210744	75,19706975	86,08523637	96,26711185	105,76169052
403	52,67749279	64,73749883	76,35778588	87,35176669	97,63667234	107,23011130
404	53,42884361	65,53831673	77,22462729	88,29260062	98,65428040	108,32448593
405	54,01909743	66,13869016	77,85896035	88,97426282	99,39017948	109,11777146
406	54,50468370	66,60832347	78,33997146	89,48283318	99,93553700	109,70495194
407	54,94324237	67,01844468	78,74864590	89,90643418	100,38378003	110,18346610
408	55,38223092	67,42775388	79,15174672	90,31771829	100,81193107	110,63363510
409	55,84753141	67,86837154	79,58579357	90,75635525	101,26194366	111,09909032
410	56,33205742	68,33178686	80,04104158	91,21151950	101,72203817	111,56720104
411	56,80920963	68,78460468	80,47894486	91,64066936	102,14650974	111,98970412
412	57,30334962	69,25413774	80,92897830	92,07489754	102,56768421	112,39988438
413	57,82603897	69,75405303	81,40634000	92,53053831	103,00275406	112,81559510
414	58,36139905	70,26664161	81,89192463	92,98739576	103,43065418	113,21506351
415	58,87552966	70,75356481	82,34407277	93,40126887	103,80519918	113,55052159
416	59,32592765	71,16660037	82,71032022	93,71647664	104,06822066	113,76183693
417	59,67090551	71,45838864	82,93914729	93,87838314	104,16270452	113,79014353
418	59,87901000	71,59317870	82,99172813	93,84592264	104,04592816	113,59147262
419	59,93844075	71,55757459	82,85368006	93,60412466	103,70259785	113,15038351
420	59,86646885	71,37128141	82,54681284	93,17663913	103,15798595	112,49359439
421	59,68744382	71,06241052	82,10209355	92,59665209	102,44703803	111,65747617
422	59,35753177	70,58223235	81,46638683	91,80705545	101,50905757	110,57807261
423	58,87233117	69,92594934	80,63467898	90,80273485	100,33890413	109,25026539
424	58,28315644	69,15112155	79,67023700	89,65216136	99,00978926	107,75160049
425	57,67810343	68,35647174	78,68139919	88,47237887	97,64664427	106,21419123

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
426	57,16311495	67,66069046	77,79836579	87,40399150	96,39948798	104,79662112
427	56,84304628	67,18124107	77,14998954	86,58615091	95,41679448	103,65584685
428	56,80273071	67,01316485	76,84056626	86,13154376	94,81886092	102,91910121
429	57,08804502	67,20788606	76,92662551	86,10137906	94,67117525	102,65579608
430	57,68697501	67,75201701	77,39372109	86,48037554	94,95778399	102,84942531
431	58,55331772	68,59401048	78,18561342	87,20814107	95,61459831	103,43258023
432	59,72590065	69,77780023	79,35060665	88,33676952	96,69703121	104,46361549
433	61,21584639	71,31599792	80,90271038	89,88156999	98,22159235	105,96015024
434	62,98172619	73,16203409	82,79113411	91,78821815	100,13095274	107,86225844
435	64,94658746	75,22934204	84,92129099	93,95531997	102,31786177	110,05757565
436	67,01498118	77,41054183	87,17580177	96,25697547	104,64906407	112,40640578
437	69,08998941	79,59662412	89,43549855	98,56534249	106,98921651	114,76682783
438	71,09025278	81,69613415	91,60042870	100,77320044	109,22480511	117,01980271
439	72,96699789	83,65435564	93,61085868	102,81651405	111,28806202	119,09427992
440	74,72106484	85,47249469	95,46827786	104,69699713	113,18088244	120,99230439
441	76,39445843	87,19790474	97,22460487	106,47051800	114,96258755	122,77625282
442	77,98326040	88,82556859	98,87418074	108,13107239	116,62702167	124,43994541
443	79,47401949	90,34039184	100,40053565	109,66101969	118,15553441	125,96384820
444	80,86114689	91,73689994	101,79798972	111,05428766	119,54155668	127,34084013
445	82,14479984	93,01659091	103,06866091	112,31315891	120,78724868	128,57277854
446	83,32876523	94,18528805	104,21947301	113,44505744	121,90014784	129,66706482
447	84,41834327	95,25049259	105,25916356	114,45933510	122,88981679	130,63320990
448	85,41823104	96,21873644	106,19529179	115,36405811	123,76449134	131,47939988
449	86,33040620	97,09293488	107,03124659	116,16279354	124,52772842	132,20906157
450	87,15201050	97,86973922	107,76325439	116,85139583	125,17505406	132,81742806
451	87,87327689	98,53760677	108,37850065	117,41612271	125,69203876	133,28955207
452	88,48346901	99,08526722	108,86517235	117,84463005	126,06582990	133,61209875
453	88,98213375	99,51244943	109,22305220	118,13667521	126,29611117	133,78464894
454	89,37814033	99,82842445	109,46175542	118,30217202	126,39305802	133,81761011
455	89,68674021	100,04900780	109,59765219	118,35802244	126,37407451	133,72885773
456	89,92662696	100,19356170	109,65079007	118,32494824	126,26053002	133,54037685
457	90,11699614	100,28199730	109,64181646	118,22432270	126,07449612	133,27490345
458	90,27460516	100,33177700	109,58890104	118,07500228	125,83548332	132,95256600
459	90,41083321	100,35491660	109,50465816	117,89015831	125,55717784	132,58752685
460	90,52874111	100,35498760	109,39306933	117,67410863	125,24417846	132,18462375
461	90,62061268	100,32415640	109,24610917	117,41859705	124,88798063	131,73509843
462	90,67686472	100,25155900	109,05182004	117,11071944	124,47485262	131,22448662
463	90,69955194	100,13936360	108,81249143	116,75288757	124,00732552	130,65543408
464	90,70087004	100,00141890	108,54340089	116,36162796	123,50302681	130,04654926
465	90,69950319	99,85906437	108,26816984	115,96254724	122,98930651	129,42673064
466	90,71697151	99,73694072	108,01411939	115,58529758	122,49786323	128,82949411
467	90,77397863	99,65880009	107,80762610	115,25854206	122,05937033	128,28730032
468	90,88675910	99,64331638	107,66947783	115,00492006	121,69810202	127,82588198

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
469	91,06342594	99,69989561	107,61022951	114,83601266	121,42655946	127,45857130
470	91,30031812	99,82448619	107,62555896	114,74730803	121,24009688	127,18062723
471	91,59291661	100,01160970	107,70916584	114,73179270	121,13107592	126,98385735
472	91,96876447	100,29135460	107,89309561	114,82305221	121,13431884	126,90409829
473	92,43367539	100,67015330	108,18429805	115,02847660	121,25759523	126,94945161
474	92,96450083	101,12267380	108,55580786	115,31985040	121,47171357	127,08994737
475	93,51892117	101,60254810	108,95818814	115,64535604	121,72297160	127,27035901
476	94,04523684	102,05309910	109,33097384	115,94157722	121,94560674	127,42301827
477	94,49215947	102,41806910	109,61411525	116,14550232	122,07424641	127,48063009
478	94,81860302	102,65234690	109,75942145	116,20652777	122,05635847	127,38908749
479	95,00347491	102,73269620	109,74200381	116,09846146	121,86470157	127,12028652
480	95,05546718	102,66848270	109,57171941	115,83152613	121,50977551	126,68494112
481	94,99785675	102,48539620	109,27613194	115,43477535	121,02184221	126,11431370
482	94,80225299	102,15344730	108,82421363	114,87651411	120,36878894	125,37604288
483	94,46176066	101,66523330	108,20818954	114,14868853	119,54234890	124,46169596
484	94,00496017	101,05111150	107,45959799	113,28362101	118,57535957	123,40444184
485	93,48408392	100,36662920	106,63621581	112,34059204	117,52811124	122,26524193
486	92,96319265	99,67995413	105,80898362	111,39242200	116,47469550	121,11904109
487	92,50635177	99,05930480	105,04893113	110,51205301	115,48935379	120,04095855
488	92,16580777	98,56038057	104,41410242	109,75913069	114,63282581	119,09247879
489	91,97016449	98,21379201	103,93648120	109,16658598	113,93869809	118,30764254
490	91,91255954	98,01249120	103,60891610	108,72721700	113,39975250	117,67923762
491	91,96384779	97,92535017	103,39888430	108,40750497	112,98175065	117,17249923
492	92,14451814	97,97293249	103,32674336	108,22743808	112,70422087	116,80644868
493	92,46246560	98,16354541	103,40103497	108,19567760	112,57586934	116,58978835
494	92,89809797	98,47757480	103,60232914	108,29309663	112,57793711	116,50416017
495	93,41330984	98,87657734	103,89231197	108,48178944	112,67308753	116,51288600
496	93,96045657	99,31237271	104,22287352	108,71408089	112,81429353	116,56970794
497	94,49132829	99,73613572	104,54519548	108,94153578	112,95372504	116,62752874
498	94,96612385	100,10748860	104,81883909	109,12396824	113,05163635	116,64715209
499	95,36242485	100,40359290	105,02083280	109,23845109	113,08525342	116,60602302
500	95,68416961	100,62824210	105,15476016	109,28832527	113,05766132	116,50696819
501	95,95585195	100,80650730	105,24592528	109,29891258	112,99406551	116,37499389
502	96,17451418	100,93691660	105,29436420	109,27172335	112,89738681	116,21435793
503	96,33573724	101,01514340	105,29590974	109,20278556	112,76386481	116,02151705
504	96,44332725	101,04361880	105,25160077	109,09177851	112,59187913	115,79361968
505	96,50681706	101,02953740	105,16621906	108,94110083	112,38153321	115,52858349
506	96,53896782	100,98286300	105,04682618	108,75493854	112,13423795	115,22517280
507	96,55327056	100,91433390	104,90130028	108,53833309	111,85229546	114,88307614
508	96,56144773	100,83346900	104,73687302	108,29624941	111,53848274	114,50298371
509	96,57095480	100,74657300	104,55866639	108,03264397	111,19563543	114,08666488
510	96,58248178	100,65474240	104,36822957	107,74953279	110,82623149	113,63704568
511	96,58653248	100,54957940	104,15837684	107,44097313	110,42555416	113,15059599

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
512	96,56891342	100,41514150	103,91146132	107,08769351	109,97280419	112,60508613
513	96,52893560	100,25032620	103,62599039	106,68783797	109,46578937	111,99801271
514	96,47865465	100,06886170	103,31739563	106,25850667	108,92320835	111,34959098
515	96,43840132	99,89414525	103,01217559	105,82922476	108,37747812	110,69497665
516	96,43231210	99,75407979	102,74203857	105,43541127	107,86756160	110,07648767
517	96,48385978	99,67591168	102,53804541	105,11184810	107,43179515	109,53582605
518	96,61138400	99,68106795	102,42475233	104,88614884	107,10071613	109,10629961
519	96,82362186	99,77999371	102,41435366	104,77222779	106,88989038	108,80504383
520	97,11523845	99,96698950	102,50082467	104,76376880	106,79273984	108,62524360
521	97,47717512	100,23128090	102,67166131	104,84658349	106,79346908	108,54958304
522	97,93222561	100,59673000	102,95165357	105,04627570	106,91840132	108,60502785
523	98,48441445	101,06782690	103,34574751	105,36822801	107,17333082	108,79775845
524	99,11130378	101,62114230	103,82966395	105,78742288	107,53259242	109,10153510
525	99,77288795	102,21469610	104,35968650	106,25860569	107,94956097	109,46850094
526	100,42048806	102,79732480	104,88244945	106,72644794	108,36715075	109,83998508
527	101,00564653	103,31804900	105,34472585	107,13571037	108,72831488	110,15730563
528	101,48902169	103,73544150	105,70321539	107,44140608	108,98654470	110,37257278
529	101,84928229	104,02699520	105,93433245	107,61896369	109,11636926	110,45949186
530	102,09200213	104,19849020	106,04399403	107,67439047	109,12385465	110,42416637
531	102,23754107	104,27153140	106,05493594	107,63144917	109,03369609	110,29214205
532	102,26350100	104,22341320	105,94440927	107,46750887	108,82347720	110,04127366
533	102,16265800	104,04661470	105,70463589	107,17456593	108,48499512	109,66318057
534	101,95501273	103,76137610	105,35581840	106,77261914	108,03794768	109,17720462
535	101,67878180	103,40651870	104,93689571	106,30042671	107,52073272	108,62127696
536	101,38138901	103,03026520	104,49629857	105,80626318	106,98124738	108,04278490
537	101,11045664	102,68106060	104,08270515	105,33867632	106,46768736	107,48943877
538	100,90479678	102,39839210	103,73579659	104,93724409	106,01934622	107,00013869
539	100,78540258	102,20360960	103,47701257	104,62333155	105,65741471	106,59584145
540	100,74643956	102,09074620	103,30030687	104,39084779	105,37577998	106,27042736
541	100,76514766	102,03653710	103,18215292	104,21615966	105,15080163	106,00031226
542	100,85641295	102,05591560	103,13730021	104,11369862	104,99651915	105,79910567
543	101,02607597	102,15479410	103,17164663	104,08929642	104,91866806	105,67242983
544	101,25963906	102,31858420	103,27071026	104,12869336	104,90327621	105,60663521
545	101,52895743	102,51894230	103,40633583	104,20415110	104,92315169	105,57514628
546	101,79893022	102,72051450	103,54340137	104,28106564	104,94437072	105,54480724
547	102,03419152	102,88768220	103,64652477	104,32458018	104,93276551	105,48222784
548	102,20580144	102,99130690	103,68677028	104,30619805	104,86041221	105,36012905
549	102,29793712	103,01547590	103,64835516	104,21039560	104,71211872	105,16368892
550	102,31458385	102,96424710	103,53535620	104,04123512	104,49191264	104,89688825
551	102,27427828	102,85626000	103,36628003	103,81695221	104,21768068	104,57722327
552	102,17285751	102,68704150	103,13647433	103,53279996	103,88463664	104,19990472
553	102,00754181	102,45373960	102,84307852	103,18594812	103,49000380	103,76222294
554	101,78451508	102,16279970	102,49268367	102,78305862	103,04046654	103,27085338

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
555	101,51610689	101,82703170	102,09834308	102,33727759	102,54916769	102,73887427
556	101,21797436	101,46267600	101,67658277	101,86522736	102,03270583	102,18278434
557	100,90628422	101,08647080	101,24441204	101,38399846	101,50813258	101,61952053
558	100,59489470	100,71271830	100,81633394	100,90814162	100,98994993	101,06347567
559	100,29253756	100,35035130	100,40135585	100,44665977	100,48710753	100,52351623
560	100,00000000	100,00000000	100,00000000	100,00000000	100,00000000	100,00000000
561	99,70802852	99,65206053	99,60254605	99,55847094	99,51905411	99,48352611
562	99,40627618	99,29639964	99,19925211	99,11281731	99,03554609	98,96591859
563	99,09493153	98,93319519	98,79033559	98,66332520	98,54984680	98,44764136
564	98,78318368	98,57124208	98,38416552	98,21793187	98,06947061	97,93580143
565	98,48598851	98,22484287	97,99431036	97,78944551	97,60647145	97,44171980
566	98,22083492	97,91069845	97,63658571	97,39276509	97,17483894	96,97850250
567	98,00451099	97,64479861	97,32610209	97,04210010	96,78789437	96,55861144
568	97,84987021	97,43931270	97,07431269	96,74819043	96,45568688	96,19143547
569	97,76259770	97,29948024	96,88606114	96,51552611	96,18238949	95,88086126
570	97,73797642	97,22050159	96,75662924	96,33956715	95,96369515	95,62284430
571	97,77180498	97,19839003	96,68228699	96,21685771	95,79642505	95,41447816
572	97,89150398	97,26043554	96,68960203	96,17290755	95,70485387	95,27871803
573	98,10216089	97,41153566	96,78323872	96,21212888	95,69313730	95,21946624
574	98,37964438	97,62743845	96,93944777	96,31163658	95,73945327	95,21606605
575	98,68055835	97,86467693	97,11575130	96,43055241	95,80485507	95,23166920
576	98,95219592	98,07050360	97,26062787	96,51930929	95,84212443	95,22160355
577	99,14249345	98,19282490	97,32319752	96,52895549	95,80462468	95,14174058
578	99,20998458	98,19013572	97,26290678	96,42045887	95,65515379	94,95686298
579	99,13375422	98,04145385	97,05921373	96,17401113	95,37479752	94,64903220
580	98,92339257	97,75625446	96,72127304	95,79833203	94,97178250	94,22595605
581	98,60189642	97,35753073	96,27152603	95,31499646	94,46664747	93,70705280
582	98,13573989	96,81219851	95,67801569	94,69355430	93,83064062	93,06535175
583	97,51756951	96,11299388	94,93370189	93,92726345	93,05735522	92,29479758
584	96,78105015	95,29324158	94,07081887	93,04684750	92,17578784	91,42256182
585	95,98715635	94,41330221	93,14776955	92,10799953	91,23853440	90,49796795
586	95,21046362	93,54701945	92,23601992	91,17888582	90,30998618	89,58141654
587	94,52543981	92,76816726	91,40699329	90,32764961	89,45452585	88,73331031
588	93,99273638	92,13689711	90,71896463	89,60991486	88,72472350	88,00297928
589	93,64547980	91,68618517	90,20395490	89,05628997	88,14953266	87,41760587
590	93,47556279	91,40827953	89,85462537	88,65987155	87,72248632	86,97114997
591	93,44890878	91,26953948	89,63844768	88,38961833	87,41421923	86,63600404
592	93,58882149	91,29244398	89,57672577	88,26548381	87,24326510	86,42927068
593	93,90394187	91,48563826	89,67785790	88,29547491	87,21716143	86,35797906
594	94,37098847	91,82696720	89,92099879	88,46012662	87,31782687	86,40540148
595	94,94514064	92,27348249	90,26555242	88,72141262	87,50986458	86,53874773
596	95,57042174	92,77144982	90,66066477	89,03165581	87,74886563	86,71685934
597	96,19008234	93,26635603	91,05471657	89,34243894	87,98971236	86,89790391

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
598	96,75698348	93,71291630	91,40481608	89,61351514	88,19488174	87,04706939
599	97,24397980	94,08508135	91,68629183	89,82171856	88,34274878	87,14425838
600	97,65430284	94,38604454	91,90218539	89,96987487	88,43588988	87,19178244
601	98,01397934	94,64105838	92,07654763	90,08061206	88,49541444	87,20920662
602	98,31492565	94,84278283	92,20276941	90,14802148	88,51607506	87,19190433
603	98,54941091	94,98387672	92,27393903	90,16563166	88,49183430	87,13425815
604	98,72159909	95,06807434	92,29330691	90,13619143	88,42494303	87,03803484
605	98,84376651	95,10666652	92,27106104	90,06874907	88,32332025	86,91005703
606	98,93251937	95,11498180	92,22110236	89,97573149	88,19793304	86,75987493
607	99,00501121	95,10886755	92,15782021	89,87002334	88,06017638	86,59743801
608	99,07516047	95,10117108	92,09286775	89,76204625	87,91925305	86,43076668
609	99,14986794	95,09822079	92,03193740	89,65683789	87,77955353	86,26362396
610	99,22523434	95,09630729	91,97153625	89,55113122	87,63803580	86,09318720
611	99,29112418	95,08581872	91,90274782	89,43678748	87,48736721	85,91292920
612	99,35471445	95,07297530	91,83110550	89,31883780	87,33220574	85,72722588
613	99,41883754	95,06023994	91,75878150	89,19922040	87,17429755	85,53766257
614	99,47708346	95,04180438	91,68046120	89,07303357	87,00909183	85,33999158
615	99,51702606	95,00647709	91,58596106	88,93093344	86,82795541	85,12619170
616	99,52344911	94,94057126	91,46284667	88,76153155	86,62038735	84,88652771
617	99,48157248	94,83079272	91,29905069	88,55379262	86,37623353	84,61160989
618	99,38027830	94,66712786	91,08549083	88,29943216	86,08790122	84,29445350
619	99,21533709	94,44573161	90,81868786	87,99531420	85,75257368	83,93253831
620	98,99263392	94,17181534	90,50338355	87,64584891	85,37442476	83,52986810
621	98,71889309	93,85145416	90,14511599	87,25612194	84,95815323	83,09080567
622	98,37317406	93,46624332	89,72724859	86,81074561	84,48926201	82,60149508
623	97,95253249	93,01361587	89,24750770	86,30767963	83,96590018	82,06024232
624	97,47826787	92,51239289	88,72301321	85,76286557	83,40318957	81,48159742
625	96,98765117	91,99549146	88,18367036	85,20410218	82,82744514	80,89082348
626	96,52565256	91,50263254	87,66556161	84,66492063	82,27039531	80,31836578
627	96,13666905	91,07304889	87,20433845	84,17845986	81,76340228	79,79432080
628	95,85625222	90,73819301	86,82861327	83,77134178	81,33168241	79,34290526
629	95,70283588	90,51444506	86,55335115	83,45754666	80,98852655	78,97692520
630	95,66946375	90,39582074	86,37326175	83,23228832	80,72952037	78,69224506
631	95,73835903	90,36663281	86,27410705	83,08234574	80,54216215	78,47687567
632	95,93960190	90,45293126	86,27905724	83,02879446	80,44598072	78,34918484
633	96,28058877	90,66123923	86,39401171	83,07708047	80,44608751	78,31403301
634	96,73355630	90,96762513	86,59776007	83,20795833	80,52467581	78,35468298
635	97,24734280	91,32788413	86,85103827	83,38573194	80,64866225	78,43999368
636	97,75914981	91,68771963	87,10558477	83,56649536	80,77732819	78,53161402
637	98,20630357	91,99292472	87,31319667	83,70637358	80,86996114	78,59117668
638	98,53801651	92,19956364	87,43478584	83,76976338	80,89349617	78,58749193
639	98,72714878	92,28415324	87,44943508	83,73757404	80,83015736	78,50374145
640	98,78196972	92,25384446	87,36345425	83,61546821	80,68509921	78,34467216

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
641	98,73194835	92,13424435	87,19968322	83,42426667	80,47764613	78,12848049
642	98,55450142	91,90619661	86,94147080	83,14918805	80,19443807	77,84290851
643	98,24242696	91,56353659	86,58336490	82,78527418	79,83086094	77,48358245
644	97,81914064	91,12623359	86,14275027	82,34792680	79,40076420	77,06311055
645	97,32862550	90,63181659	85,65236033	81,86623582	78,93041478	76,60552608
646	96,82538176	90,12679994	85,15278894	81,37630760	78,45245097	76,14073043
647	96,36437659	89,65810915	84,68500219	80,91459331	77,99983624	75,69893613
648	95,99099391	89,26450657	84,28285016	80,51121716	77,59981318	75,30510990
649	95,73098419	88,96801712	83,96557873	80,18330471	77,26785730	74,97341576
650	95,58041416	88,76535406	83,73034135	79,92831120	77,00163100	74,70165800
651	95,51135314	88,63259640	83,55616656	79,72748177	76,78407701	74,47410623
652	95,52436926	88,56970425	83,44265091	79,58020871	76,61448799	74,29002262
653	95,62351765	88,58005724	83,39268286	79,48901593	76,49511252	74,15144371
654	95,80580397	88,66153234	83,40469576	79,45268546	76,42494232	74,05747737
655	96,06315102	88,80800341	83,47385704	79,46724041	76,40055973	74,00506296
656	96,38436523	89,01084091	83,59325740	79,52692794	76,41698513	73,98973146
657	96,75710330	89,26041146	83,75509994	79,62520224	76,46852435	74,00636563
658	97,16983868	89,54757754	83,95188934	79,75570748	76,54961617	74,04996022
659	97,61382819	89,86519710	84,17762101	79,91326080	76,65567969	74,11638207
660	98,08507852	90,20962317	84,42897028	80,09483526	76,78396180	74,20313029
661	98,58833122	90,58458016	84,70895497	80,30295185	76,93663121	74,31212175
662	99,13476360	91,00072060	85,02750486	80,54672030	77,12194120	74,45074990
663	99,72113373	91,45549134	85,38252197	80,82434230	77,33828798	74,61753390
664	100,32988153	91,93288856	85,75945970	81,12262345	77,57372476	74,80167879
665	100,93397224	92,40801016	86,13553679	81,42083031	77,80946096	74,98622474
666	101,50173986	92,85160826	86,48395110	81,69454745	78,02336157	75,15119634
667	102,00173061	93,23464156	86,77809353	81,91953445	78,19344637	75,27675188
668	102,40754641	93,53282782	86,99576184	82,07558293	78,30138926	75,34633255
669	102,70268835	93,73119627	87,12337455	82,15037360	78,33601752	75,34981181
670	102,88540012	93,82864004	87,16018478	82,14333329	78,29681113	75,28664456
671	102,96956502	93,83793908	87,11789889	82,06514608	78,19349352	75,16565528
672	102,96509581	93,76604534	87,00179826	81,92025512	78,03021011	74,99104355
673	102,87161535	93,61228633	86,81110987	81,70790784	77,80630316	74,76229174
674	102,68213534	93,37213833	86,54265372	81,42554821	77,51937623	74,47686285
675	102,38583925	93,03900076	86,19207236	81,06979890	77,16622040	74,13119441
676	101,97086520	92,60597065	85,75506052	80,63744329	76,74374046	73,72169234
677	101,42708876	92,06761697	85,22859460	80,12640764	76,24988112	73,24572489
678	100,74890590	91,42175511	84,61216227	79,53674313	75,68455321	72,70261652
679	99,93801584	90,67122123	83,90899204	78,87160797	75,05055987	72,09464180
680	99,00620389	89,82564670	83,12728281	78,13824950	74,35452279	71,42801928
681	97,95832101	88,88801346	82,26909896	77,33841852	73,59826284	70,70488318
682	96,75358857	87,82592711	81,30766668	76,44911568	72,76130039	69,90641417
683	95,39054616	86,63887425	80,24301407	75,47064852	71,84405178	69,03302598

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
684	93,91590993	85,36486760	79,10726379	74,43113418	70,87191394	68,10827884
685	92,40818593	84,06733912	77,95371624	73,37704571	69,88678026	67,17102761
686	90,96128357	82,82203316	76,84593284	72,36375838	68,93855659	66,26756980
687	89,66812900	81,70389951	75,84681928	71,44609598	68,07667709	65,44379360
688	88,60427855	80,77398661	75,00770876	70,66887712	67,34162019	64,73732599
689	87,81153212	80,06633460	74,35744525	70,05746159	66,75642452	64,16968073
690	87,28154661	79,57486847	73,89146672	69,60829660	66,31820483	63,73840643
691	86,97344153	79,26640124	73,58171307	69,29673726	66,00457056	63,42257355
692	86,91242859	79,15783604	73,43948509	69,13029292	65,82047294	63,22542188
693	87,10693115	79,25532266	73,46942747	69,11261468	65,76891565	63,14954361
694	87,52819938	79,53836763	73,65664877	69,23263372	65,84143773	63,18824971
695	88,12206476	79,96812965	73,97268467	69,46894621	66,02143368	63,32817767
696	88,82069457	80,49571512	74,38146118	69,79419815	66,28747348	63,55189912
697	89,55434647	81,07047365	74,84525784	70,17947035	66,61662265	63,84052756
698	90,26312294	81,64829358	75,33067102	70,59866324	66,98776230	64,17632602
699	90,90872586	82,19989746	75,81457708	71,03288185	67,38490916	64,54531471
700	91,48621097	82,71913758	76,29009565	71,47482067	67,80053564	64,93987873
701	92,03249697	83,23371411	76,77868256	71,94168410	68,24895433	65,37237388
702	92,58867804	83,78594956	77,32317322	72,47637174	68,77284894	65,88509420
703	93,15270205	84,37558559	77,92449592	73,08059437	69,37443937	66,48058238
704	93,68586311	84,96255227	78,54197467	73,71354733	70,01309197	67,11856316
705	94,12604981	85,48115162	79,10802586	74,30684882	70,62032427	67,73090090
706	94,40099339	85,85424113	79,54285479	74,77947817	71,11480959	68,23655727
707	94,44151600	86,00741733	79,76915230	75,05271411	71,41738176	68,55654883
708	94,19477889	85,88319929	79,72679134	75,06507305	71,46603970	68,62890468
709	93,63753058	85,45521216	79,38752356	74,78724735	71,23095219	68,42362410
710	92,78935515	84,74237073	78,76967588	74,23704357	70,72946247	67,95763415
711	91,67610304	83,77356853	77,90393534	73,44613072	69,99368971	67,26315428
712	90,21521635	82,47091327	76,71607250	72,34322194	68,95475728	66,27332227
713	88,39555821	80,82285505	75,19434542	70,91652293	67,60090659	64,97647068
714	86,30248399	78,90955075	73,41486892	69,23893138	66,00242353	63,44072063
715	84,08543004	76,87210288	71,51217453	67,43967805	64,28418022	61,78728819
716	81,92550227	74,88179857	69,64977063	65,67596788	62,59817679	60,16379077
717	80,00306487	73,10934845	67,99070242	64,10462109	61,09608311	58,71755349
718	78,46532894	71,69412557	66,66811201	62,85371427	59,90178059	57,56891553
719	77,39394119	70,71340435	65,75579845	61,99422149	59,08390394	56,78453660
720	76,77257255	70,15159945	65,23877778	61,51165537	58,62838296	56,35070319
721	76,51971340	69,93103264	65,04247970	61,33401956	58,46538903	56,19944489
722	76,68058397	70,09351096	65,20613829	61,49856319	58,63060886	56,36519189
723	77,27344380	70,65627286	65,74618146	62,02105620	59,13926817	56,86271099
724	78,25005184	71,57459941	66,62054372	62,86147876	59,95295626	57,65488463
725	79,51683669	72,76153883	67,74728841	63,94178310	60,99670261	58,66922995
726	80,95606677	74,10763105	69,02322992	65,16365542	62,17605347	59,81441781

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
727	82,44702055	75,50063217	70,34255596	66,42627784	63,39414859	60,99679190
728	83,88715672	76,84523902	71,61544978	67,64409020	64,56879775	62,13688775
729	85,21328439	78,08281365	72,78671244	68,76455202	65,64955747	63,18595177
730	86,42273335	79,21110789	73,85438503	69,78590438	66,63480762	64,14246033
731	87,56994506	80,28091591	74,86646451	70,75394803	67,56858941	65,04901469
732	88,66929470	81,30526454	75,83497506	71,67994474	68,46157339	65,91581722
733	89,70449390	82,26903893	76,74568143	72,55033371	69,30072638	66,73025635
734	90,64748942	83,14665659	77,57482282	73,34272678	70,06471436	67,47182442
735	91,46310917	83,90622046	78,29290699	74,02943544	70,72722730	68,11528645
736	92,11370833	84,51367210	78,86850420	74,58099782	71,26030408	68,63384902
737	92,56381531	84,93694479	79,27204129	74,96970572	71,63765730	69,00232905
738	92,78477792	85,15011665	79,47959569	75,17313158	71,83799818	69,20032269
739	92,75940930	85,13756383	79,47668943	75,17765551	71,84836140	69,21537414
740	92,48663408	84,89811358	79,26208318	74,98199228	71,66743002	69,04614446
741	91,98137325	84,44522101	78,84815940	74,59772278	71,30617482	68,70313077
742	91,25420748	83,78922734	78,24506128	74,03482346	70,77442976	68,19604329
743	90,31024286	82,93493363	77,45735667	73,29767961	70,07643428	67,52900243
744	89,15301503	81,88498318	76,48704267	72,38781103	69,21334956	66,70289485
745	87,78615803	80,64164014	75,33539780	71,30577370	68,18519318	65,71732979
746	86,21507326	79,20856807	74,00483418	70,05306132	66,99277373	64,57259550
747	84,44859841	77,59260864	72,50074977	68,63400701	65,63962543	63,27161566
748	82,50067638	75,80556023	70,83338049	67,05768486	64,13394280	61,82190579
749	80,39202417	73,86595651	69,01965246	65,33981156	62,49051524	60,23752963
750	78,15180185	71,80084514	67,08503416	63,50464803	60,73266170	58,54105557
751	75,77672214	69,60785761	65,02781820	61,55097152	58,85952058	56,73189593
752	73,15985307	67,18816635	62,75521859	59,39060247	56,78649451	54,72829860
753	70,29655069	64,53742337	60,26310994	57,01958674	54,50976385	52,52655181
754	67,30157268	61,76182641	57,65130393	54,53286310	52,12047469	50,21478660
755	64,36778133	59,03990042	55,08762764	52,09009420	49,77193418	47,94125683
756	61,72484660	56,58427897	52,77200175	49,88149759	47,64680578	45,88261910
757	59,59794909	54,60348574	50,90051886	48,09367672	45,92430462	44,21221270
758	58,16648312	53,26371593	49,62952171	46,87545195	44,74739270	43,06833955
759	57,52275969	52,65061777	49,03968149	46,30369154	44,18997429	42,52254419
760	57,63070955	52,73107395	49,10007605	46,34914266	44,22409111	42,54789367
761	58,39958383	53,42099952	49,73159790	46,93650066	44,77740220	43,07440621
762	59,97839486	54,85719449	51,06197573	48,18660438	45,96541000	44,21336339
763	62,39888135	57,06898891	53,11874650	50,12562569	47,81322648	45,98903670
764	65,51285374	59,92041593	55,77502506	52,63357937	50,20621239	48,29101678
765	69,05190118	63,16504868	58,80072191	55,49279069	52,93631365	50,91886329
766	72,68709850	66,50083717	61,91376089	58,43636296	55,74839775	53,62675467
767	76,08871320	69,62494518	64,83129696	61,19664512	58,38659013	56,16813804
768	78,98591245	72,28858714	67,32093389	63,55369926	60,64061061	58,34037899
769	81,22647001	74,35186500	69,25194201	65,38376825	62,39210977	60,02941141

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
770	82,83647328	75,83860514	70,64647593	66,70774326	63,66100535	61,25438732
771	83,95882353	76,88017107	71,62732122	67,64188842	64,55850532	62,12251124
772	84,49800747	77,38967307	72,11395862	68,11049440	65,01260245	62,56468494
773	84,40870429	77,32553850	72,06759930	68,07688650	64,98825925	62,54716570
774	83,76904210	76,75867906	71,55383242	67,60264200	64,54397082	62,12603145
775	82,74048552	75,83595399	70,70873104	66,81569274	63,80140512	61,41803002
776	81,52772314	74,74363313	69,70495809	65,87842767	62,91504314	60,57142842
777	80,33855519	73,67086010	68,71787236	64,95579535	62,04181921	59,73686214
778	79,34378096	72,77311543	67,89163440	64,18340654	61,31076115	59,03818442
779	78,63708646	72,13567966	67,30531252	63,63563671	60,79263051	58,54331554
780	78,19493188	71,73709651	66,93898871	63,29372859	60,46956284	58,23509207
781	77,90781544	71,47747782	66,69988783	63,07028673	60,25831078	58,03353232
782	77,80319948	71,38128921	66,61029432	62,98597540	60,17831353	57,95713101
783	77,90239897	71,46786427	66,68808113	63,05756719	60,24549879	58,02115368
784	78,17523280	71,71016436	66,90850188	63,26202259	60,43812119	58,20485558
785	78,55666131	72,04975664	67,21795382	63,54934435	60,70892455	58,46310617
786	78,96342390	72,41179220	67,54774089	63,85543188	60,99730418	58,73801362
787	79,31067656	72,71998416	67,82783660	64,11493562	61,24146921	58,97054933
788	79,52862943	72,91158571	68,00064708	64,27411137	61,39060483	59,11217244
789	79,57918438	72,95236825	68,03477405	64,30367471	61,41703465	59,13645435
790	79,47257255	72,85159945	67,93877778	64,21165537	61,32838296	59,05070319
791	79,26065379	72,65609935	67,75577638	64,03839369	61,16286633	58,89147855
792	78,95425482	72,37596165	67,49528841	63,79294647	60,92916354	58,66714338
793	78,55087266	72,00904762	67,15543166	63,47361481	60,62570832	58,37622865
794	78,05107380	71,55571559	66,73643413	63,08054757	60,25260441	58,01881571
795	77,45802081	71,01848541	66,24038838	62,61555359	59,81147419	57,59640692
796	76,77699902	70,40170295	65,67100576	62,08191380	59,30530734	57,11179627
797	76,01494323	69,71120463	65,03337068	61,48419352	58,73830956	56,56894002
798	75,17996435	68,95398188	64,33369489	60,82805454	58,11575118	55,97282729
799	74,28087604	68,13784565	63,57907176	60,12006740	57,44381589	55,32935071
800	73,32672145	67,27109092	62,77723054	59,36752352	56,72944937	54,64517700
801	72,31361616	66,35044594	61,92532364	58,56787229	55,97031044	53,91811371
802	71,20622286	65,34367925	60,99345491	57,69301430	55,13971017	53,12260303
803	70,00438580	64,25059515	59,98140891	56,74272717	54,23742736	52,25843011
804	68,74779791	63,10738997	58,92275936	55,74857216	53,29344774	51,35432066
805	67,50232441	61,97416320	57,87327444	54,76298813	52,35759927	50,45801092
806	66,34632641	60,92242878	56,89932202	53,84838555	51,48918741	49,62631755
807	65,35698455	60,02262635	56,06627495	53,06624045	50,74663040	48,91520757
808	64,59662252	59,33163243	55,42691633	52,46618839	50,17709454	48,36986831
809	64,09903075	58,88027169	55,00984477	52,07511844	49,80612948	48,01477730
810	63,85578995	58,66082817	54,80787968	51,88626717	49,62730345	47,84377224
811	63,83310452	58,64241859	54,79233418	51,87264289	49,61495977	47,83227052
812	64,05746628	58,84921983	54,98564274	52,05533800	49,78913616	47,99946311

Wave-length / nm	D50	D55	D60	D65	D70	D75
813	64,53567391	59,28742524	55,39354566	52,43974602	50,15495531	48,35025663
814	65,23699670	59,92895651	55,98996703	53,00133801	50,68910782	48,86232391
815	66,10517935	60,72242784	56,72719401	53,69523643	51,34894934	49,49481759
816	67,07044691	61,60411005	57,54605632	54,46578900	52,08159766	50,19708378
817	68,06150958	62,50889468	58,38610556	55,25614260	52,83302983	50,91737566
818	69,01756765	63,38125818	59,19579466	56,01781706	53,55717927	51,61156710
819	69,90031637	64,18622597	59,94265722	56,72027911	54,22503287	52,25186630
820	70,70595075	64,92033660	60,62348693	57,36051618	54,83372811	52,83552937
821	71,44946287	65,59729783	61,25101843	57,95050828	55,39464780	53,37345633
822	72,08799847	66,17798375	61,78893192	58,45609678	55,87533159	53,83455020
823	72,59574341	66,63884178	62,21537333	58,85673278	56,25625384	54,20010484
824	72,97993651	66,98651827	62,53653376	59,15824928	56,54296011	54,47543019
825	73,26938141	67,24736372	62,77690399	59,38369404	56,75735557	54,68150714
826	73,50295842	67,45693800	62,96952902	59,56416245	56,92899338	54,84664243
827	73,71813639	67,64951559	63,14626248	59,72963037	57,08636304	54,99812360
828	73,93948458	67,84759083	63,32802126	59,89978700	57,24817880	55,15387387
829	74,16718450	68,05138318	63,51503987	60,07486770	57,41466799	55,31410708
830	74,36554178	68,22834239	63,67712507	60,22648691	57,55885943	55,45298256

ANNEXE V

CALCULATION OF THE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF A PHASE OF DAYLIGHT WITH ARBITRARY EQUALLY SPACED SAMPLING

As shown by Equation 1 of the present report the spectral power distribution (SPD) can be composed by proper weighting of three eigenvectors:

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda)$$

The eigenvectors, calculated from the original 10 nm spaced tables to 1 nm values, interpolated by Sprague interpolation, are reproduced in Table 1 of the present report.

The factors M_1 and M_2 depend on one side on the chromaticity co-ordinates of the phase of daylight, and CIE Publication 15:2004 contains these for the original 10 nm steps. For other wavelength intervals it is necessary to exchange the numbers in Equations 2 and 3 of the present report with other values. The steps required to obtain the proper numbers are described in the following:

A general form for factors M_1 and M_2 is:

$$M_n = \frac{g_n x_D + h_n y_D + i_n}{j x_D + k y_D + l}$$

where n = 1 stands for M_1 (Equation 2 of present report) and n = 2 for M_2 (Equation 3 of present report).

g_1, h_1, i_1, g_2, h_2, i_2, j, k and l are obtained as the tristimulus values of the $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ functions in the following form:

$$g_1 = B_0 D_2 - B_2 D_0$$

$$h_1 = A_2 D_0 - A_0 D_2$$

$$i_1 = A_0 B_2 - A_2 B_0$$

$$g_2 = B_1 D_0 - B_0 D_1$$

$$h_2 = A_0 D_1 - A_1 D_0$$

$$i_2 = A_1 B_0 - A_0 B_1$$

$$j = B_2 D_1 - B_1 D_2$$

$$k = A_1 D_2 - A_2 D_1$$

$$l = A_2 B_1 - A_1 B_2$$

where

$$A_i = \sum_{\lambda=380\,\mathrm{nm}}^{780\,\mathrm{nm}} S_i(\lambda)\overline{x}(\lambda)\mathrm{d}\lambda = \langle S_i, \overline{x} \rangle$$

$$B_i = \sum_{\lambda=380\,\mathrm{nm}}^{780\,\mathrm{nm}} S_i(\lambda)\overline{y}(\lambda)\mathrm{d}\lambda = \langle S_i, \overline{y} \rangle$$

$$C_i = \sum_{\lambda=380\,\text{nm}}^{780\,\text{nm}} S_i(\lambda)\bar{z}(\lambda)\mathrm{d}\lambda = \langle S_i, \bar{z} \rangle$$

for i = 0, 1 and 2.

Using the abbreviation introduced in Equation A.12 to A.14 above all the sums are abbreviated in a similar form as:

$$A_0 = \langle S_0, \bar{x} \rangle, \qquad A_1 = \langle S_1, \bar{x} \rangle, \qquad A_2 = \langle S_2, \bar{x} \rangle,$$

$$B_0 = \langle S_0, \bar{y} \rangle, \qquad B_1 = \langle S_1, \bar{y} \rangle, \qquad B_2 = \langle S_2, \bar{y} \rangle,$$

$$C_0 = \langle S_0, \bar{z} \rangle, \qquad C_1 = \langle S_1, \bar{z} \rangle, \qquad C_2 = \langle S_2, \bar{z} \rangle,$$

$$D_0 = A_0 + B_0 + C_0, \qquad D_1 = A_1 + B_1 + C_1, \qquad D_2 = A_2 + B_2 + C_2$$

By the use of these values for any correlated colour temperature, T_{cp}, and step size, the coefficients M_1 and M_2 can be determined, and the spectral power distribution of the phase of daylight can be calculated using Equation A.1.

Table A.1 contains values of the coefficients defined in Equations A.3 to A.11 for the CIE 1931 standard observer for both 1 nm and 5 nm step-size tables.

An Excel® file can be downloaded at http://www.cie.co.at/index.php/DOWNLOADS/TC1-74 that will provide the SPD of the daylight illuminant for the different interpolation methods described in this report after input of a required CCT.

Table A.1 – Values of coefficients for the calculation of M_1 and M_2, for CIE 1931 standard observers (1 nm standard tables) using the Sprague interpolated $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ and $S_2(\lambda)$ functions both for 1 nm and 5 nm sampling

Coefficient	CIE 1931 Standard Observer 1 nm sampling	CIE 1931 Standard Observer 5 nm sampling
g_1	-1,778 78	-1,778 71
h_1	5,907 89	5,907 85
i_1	-1,346 85	-1,346 85
g_2	-31,442 47	-31,442 79
h_2	30,063 22	30,063 28
i_2	0,035 78	0,035 85
j	0,255 36	0,255 36
k	-0,732 11	-0,732 12
l	0,023 87	0,023 87

ANNEXE VI

CERTIFICAT DE CALIBRATION DE SPECTRASUITE

Ocean Optics, Inc.
Calibration Laboratories Located in:
Dunedin, Florida
Winter Park, Florida
Ostfidern, Germany
Shanghai, PRC

Certificate of Calibration

Date: 5/14/2012 **Certificate #: 12525**

Calibration Performed By:
OOI WINTER PARK
4301 METRIC DRIVE
WINTER PARK, FL 32792

For:

Equipment Information

Serial Number:	LSCI1994	Manufacturer:	OCEAN OPTICS INC.
Description:	RADIOMETRIC CALIBRATION STANDARD: VIS-NIR		
Model Number:	LS-1-CAL-INT	Performed By:	BERNARDA CYGAN
Nomenclature	LIGHT SOURCE	Signature:	
Temp./RH:	74 F / 53		
Cal. Interval:	50 HOURS	Calibration Result:	PASS
Cal Date:	5/14/2012		
Cal. Due Date:			

As Found and **As Left** data are the same unless indicated otherwise in Calibration Notes.

Calibration Notes
Recalibration recommended after 50 hours of use.
Calibrated Range: 300-1050 nm.

Standards Used To Calibrate Equipment

ID	Model Number	Description	Last Cal.	Cal. Due Date
11066045	TH803	TEMPERATURE / HUMIDITY RECORDER	2/24/2012	8/24/2012
HR+C1757	HR2000+	SPECTROMETER, HIGH RESOLUTION	5/14/2012	

Procedures Used In This Event:

Procedure	Title	Revision	Revision Date
MET.007	CAL OF LS-1-CAL-INT AND HL-2000-CAL-INT	0	6/4/2007

Ocean Optics Inc. is an ISO9001:2008 certified company. All radiometric calibrations were performed in compliance with National Institute of Standards & Technology practices recommended in NIST Handbook 150-2E, Technical Guide for Optical Radiation Measurements. All standards used are traceable to the National Institute of Standards & Technology; or an equivalent national organization, if the standard was calibrated outside the US; or have been derived from accepted values of naturally occurring physical constants. Ocean Optics Inc. responsibilities shall in no event, nor for cause whatsoever exceed the cost of the service represented. This report applies only to the item(s) identified above, at the time of calibration. This report shall not be reproduced, except in full, without written permission from Ocean Optics Inc.

ANNEXE VII

QUELQUES SECTIONS DES FICHES TECHNIQUES DES DELs COMPOSANT LE SIMULATEUR SOLAIRE D65 A QUATORZE DELs

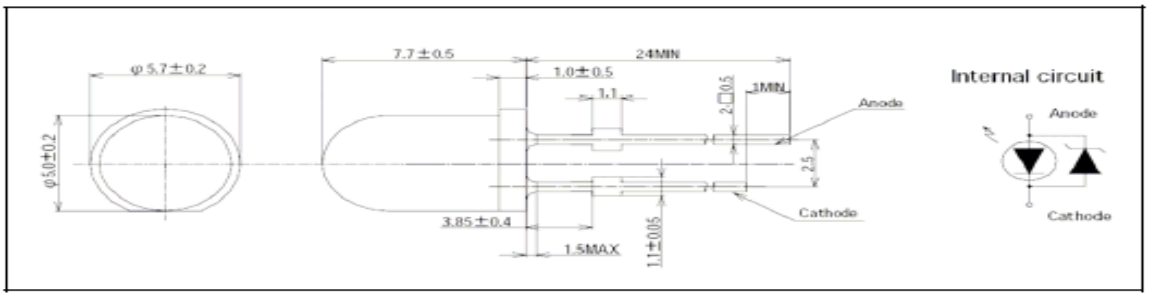
ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

XSL-365-5E

TECHNICAL DATA

UV LED 5 mm

Drawing



Absolute Maximum Ratings (T_a=25°C)

Item	Symbol	Value	Unit
DC Forward Current	I_F	25	mA
Peak Pulse Forward Current *1	I_{FP}	100	mA
Power Dissipation	P_D	100	mW
Operating Temperature	T_{OP}	-30 … +80	°C
Storage Temperature	T_{STG}	-30 … +85	°C
Soldering Temperature *2	T_{SOL}	260	°C

*1 pulse width ≤ 0.1 ms, duty ratio ≤ 1/10
*2 for 10 sec.

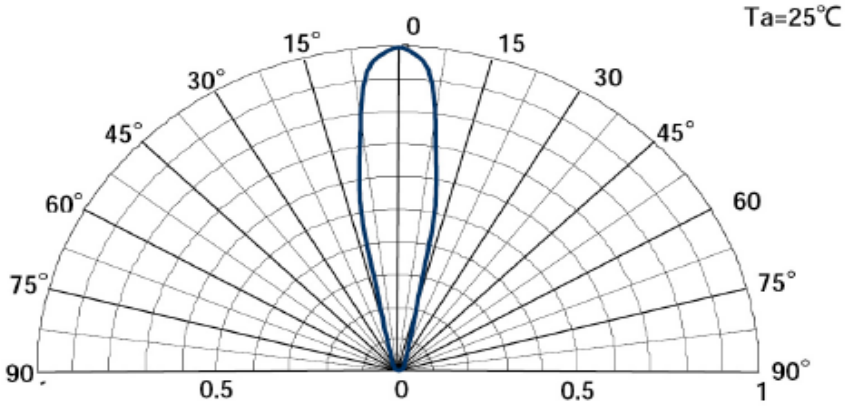
Specifications (If=20mA, T_a=25°C)

Item	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Electrical Specification					
Forward Voltage *1	U_F	3.2	3.6	4.2	V
Optical Specification					
Optical Power	P_O	2.4	-	6.0	mW
Peak Wavelength *2	λ_P	363	-	370	nm
Spectral Half Width (FWHM)	λ	10	-	20	nm
Viewing Angle	φ		15		deg.

* Note:
1. measurement tolerance is ± 0.2 V
2. measurement tolerance is ± 2 nm

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

directivity:



Device Materials

Item	Material
Encapsulation	Silicone Resin
Lead frame	Fe + Ag coating
XSL-365-5E is RoHS compliant	

Precaution for Use

1. Cautions

- This device is a UV LED, which radiates intense UV light during operation.
- DO NOT look directly into the UV light or look through the optical system. To prevent inadequate exposure of UV radiation, wearing UV protective glasses is recommended

2. Lead Forming

- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

VL400-5-15

TECHNICAL DATA

UV LED, 5 mm InGaN

Features

- Zener diode is built in the protective circuit against static electricity
- Low Voltage DC Operated
- High Power Intensity
- Complies with RoHS Directive

Specifications (25°C)

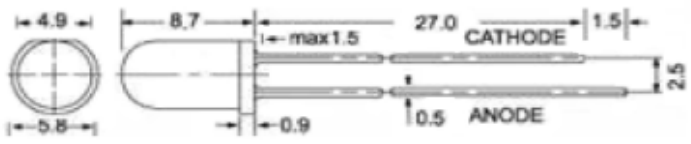
Item	Symbol	Value	Unit
Absolute Maximum Ratings			
DC Forward Current	I_F	30	mA
Peak Pulse Forward Current *	I_{FP}	100	mA
Allowable Reverse Current	I_R	50	mA
Power Dissipation	P_D	80	mW
Operating Temperature	T_{OP}	-40 ... +85	°C
Storage Temperature	T_{STG}	-40 ... +100	°C
Soldering Temperature (for 5 sec.)	T_{SOL}	260 ± 5	°C

* Note: 1/10 duty cycle, 0.1 ms pulse width

Item	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Optical Specifications					
CW Output Power *1	P_O	8.0	-	12.0	mW
Peak Wavelength *2	λ_P	395	400	405	nm
Viewing Angle	φ		15		deg.
Electrical Specifications					
Forward Current	I_F	-	20	-	mA
Forward Voltage *3	V_F	3.2	-	4.2	V

* Note:
1. Peak wavelength measurement allowance is ± 2 nm
2. Optical ouput measurement allowance is ± 10%
3. Forward voltage measurement allowance is ± 0.2 V

Outline Dimensons



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Reliability

1. Test item and result

No.	Test Item	Standard Test Methode	Test Conditions	Note	Sample	Pass
1	Steady State operating Life	Internal Ref.	I_F=20mA, Ta=25°C	1000 Hr	20	OK
2	Soldering Test	JEITA ED-4701 330 302	Tsol=260 ± 5°C, 3sec 3mm from the base of the epoxy bulb	2 Times	60	OK
3	Themal Shock	JESD22-A106-A	-40°C ... +85°C	84 Cycles	20	OK
4	Temperature Cycle	JESD22-A104-A	-35°C ... +75°C	168 Cycles	20	OK
5	High Temperature Storage	JESD22-A103-A	Tstg=100°C	1000 Hr	20	OK
6	Low Temperature Storage	Internal Ref.	Tstg=-40°C	1000 Hr	20	OK
7	High Temperature High Humidity	JESD22-A101-B	Ta=85°C, RH=85%	1000 Hr	20	OK
8	On-Off Test	Internal Ref.	2sec ON, 2sec OFF I_F=20mA	100000 cycle	20	OK

2. Criteria for judging the damage

Item	Symbol	Test Conditions	Criteria for Judgment	
			Min.	Max.
Forward Voltage	V_F	I_F=20mA	-	U.S.L x 1.1
Optical Power Ouput	P_O	I_F=20mA	L.S.L x 0.7	-

* Note:
1. U.S.L: Upper Standard Level
2. L.S.L: Lower Standard Level

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Precaution for Use

1. Cautions

- This device is a UV LED, which radiates UV light during operation.
- DO NOT look directly into the UV light or look through the optical system. To prevent in adequate exposure of UV radiation, wear UV protective glasses.

2. Lead Forming

- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.

3. Soldering Conditions

- Solder the LEDs no closer than 3 mm from the base of the lead.
- Recommended soldering conditions:

Dip Soldering	
Pre-Heat	120 °C Max.
Pre-Heat Time	60 Seconds Max.
Solder Bath Temperature	260 °C Max.
Dipping Time	5 Seconds Max.
Dipping Position	No lower than 3 mm from the base of the epoxy bulb

- DO NOT apply any stress to the lead particularly when heat.
- The LEDs must not be reposition after soldering.
- After soldering the LEDs, the lead should be protected from mechanical shock or vibration until the LEDs return to room temperature.
- When it is necessary to clamp the LEDs to prevent soldering failure, it is important to minimize the mechanical stress on the LEDs.
- Cut the LED leads at room temperature. Cutting the leads at high temperature may cause the failure of the LEDs.

4. Static Electricity

- The LEDs are very sensitive to Static Electricity and surge voltage. So it is recommended that a wrist band or an anti-electrostatic glove be used when handling the LEDs.
- All devices, equipment and machinery must be grounded properly. It is recommended that precautions should be taken against surge voltage to the equipment that mounts the LEDs.

5. Heat Generation

- The powered LEDs generate heat. Heat dissipation should be considered in the application design to avoid the environmental conditions for operation in excess of the absolute maximum ratings.

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

B5-433-B505

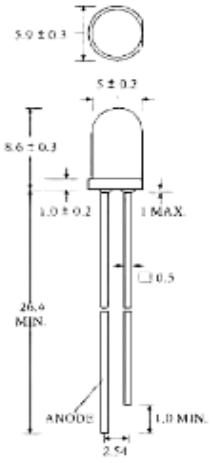
TECHNICAL DATA

LED, 5 mm InGaN

B5-433-B505 is a InGaN LED mounted on a lead frame with a clear epoxy lens.
On forward bias it emits a band of green light with a peak at 507 nm.

Specifications

- Structure: InGaN
- Peak Wavelength: typ. 507 nm
- Optical Output Power: typ. 8.5 cd
- Package: 5 mm clear epoxy



(Unit: mm)

Absolute Maximum Ratings (T_a=25°C)

Item	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation	P_D	120	mW
Forward Current	I_F	30	mA
Pulse Forward Current *1	I_{FP}	100	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{opr}	-40 ... +85	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ... +100	°C
Soldering Temperature *2	T_{sol}	260	°C

*1 1/10 duty cycle @ 1 KHz
*2 1.6mm from body, must be completed within 3 seconds

Electro-Optical Characteristics

Item	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	V_F	I_F = 20 mA	-	3.2	3.8	V
Reverse Current	I_R	V_R = 5 V	-	-	10	µA
Luminous Intensity	I_V	I_F = 20 mA	5.6	8.5	-	cd
Peak Wavelength	λ_P	I_F = 20 mA	-	507	-	nm
Dominant Wavelength	λ_D	I_F = 20 mA	-	505	-	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	I_F = 20 mA	-	30	-	nm
Viewing Angle *	$2\Theta_{1/2}$	I_F = 20 mA	-	15	-	deg.

* Tolerance: -10 / +5 deg.

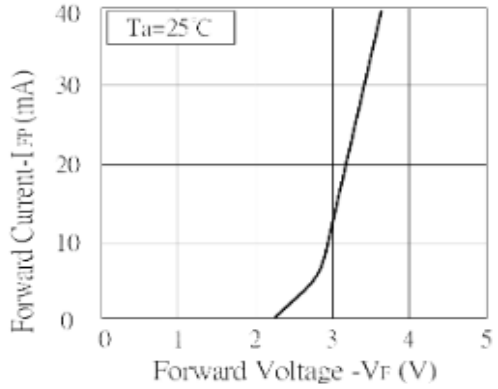
Notes

- Do not view directly into the emitting area of the LED during operation!
- The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.

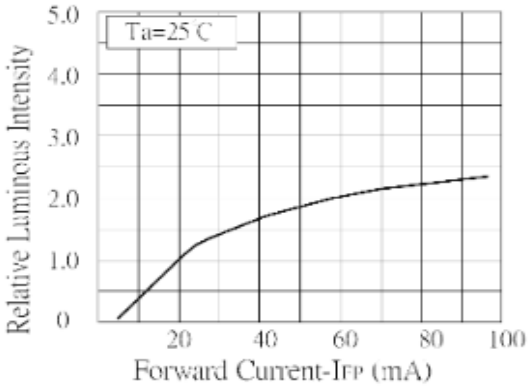
ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Typical Performance Curves

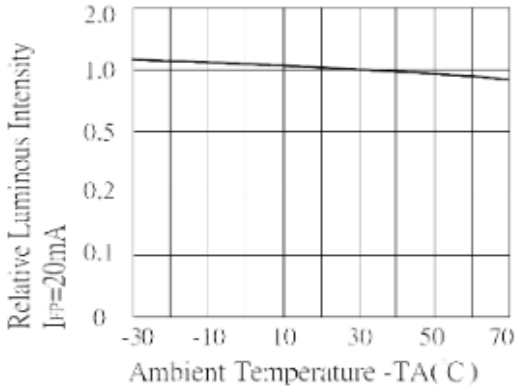
Forward Current – Forward Voltage



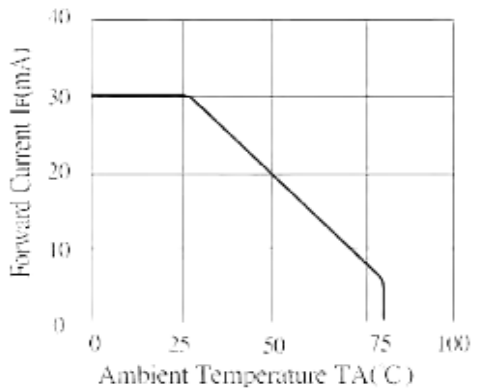
Luminous Intensity –Forward Current



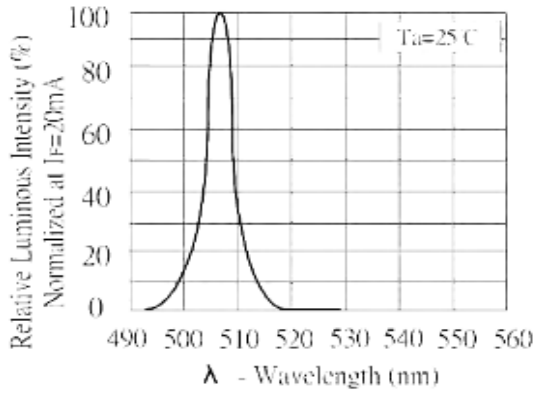
Luminous Intensity – Ambient Temperature



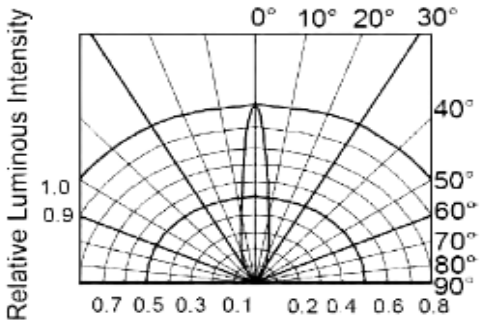
Max. Forward Current – Ambient Temperature



Peak Wavelength



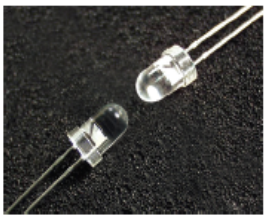
Radiation Diagram



Cree® 5-mm Blue and Green Round LED
C503B-BAS/BAN/GAS/GAN (15 degrees)
C503B-BCS/BCN/GCS/GCN (30 degrees)
Data Sheet

Round LEDs offer superior light output for excellent readability in sunlight and dependable performance. They provide extremely stable light output over long periods of time.

These lamps are made with an advanced optical-grade epoxy offering superior high-temperature and high-moisture-resistance performance in outdoor signal and sign applications.



- FEATURES
- Size (mm): 5
- Color and Typical Dominant Wavelength (nm):
  - Blue (470)
  - Green (527)
- Luminous Intensity (mcd)
  - C503B-BAS/BAN (5860-32900)
  - C503B-BCS/BCN (2130-12000)
  - C503B-GAS/GAN (16800-90500)
  - C503B-GCS/GCN (5860-32900)
- Viewing Angle:
  - C503B-BAS/BAN/GAS/GAN: 15 degrees
  - C503B-BCS/BCN/GBS/GBN: 30 degrees
- Lead-Free
- RoHS-Compliant

APPLICATIONS

- Electronic Signs & Signals (ESS)
- Motorway Signs
- Variable-Message Sign (VMS)
- Advertising Signs
- Petrol Signs
- Amusement

Subject to change without notice.
www.cree.com/ledlamps

Absolute Maximum Ratings (T_A = 25°C)

Items	Symbol	Absolute Maximum Rating	Unit
		Blue/Green	
Forward Current	I_F	25	mA
Peak Forward Current Note1	I_{FP}	100	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Power Dissipation	P_D	100	mW
Operation Temperature	T_{opr}	-40 ~ +95	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +100	°C
Lead Soldering Temperature	T_{sol}	Max. 260°C for 3 sec. max. (3 mm from the base of the epoxy bulb)	

Note:
1. Pulse width ≤0.1 msec, duty ≤1/10.

Typical Electrical & Optical Characteristics (T_A = 25°C)

Characteristics	Color		Symbol	Condition	Unit	Minimum	Typical	Maximum
Forward Voltage	Blue/Green		V_F	I_F = 20 mA	V		3.2	4.0
Reverse Current	Blue/Green		I_R	V_R = 5 V	μA			100
Dominant Wave-length	Blue		λ_D	I_F = 20 mA	nm	465	470	480
	Green		λ_D	I_F = 20 mA	nm	520	527	535
Luminous Intensity	Blue	C503B-BAS/BAN (15 degree)	I_V	I_F = 20 mA	mcd	5860	11000	
		C503B-BCS/BCN (30 degree)	I_V	I_F = 20 mA	mcd	2130	4100	
	Green	C503B-GAS/GAN (15 degree)	I_V	I_F = 20 mA	mcd	16800	34000	
		C503B-GCS/GCN (30 degree)	I_V	I_F = 20 mA	mcd	5860	12500	
50% Power Angle	C503B-BAS/BAN/GAS/GAN		$2\theta_{1/2}$	I_F = 20 mA	deg		15	
	C503B-BCS/BCN/GCS/GCN		$2\theta_{1/2}$	I_F = 20 mA	deg		30	

Copyright © 2009 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree and the Cree logo are registered trademarks of Cree, Inc.

Cree, Inc.
4600 Silicon Drive
Durham, NC 27703
USA Tel: +1.919.313.5300
Fax: +1.919.313.5778
www.cree.com/ledlamps

Intensity Bin Limit (I_F = 20 mA)

Blue

C503B-BAS/BAN (15 degree)

Bin Code	Min.(mcd)	Max.(mcd)
Y0	5860	8200
Z0	8200	12000
A0	12000	16800
B0	16800	23500
C0	23500	32900

C503B-BCS/BCN (30 degree)

Bin Code	Min.(mcd)	Max.(mcd)
V0	2130	3000
W0	3000	4180
X0	4180	5860
Y0	5860	8200
Z0	8200	12000

Green

C503B-GAS/GAN (15 degree)

Bin Code	Min.(mcd)	Max.(mcd)
B0	16800	23500
C0	23500	32900
D0	32900	46100
E0	46100	64600
F0	64600	90500

C503B-GCS/GCN (30 degree)

Bin Code	Min.(mcd)	Max.(mcd)
Y0	5860	8200
Z0	8200	12000
A0	12000	16800
B0	16800	23500
C0	23500	32900

Tolerance of measurement of luminous intensity is ±15%.

Color Bin Limit (I_F = 20 mA)

Blue

Bin Code	Min.(nm)	Max.(nm)
B4	465	470
B5	470	475
B6	475	480

Green

Bin Code	Min.(nm)	Max.(nm)
G7	520	525
G8	525	530
G9	530	535

Tolerance of measurement of dominant wavelength is ±1 nm.

Copyright © 2009 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree and the Cree logo are registered trademarks of Cree, Inc.

Cree, Inc.
4600 Silicon Drive
Durham, NC 27703
USA Tel: +1.919.313.5300
Fax: +1.919.313.5778
www.cree.com/ledlamps

Graphs

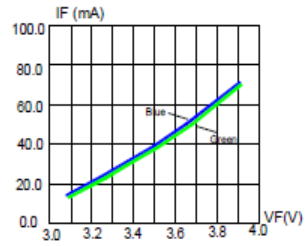


FIG.1 FORWARD CURRENT VS. FORWARD VOLTAGE.

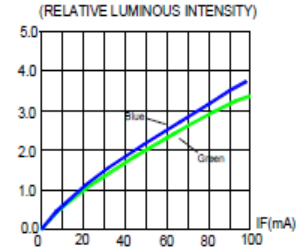


FIG.2 RELATIVE LUMINOUS INTENSITY VS. FORWARD CURRENT

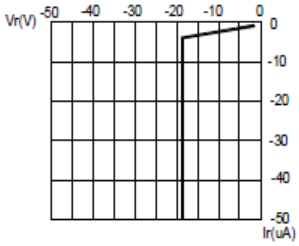


FIG.3 BLUE&GREEN REVERSE CURRENT VS. REVERSE VOLTAGE.

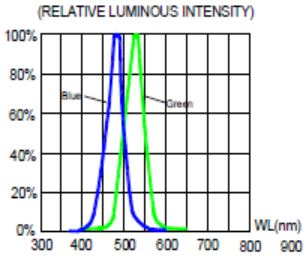


FIG.4 RELATIVE LUMINOUS INTENSITY VS. WAVELENGTH.

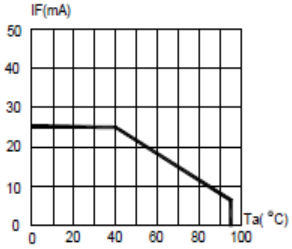


FIG.5 BLUE & GREEN MAXIMUM FORWARD DCCURRENT VS AMBIENT TEMPERATURE (Tjmax=105℃)

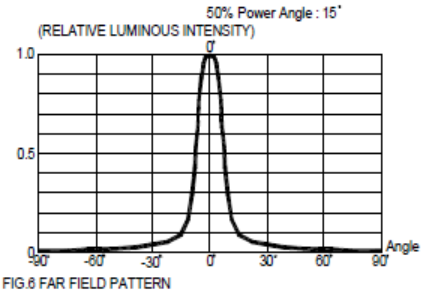


FIG.6 FAR FIELD PATTERN

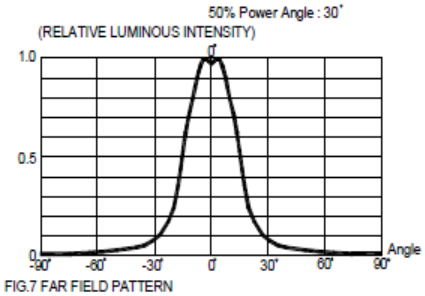


FIG.7 FAR FIELD PATTERN

The above data are collected from statistical figures that do not necessarily correspond to the actual parameters of each single LED. Hence, these data will be changed without further notice.

Copyright © 2009 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree and the Cree logo are registered trademarks of Cree, Inc.

Cree, Inc.
4600 Silicon Drive
Durham, NC 27703
USA Tel: +1.919.313.5300
Fax: +1.919.313.5778
www.cree.com/ledlamps

Round Through-Hole LED Lamp (5 mm)

TT electronics
OPTEK Technology

OVLFx3C7 Series

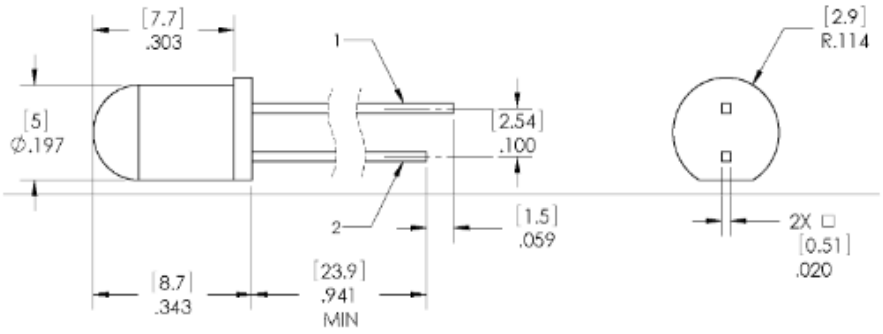
- High brightness with well-defined spatial radiation patterns
- UV-resistant epoxy lens
- 30° Beam Angle

Each device in the **OVLFx3C7** series is a high-intensity LED mounted in a clear plastic T-1¾ package. The LED provides a well-defined and even emission pattern. The UV-resistant epoxy lens makes this device an optimal solution for outdoor applications.

Applications

- Traffic and pedestrian signals
- Signage and architectural lighting
- Backlighting
- Automotive

Part Number	Material	Emitted Color	Intensity Typ. mcd	Lens Color
OVLFB3C7	InGaN	Blue	5,200	Clear
OVLFG3C7	InGaN	Green	16,000	Clear
OVLFR3C7	AlInGaP	Red	7,400	Clear
OVLFY3C7	AlInGaP	Yellow	7,400	Clear



1 ANODE 2 CATHODE DIMENSIONS ARE IN INCHES AND [MILLIMETERS].

RoHS

Leadframe material is iron alloy with tin-plated leads

ATTENTION
OBSERVE PRECAUTIONS FOR HANDLING ELECTROSTATIC SENSITIVE DEVICES

DO NOT LOOK DIRECTLY AT LED WITH UNSHIELDED EYES OR DAMAGE TO RETINA MAY OCCUR.

OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

OPTEK Technology Inc. — 1645 Wallace Drive, Carrollton, Texas 75006
Phone: (972) 323-2200 or (800) 341-4747 FAX: (972) 323-2396 visibleLED@optekinc.com www.optekinc.com

Round Through-Hole LED Lamp

OVLFx3C7 Series

TT electronics
OPTEK Technology

Absolute Maximum Ratings

T_A = 25° C unless otherwise noted

Storage Temperature Range		-40 ~ +100 ℃
Operating Temperature Range		-40 ~ +100 ℃
Reverse Voltage		5 V
Continuous Forward Current	Blue, Green	25 mA
	Red, Yellow	50 mA
Peak Forward Current (10% Duty Cycle, 1 kHz)	Blue, Green	100 mA
	Red, Yellow	100 mA
Power Dissipation	Blue, Green	100 mW
	Red, Yellow	120 mW
Current Linearity vs Ambient Temperature	Blue, Green	-0.29 mA/°C
	Red, Yellow	-0.72 mA/°C
Electrostatic Discharge Classification (JEDEC-JESD22-A114F)		Class 1C
LED Junction Temperature		125°C
Lead Soldering Temperature (4 mm from the base of the epoxy bulb)		260°C / 5 seconds

Electrical Characteristics

T_A = 25° C unless otherwise noted

SYMBOL	PARAMETER	COLOR	MIN	TYP	MAX	UNITS	CONDITIONS
I_V	Luminous Intensity	Blue	3,115	5,200	----	mcd	I_F = 20 mA
		Green	8,550	16,000	----		
		Red	4,360	7,400	----		
		Yellow	4,360	7,400	----		
V_F	Forward Voltage	Blue	2.6	3.4	4.0	V	I_F = 20 mA
		Green					
		Red	1.8	2.0	2.4		
		Yellow					
I_R	Reverse Current	Blue	----	----	10	µA	V_R = 5 V
		Green					
		Red					
		Yellow					
λ_D	Dominant Wavelength	Blue	460	470	475	nm	I_F = 20 mA
		Green	519	525	531		
		Red	620	623	630		
		Yellow	585	589	595		
Δλ	Spectra Half Width	Blue	----	25	----	nm	I_F = 20 mA
		Green					
		Red					
		Yellow					
2Θ½H-H	50% Power Angle		----	30	----	deg	I_F = 20 mA

OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

OPTEK Technology Inc. — 1645 Wallace Drive, Carrollton, Texas 75006
Phone: (972) 323-2200 or (800) 341-4747 FAX: (972) 323-2396 visibleLED@optekinc.com www.optekinc.com

Round Through-Hole LED Lamp

OVLFx3C7 Series

TT electronics
OPTEK Technology

Standard Bins

LEDs are sorted to luminous intensity (I_V), forward voltage (V_F) and dominant wavelength (nm) bins listed below. Each bag consists of a single intensity bin, single voltage bin and a single color bin. Orders are filled using all intensity and color bins listed in the following tables. Optek will not accept orders for single intensity bins, single voltage bins or single color bins.

Luminous Intensity (I_V) @ 20mA

BLUE: OVLFB3C7		
IV Code	Min (mcd)	Max (mcd)
0V	3,115	4,360
0W	4,360	6,105
0X	6,105	8,550
0Y	8,550	11,970

GREEN: OVLFG3C7		
IV Code	Min (mcd)	Max (mcd)
0Y	8,550	11,670
0Z	11,970	16,758
Z1	16,758	23,500
Z2	23,500	32,800

Forward Voltage (V_F)

BLUE: OVLFB3C7 & GREEN: OVLFG3C7		
VF Code	Min	Max
A	2.6	2.8
B	2.8	3.0
C	3.0	3.2
D	3.2	3.4
E	3.4	3.6
F	3.6	3.8
G	3.8	4.0

Dominant Wavelength (nm)

BLUE: OVLFB3C7		
Color Code	Min (nm)	Max (nm)
BC	460	465
BD	465	470
BE	470	475

GREEN: OVLFG3C7		
Color Code	Min (nm)	Max (nm)
FB	519	523
FC	523	527
FD	527	531

Luminous Intensity (I_V) @ 20mA

RED: OVLFR3C7		
IV Code	Min (mcd)	Max (mcd)
0W	4,360	6,105
0X	6,105	8,550
0Y	8,550	11,970
0Z	11,970	16,758

YELLOW: OVLFY3C7		
IV Code	Min (mcd)	Max (mcd)
0W	4,360	6,105
0X	6,105	8,550
0Y	8,550	11,970
0Z	11,970	16,758

Forward Voltage (V_F)

RED: OVLFR3C7 & YELLOW: OVLFY3C7		
VF Code	Min	Max
A	1.8	2.0
B	2.0	2.2
C	2.2	2.4

Dominant Wavelength (nm)

RED: OVLFR3C7		
Color Code	Min (nm)	Max (nm)
RA	620	625
RB	625	630

YELLOW: OVLFY3C7		
Color Code	Min (nm)	Max (nm)
YC	585	587
YD	587	589
YE	589	591
YF	591	593
YG	593	595

OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

Round Through-Hole LED Lamp
OVLFx3C7 Series

TT electronics
OPTEK Technology

Typical Electro-Optical Characteristics Curves (YELLOW)

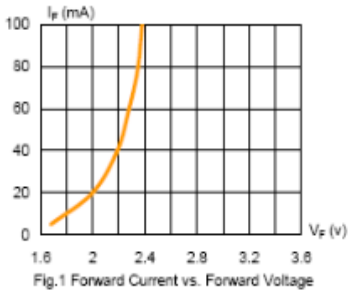


Fig.1 Forward Current vs. Forward Voltage

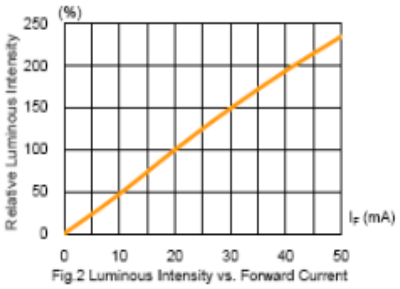


Fig.2 Luminous Intensity vs. Forward Current

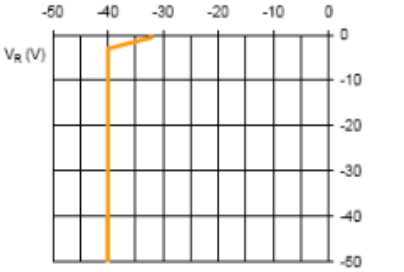


Fig.3 Reverse Current vs. Reverse Voltage

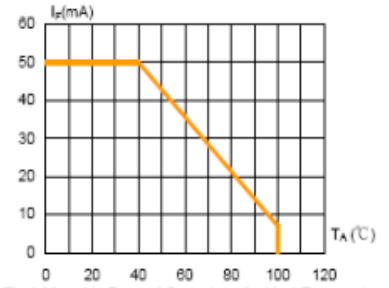


Fig.4 Allowable Forward Current vs. Ambient Temperature

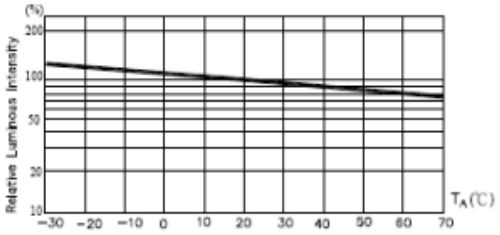


Fig.5 Luminous Intensity at I_F =20mA vs. Ambient Temperature

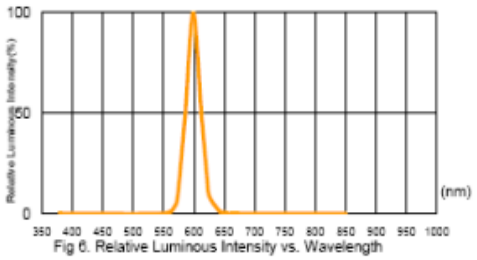


Fig 6. Relative Luminous Intensity vs. Wavelength

OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

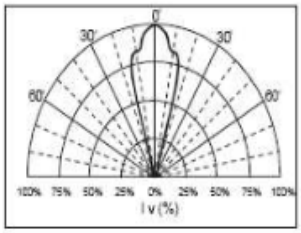
Round Through-Hole LED Lamp

OVLFx3C7 Series

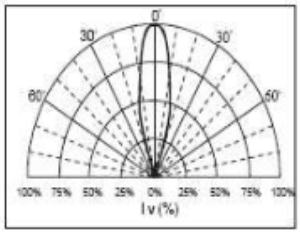
TT electronics
OPTEK Technology

Beam Pattern

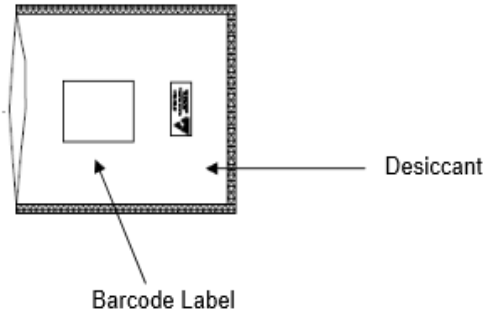
(RED) and (YELLOW)



(BLUE) and (GREEN)



Packaging: 500 pcs per bulk bag with desiccant



OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

OPTEK Technology Inc. — 1645 Wallace Drive, Carrollton, Texas 75006
Phone: (972) 323-2200 or (800) 341-4747 FAX: (972) 323-2396 visibleLED@optekinc.com www.optekinc.com

THORLABS

LEDRGBE

Ultra Bright Red, Green,

and Blue LED

Specifications and Documentation

Part 1. Introduction: LEDRGBE Red, Green, and Blue LED

The LEDRGBE emits light with spectral outputs centered at 620, 515, and 480 nm. This LED is composed of heterostructures (HS) grown on an InGaN substrate. The diode is encapsulated in a round clear epoxy casing with a 5 mm diameter.

Part 2. Specifications for an LEDRGBE

2.1. Electrical Specifications

	Typical	Maximum Ratings
Power Dissipation R/G/B		40/64/64 mW
Reverse Voltage		5.0 V
DC Forward Current		50 mA
Forward Voltage @ 20 mA R/G/B	2.0/3.2/3.2 V	2.4/3.6/3.6 V
Reverse Current V_r = -5 V		5 µA
Operating Temperature		-30 °C to 85 °C
Storage temperature Range		-30 °C to 100 °C

Note: All maximum measurements specified are at 25 °C.

2.2. Optical Specifications

	Typical
Center Wavelength R/G/B	627.5/525/467.5 nm (±8/±10/±8 nm)
FWHM R/G/B	20/36/15 nm
Half Viewing Angle	25°
Total Optical Power R/G/B	5.8/3.1/6.2 mW

2.3. Soldering Specifications

	Conditions
Manual Soldering	295 °C ± 5 °C , for less than 3 seconds
Wave Soldering	260 °C ± 5 °C , for less than 5 seconds
Reflow Soldering	**Preheating:** 70 °C to 80 °C , for 30 seconds **Soldering:** 245 °C ± 5 °C , for less than 5 seconds

2.4. Cleaning Solvents

Solvent	Ethyl Alcohol	Isopropyl Alcohol	Propanol	Acetone	Chloroseen	Tricloroethylene	MKS
Approved	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No

2.5. Physical Specifications

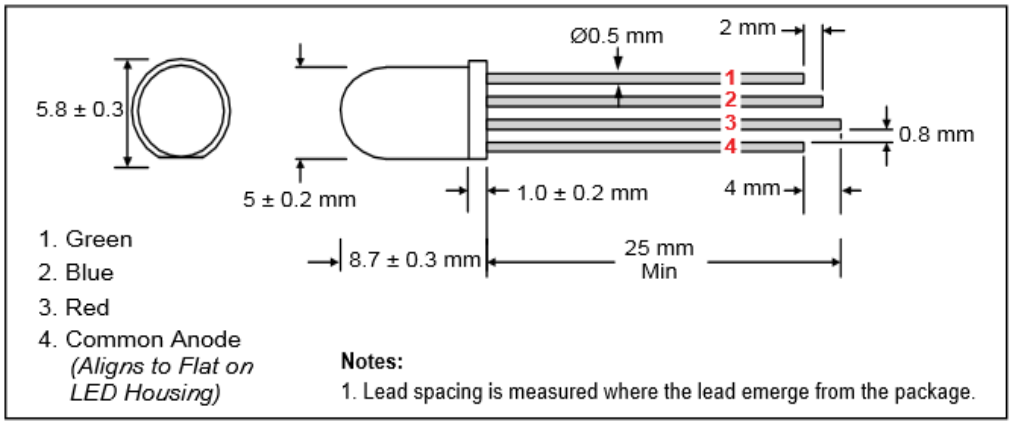
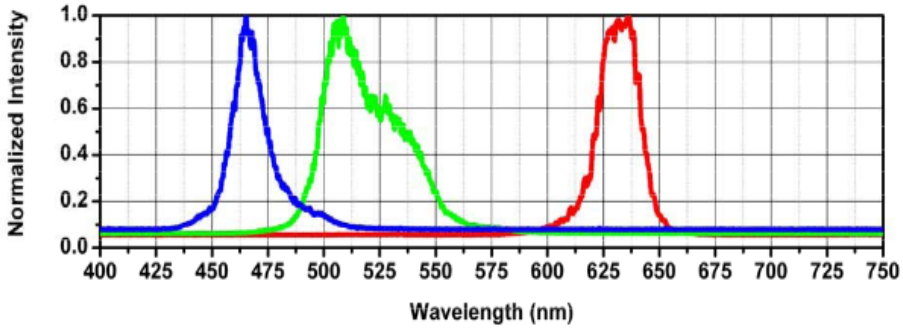
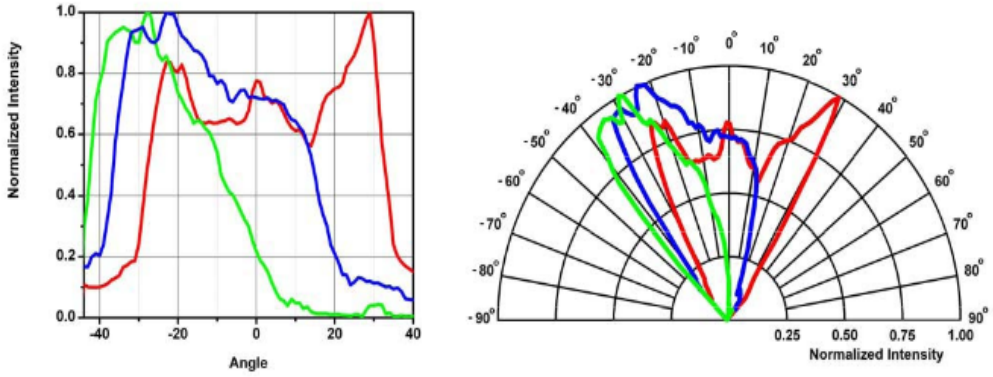


Figure 1: LEDRGBE Dimentional Drawing and PIN Out

2.6. Typical Spectral Intensity Distribution



2.7. Typical Radial Intensity Distribution



Kingbright

T-1 3/4 (5mm) SOLID STATE LAMP

L-53SRC-E SUPER BRIGHT RED

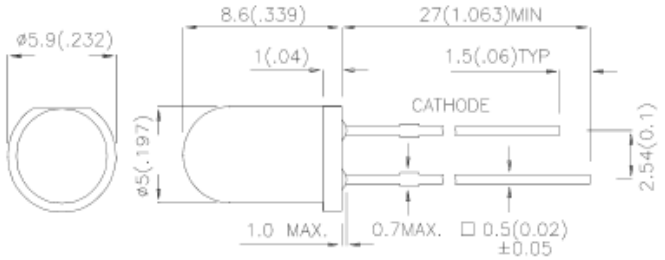
Features

- LOW POWER CONSUMPTION.
- POPULAR T-1 3/4 DIAMETER PACKAGE.
- GENERAL PURPOSE LEADS.
- RELIABLE AND RUGGED.
- LONG LIFE - SOLID STATE RELIABILITY.
- AVAILABLE ON TAPE AND REEL.

Description

The Super Bright Red source color devices are made with Gallium Aluminum Arsenide Red Light Emitting Diode.

Package Dimensions



Notes:
1. All dimensions are in millimeters (inches).
2. Tolerance is ±0.25(0.01") unless otherwise noted.
3. Lead spacing is measured where the lead emerge package.
4. Specifications are subject to change without notice.

Kingbright

Selection Guide

Part No.	Dice	Lens Type	Iv (mcd) @ 20 mA		Viewing Angle
			Min.	Typ.	2θ1/2
L-53SRC-E	SUPER BRIGHT RED (GaAlAs)	WATER CLEAR	1800	2800	30°

Note:
1. θ1/2 is the angle from optical centerline where the luminous intensity is 1/2 the optical centerline value.

Electrical / Optical Characteristics at T_A=25°C

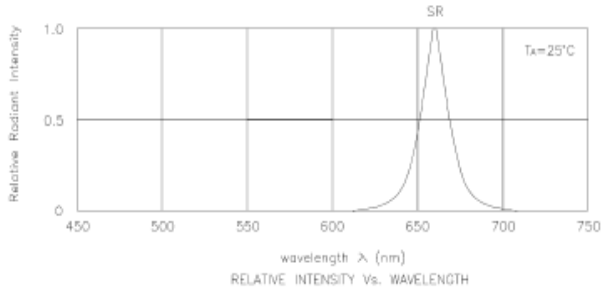
Symbol	Parameter	Device	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
λpeak	Peak Wavelength	Super Bright Red	660		nm	I_F=20mA
λD	Dominate Wavelength	Super Bright Red	640		nm	I_F=20mA
Δλ1/2	Spectral Line Half-width	Super Bright Red	20		nm	I_F=20mA
C	Capacitance	Super Bright Red	45		pF	V_F=0V;f=1MHz
V_F	Forward Voltage	Super Bright Red	1.85	2.5	V	I_F=20mA
I_R	Reverse Current	Super Bright Red		10	uA	V_R = 5V

Absolute Maximum Ratings at T_A=25°C

Parameter	Super Bright Red	Units
Power dissipation	100	mW
DC Forward Current	30	mA
Peak Forward Current [1]	155	mA
Reverse Voltage	5	V
Operating/Storage Temperature	-40°C To +85°C	
Lead Solder Temperature [2]	260°C For 5 Seconds	

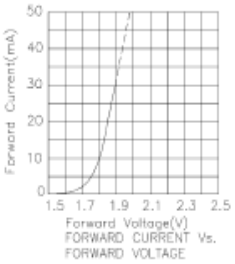
Notes:
1. 1/10 Duty Cycle, 0.1ms Pulse Width.
2. 2mm below package base.

Kingbright

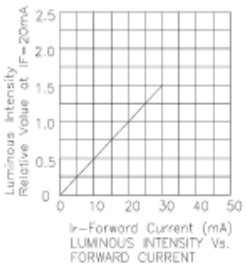


RELATIVE INTENSITY Vs. WAVELENGTH

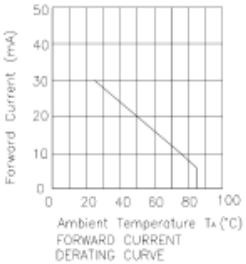
Super Bright Red **L-53SRC-E**



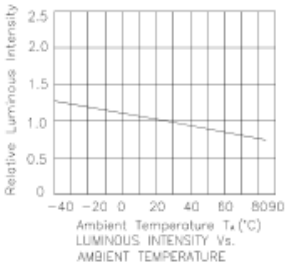
FORWARD CURRENT Vs.
FORWARD VOLTAGE



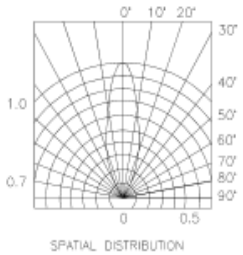
LUMINOUS INTENSITY Vs.
FORWARD CURRENT



FORWARD CURRENT
DERATING CURVE



LUMINOUS INTENSITY Vs.
AMBIENT TEMPERATURE



SPATIAL DISTRIBUTION

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

LED680-series

TECHNICAL DATA

Visible LED AlGaAs

LED680-series are AlGaAs LEDs mounted on a lead frame and encapsulated in various types of epoxy lens, which offers different design settings.
On forward bias, it emits a high power radiation of typical 4 mW at a peak wavelength at 680 nm.

Specifications

- Structure: AlGaAs
- Peak Wavelength: typ. 680 nm
- Optical Ouput Power: typ. 4 mW
- Resin Material: Epoxy resin
- Solder: Lead free

Absolute Maximum Ratings (T_a=25°C)

Type	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation	P_D	110	mW
Forward Current	I_F	50	mA
Pulse Forward Current	I_{FP}	200	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{OP}	-30 ... +85	°C
Storage Temperature	T_{STG}	-40 ... +100	°C
Soldering Temperature (for 5 sec.)	T_{SOL}	265	°C

Electro-Optical Characteristics (T_a=25°C)

Item	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	V_F	I_F = 20 mA	-	1.8	2.3	V
Reverse Current	I_R	V_R = 5 V	-	-	10	µA
Radiated Power	P_O	I_F = 20 mA	3	4	-	mW
Peak Wavelength	λ_P	I_F = 20 mA	-	680	-	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	I_F = 20 mA	-	25	-	nm
Rise Time	t_r	I_F = 20 mA	-	50	-	ns
Fall Time	t_f	I_F = 20 mA	-	25	-	ns

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Characteristics of Radiant Intensity (T_a=25°C)

Type	Viewing Half Angle	Brightness / Radiation Intensity (I_F = 20 mA) [Unit: mW/sr] Typ.	Outer Dimension	Dimension Figure
LED680-01AU	±10°	25	Ø 5	1
LED680-02AU	±7°	25	Ø 5	2
LED680-03AU	±10°	25	Ø 5	3
LED680-04AU	±20°	10	Ø 5	4
LED680-05AU	±40°	2	Ø 5	5
LED680-06AU	±7°	25	Ø 5	6
LED680-09AU	±25° (long)	10	Ø 5	7
	±15° (short)		Oval	
LED680-46AU			Ø 5	8
LED680-41AU	±16°	20	Ø 4	9
LED680-42AU	±23°	10	Ø 4	10
LED680-31AU			Ø 3	11
LED680-33AU	±18°	10	Ø 3	12
LED680-34AU			Ø 3	13
LED680-36AU	±33°	4	Ø 3	14

* Radiant Power is measured by Photodyne #200
* Brightness is measured by TekTronix J-16

The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.

Outer Dimensions

Figure-1 Ø 5Mold (Type 01)

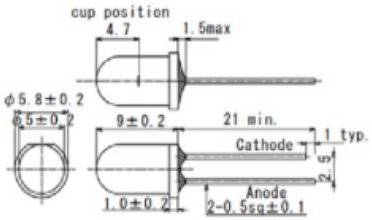


Figure-2 Ø 5Mold (Type 02)

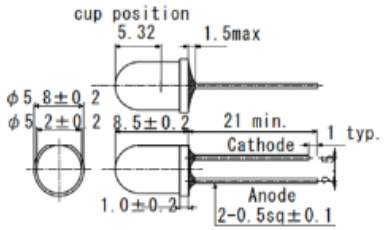


Figure-3 Ø 5Mold (Type 03)

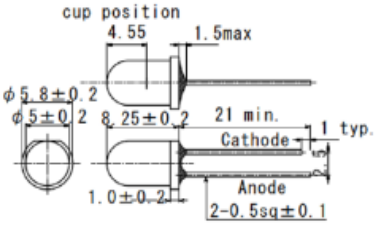
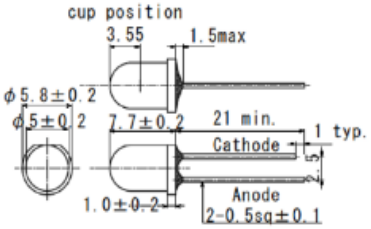


Figure-4 Ø 5Mold (Type 04)



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Figure-5 Ø 5Mold (Type 05)

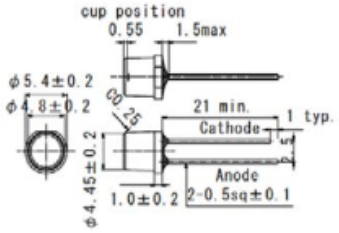


Figure-6 Ø 5Mold (Type 06)

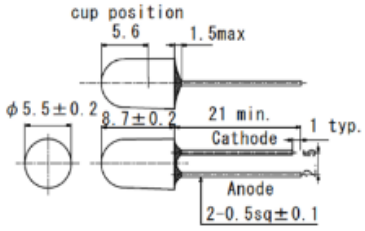


Figure-7 Ø 5Mold (Type 09)

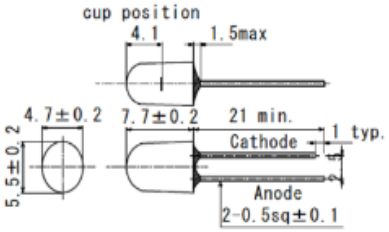


Figure-8 Ø 5Mold (Type 46)

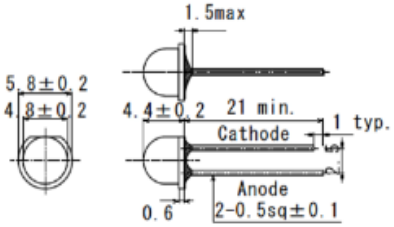


Figure-9 Ø 4Mold (Type 41)

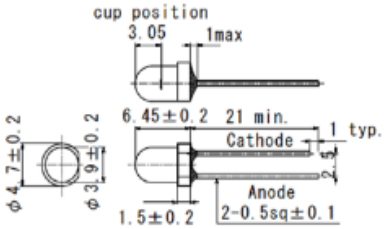


Figure-10 Ø 4Mold (Type 42)

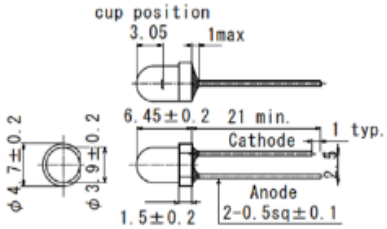


Figure-11 Ø 3Mold (Type 31)

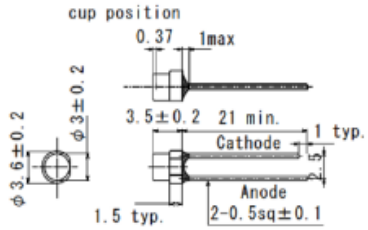


Figure-12 Ø 3Mold (Type 33)

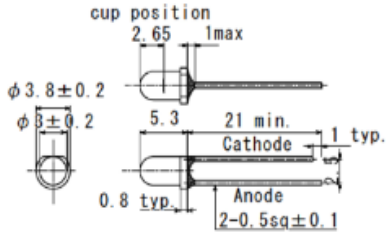


Figure-13 Ø 3Mold (Type 34)

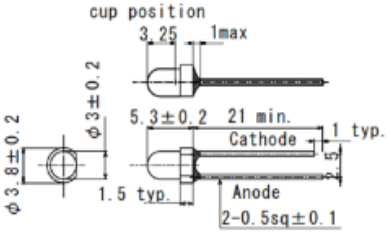
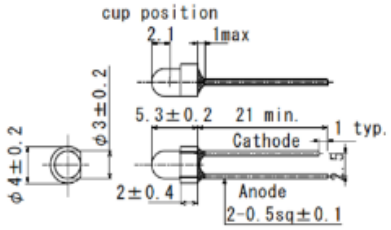


Figure-14 Ø 3Mold (Type 36)



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Viewing half angle

Figure-1 Ø 5Mold (Type 01)

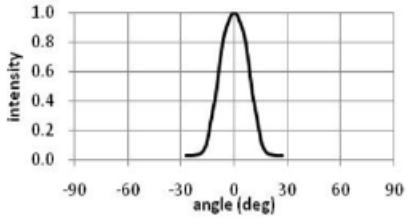


Figure-2 Ø 5Mold (Type 02)

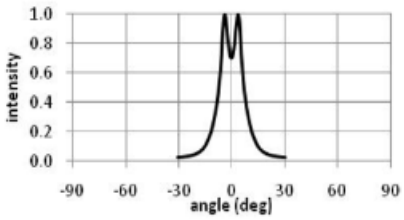


Figure-3 Ø 5Mold (Type 03)

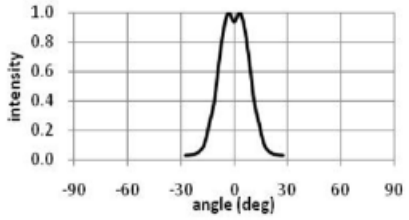


Figure-4 Ø 5Mold (Type 04)

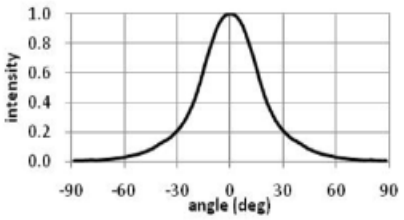


Figure-5 Ø 5Mold (Type 05)

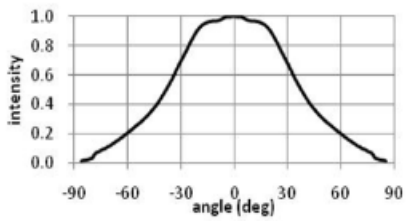


Figure-6 Ø 5Mold (Type 06)

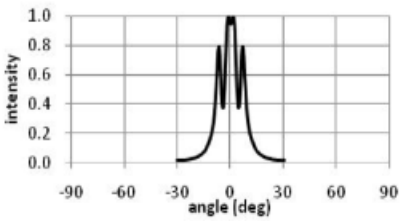


Figure-7 Ø 5Mold (Type 09)

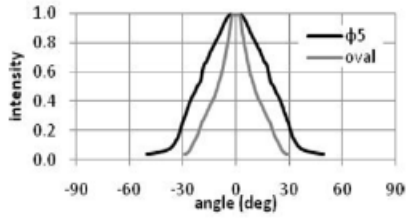


Figure-8 Ø 5Mold (Type 46)

Figure-9 Ø 4Mold (Type 41)

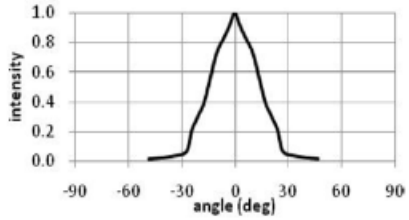
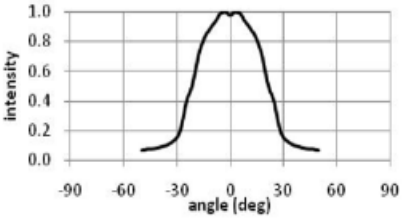
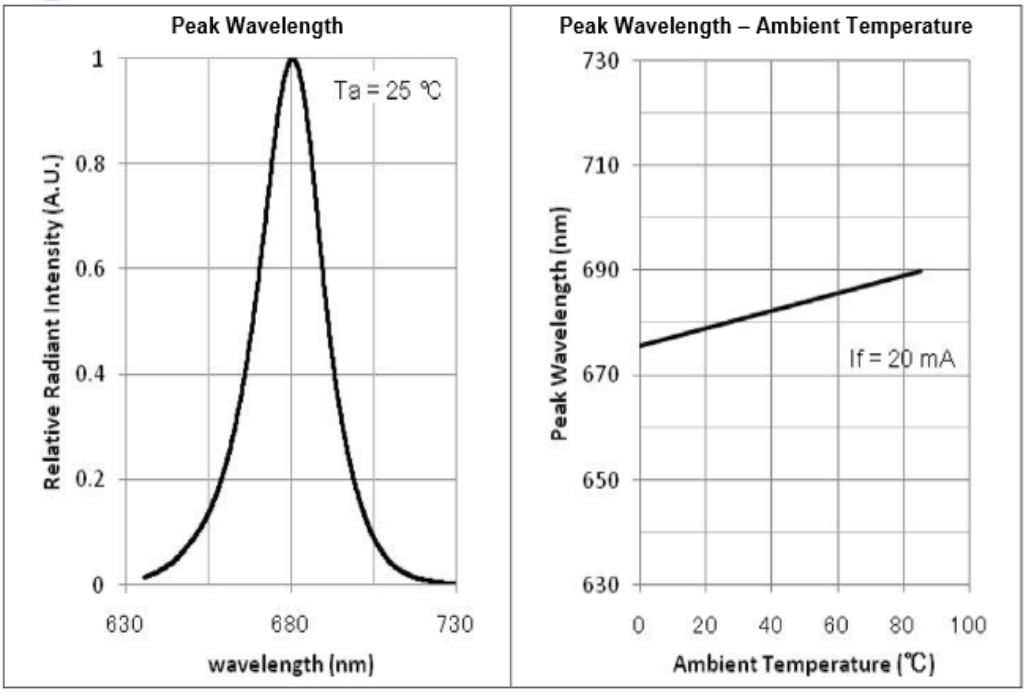


Figure-10 Ø 4Mold (Type 42)



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM



Precaution for Use

1. Cautions

- DO NOT look directly into the emitted light or look through the optical system. To prevent in adequate exposure of the radiation, wear protective glasses.
- The LEDs are emitting invisible light.

2. Lead Forming

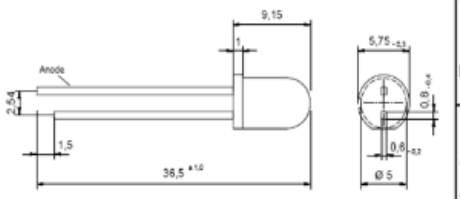
- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.

ROITHNER LASERTECHNIK
Wiedner Hauptstraße 76, A-1040 Vienna, Austria
Tel.: ++43 1 586 52 43-0, Fax -44, office@roithner-laser.com

LED - Lamp

ELD-720-524

Radiation	Type	Technology	Case
Infrared	DDH	AlGaAs/AlGaAs	5 mm plastic lens



Description

High-power, high-speed, double heterostructure with removed substrate, chip with central contact, housing without standoff leads

Note: Special packages without standoff available on request

Applications

Optical communications, safety equipment, automation

Maximum Ratings

T_{amb} = 25°C, unless otherwise specified

Parameter	Test conditions	Symbol	Value	Unit
Forward current (DC)		I_F	50	mA
Peak forward current	($t_P \leq 50$ µs, $t_P/T = 1/2$)	I_{FM}	100	mA
Operating temperature range		T_{amb}	-40 to +85	°C
Storage temperature range		T_{stg}	-55 to +100	°C

Optical and Electrical Characteristics

T_{amb} = 25°C, unless otherwise specified

Parameter	Test conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward voltage[1]	I_F = 50 mA	V_F		2.0	2.4	V
Reverse voltage	I_R = 100 µA	V_R	5V			V
Radiant power[1]	I_F = 50 mA	Φ_e	8	10		mW
Radiant intensity[1]	I_F = 50 mA	I_e	40	70		mW/sr
Peak wavelength	I_F = 20 mA	λ_p	710	720	730	nm
Spectral bandwidth at 50%	I_F = 20 mA	$\Delta\lambda_{0.5}$		30		nm
Viewing angle	I_F =50 mA	2φ		20		deg.
Switching time	I_F = 50 mA	t_r, t_f		40		ns

[1]for information only

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

LED760/940-04A

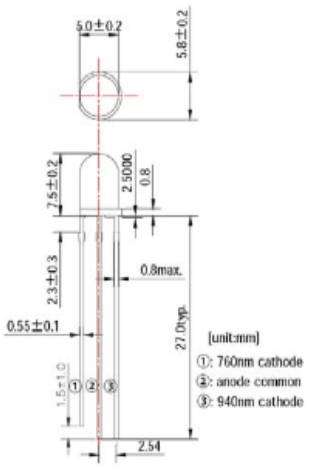
TECHNICAL DATA

Dual LED, 5 mm AlGaAs, GaAs

Dual LED of LED760/940-04A consists of DDH AlGaAs and GaAs LEDs mounted on a lead frame with a clear epoxy lens.
On forward bias it emits a band of visible light, which peaks 760nm and 940 at anode common.

Specifications

- Structure: AlGaAs (DDH structure)
- Peak Wavelength: typ. 760 nm / 940 nm
- Optical Ouput Power: typ. 15 mW / 14 mW
- Resin Material: Epoxy resin
- Solder: Lead free



(Unit: mm)

Absolute Maximum Ratings (T_a=25°C)

Item	Symbol	Value		Unit
		760mn	940nm	
Power Dissipation	P_D	200	140	mW
Forward Current	I_F	100		mA
Reverse Voltage	V_R	10		V
Operating Temperature	T_{opr}	-30 ... +80		°C
Storage Temperature	T_{stg}	-30 ... +100		°C
Soldering Temperature *	T_{sol}	265		°C

* must be completed within 3 seconds

Electro-Optical Characteristics

Item	Symbol	Condition	Min.		Typ.		Max.		Unit
			760nm	940nm	760nm	940nm	760nm	940nm	
Forward Voltage	V_F	I_F = 20 mA	-		1.85	1.30	2.00	1.45	V
Reverse Current	I_R	V_R = 5 V	-		-		10		µA
Total Radiated Power	P_O	I_F = 20 mA	8.0	8.0	15.0	14.0	-	-	mW
Peak Wavelength	λ_P	I_F = 20 mA	740	930	760	940	780	960	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	I_F = 20 mA	-		30	50	-		nm
Viewing Half Angle	$\Theta_{1/2}$	I_F = 20 mA	-		±20		-		deg.

Total Radiated Power is measured by Photodyne #500

Notes

- Do not view directly into the emitting area of the LED during operation!
- The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.

ROITHNER LASERTECHNIK
Wiedner Hauptstraße 76, A-1040 Vienna, Austria
Tel.: ++43 1 586 52 43-0, Fax -44, office@roithner-laser.com

LED780-xxAU Infrared LED Lamp

is a GaAlAs LED mounted on a lead frame and encapsulated in various types of epoxy lens which offer different design settings.
On forward bias, it emits a high power radiation of typical 18mW with a peak wavelength at 780nm.

1) Specifications

(1) Chip material	AlGaAs
(2) Peak wavelength	780nm
(3) Package	Clear epoxy resin
(4) Lead frame	Soldered

2) Absolute Maximum Ratings

Item	Symbol	Maximum Rated Value	Unit	Ambient Temperature
Power Dissipation	PD	190	mW	Ta=25°C
Forward Current	IF	100	mA	Ta=25°C
Pulse Forward Current	IFP	500	mA	Ta=25°C
Reverse Voltage	VR	5	V	Ta=25°C
Operating Temperature	TOPR	-30 ~ +85	°C	Ta=25°C
Storage Temperature	TSTG	-30 ~ +100	°C	
Soldering Temperature	TSOL	260	°C	

3) Electro-Optical Characteristics [Ta=25°C]

Item	Symbol	Condition	Minimum	Typical	Maximum	Unit
Forward Voltage	VF	IF=50mA		1.75	1.95	V
Reverse Current	IR	VR=5V			10	uA
Total Radiated Power	PO	IF=50mA	13.0	18.0		mW
Peak Wavelength	λP	IF=50mA		780		nm
Half Width	Δλ	IF=50mA		30		nm
Rise Time	tr	IF=50mA		80		ns
Fall Time	tf	IF=50mA		80		ns

4) Characteristics of Radiant Intensity [Ta=25°C]

Type	Viewing Half Angle	Radiant Intensity IF=50mA unit: mW/sr			Outer Dimension	
		Minimum	Typical	Maximum	Dimension	Figure
L780-01AU	±10°		90		Φ5	1
L780-02AU	±5°		100		Φ5	2
L780-03AU	±15°		70		Φ5	3
L780-04AU	±20°		35		Φ5	4
L780-05AU	±40°		10		Φ5	5
L780-06AU	±6°		110		Φ5	6
L780-09AU	±25°(Long) ±15°(Short)		60		Φ5 Oval	7
L780-31AU					Φ3	8
L780-33AU	±15°		40		Φ3	9
L780-34AU					Φ3	10
L780-36AU	±30°		20		Φ3	11
L780-41AU					Φ4	12
L780-42AU					Φ4	12

‡ Radiant Intensity is measured by Tektronix J-16.
‡ Total Radiated Power is measured by Photodyne #500.

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

LED820-series

TECHNICAL DATA

Infrared LED AlGaAs

LED820-series are AlGaAs LEDs mounted on a lead frame and encapsulated in various types of epoxy lens, which offers different design settings.
On forward bias, it emits a high power radiation of typical 18 mW at a peak wavelength at 820 nm.

Specifications

- Structure: AlGaAs
- Peak Wavelength: typ. 820 nm
- Optical Ouput Power: typ. 18 mW
- Resin Material: Epoxy resin
- Solder: Lead free

Absolute Maximum Ratings (T_a=25°C)

Type	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation	P_D	170	mW
Forward Current	I_F	100	mA
Pulse Forward Current	I_{FP}	500	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{OP}	-30 ... +85	°C
Storage Temperature	T_{STG}	-40 ... +100	°C
Soldering Temperature (for 5 sec.)	T_{SOL}	265	°C

Electro-Optical Characteristics (T_a=25°C)

Item	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	V_F	I_F = 50 mA	-	1.6	1.8	V
Reverse Current	I_R	V_R = 5 V	-	-	10	µA
Radiated Power	P_O	I_F = 50 mA	16	18	-	mW
Peak Wavelength	λ_P	I_F = 50 mA	805	820	835	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	I_F = 50 mA	-	35	-	nm
Rise Time	t_r	I_F = 50 mA	-	50	-	ns
Fall Time	t_f	I_F = 50 mA	-	25	-	ns

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Characteristics of Radiant Intensity (T_a=25°C)

Type	Viewing Half Angle	Brightness / Radiation Intensity (I_F = 50 mA) [Unit: mW/sr] Typ.	Outer Dimension	Dimension Figure
LED820-01AU	±10°	100	Ø 5	1
LED820-02AU	±7°	100	Ø 5	2
LED820-03AU	±10°	110	Ø 5	3
LED820-04AU	±20°	45	Ø 5	4
LED820-05AU	±40°	12	Ø 5	5
LED820-06AU	±7°	130	Ø 5	6
LED820-09AU	±25° (long)	60	Ø 5	7
	±15° (short)		Oval	
LED820-46AU			Ø 5	8
LED820-41AU	±16°	75	Ø 4	9
LED820-42AU	±23°	40	Ø 4	10
LED820-31AU			Ø 3	11
LED820-33AU	±18°	45	Ø 3	12
LED820-34AU			Ø 3	13
LED820-36AU	±33°	20	Ø 3	14

* Radiant Power is measured by Photodyne #500
* Brightness is measured by TekTronix J-16

The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.

Outer Dimensions

Figure-1 Ø 5Mold (Type 01)

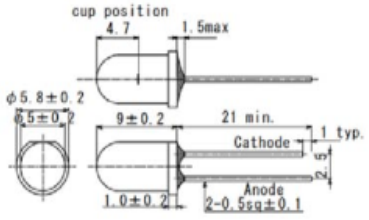


Figure-2 Ø 5Mold (Type 02)

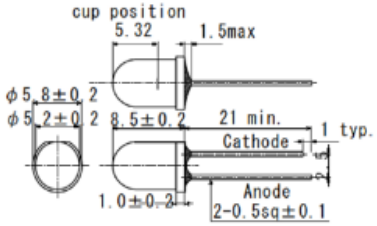


Figure-3 Ø 5Mold (Type 03)

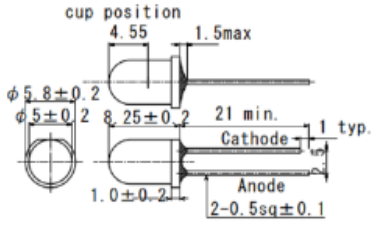
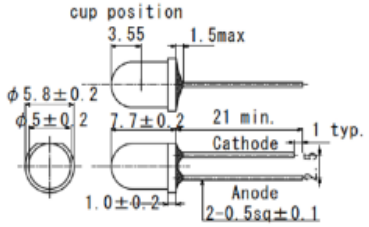


Figure-4 Ø 5Mold (Type 04)



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Figure-5 Ø 5Mold (Type 05)

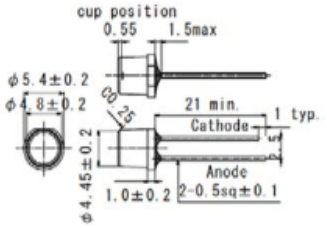


Figure-6 Ø 5Mold (Type 06)

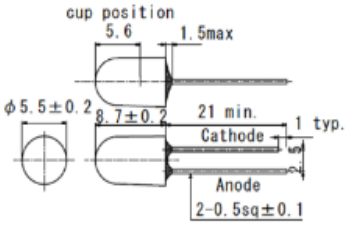


Figure-7 Ø 5Mold (Type 09)

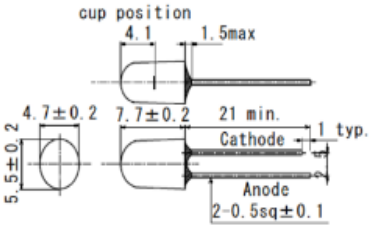


Figure-8 Ø 5Mold (Type 46)

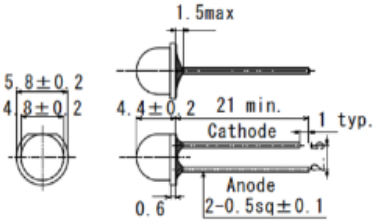


Figure-9 Ø 4Mold (Type 41)

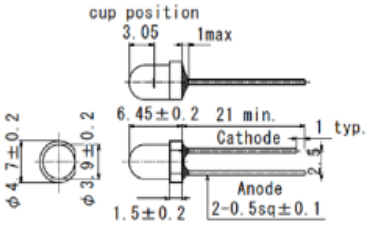


Figure-10 Ø 4Mold (Type 42)

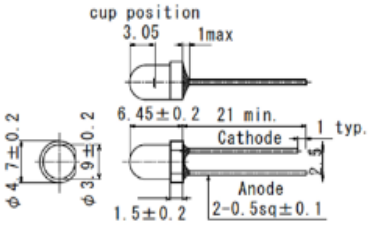


Figure-11 Ø 3Mold (Type 31)

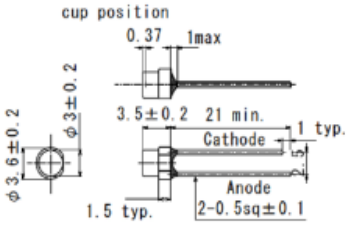


Figure-12 Ø 3Mold (Type 33)

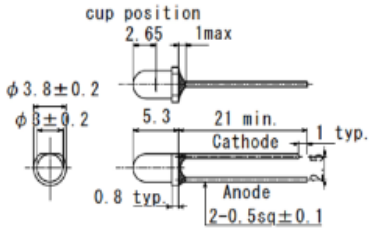


Figure-13 Ø 3Mold (Type 34)

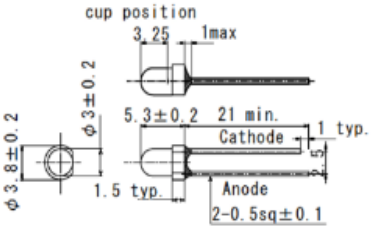
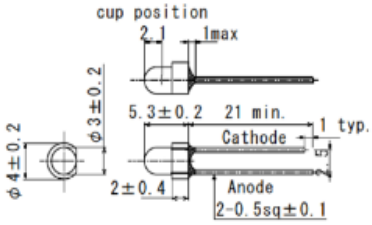


Figure-14 Ø 3Mold (Type 36)



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Viewing half angle

Figure-1 Ø 5Mold (Type 01)

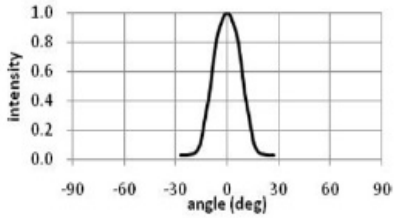


Figure-2 Ø 5Mold (Type 02)

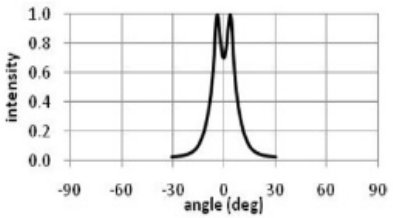


Figure-3 Ø 5Mold (Type 03)

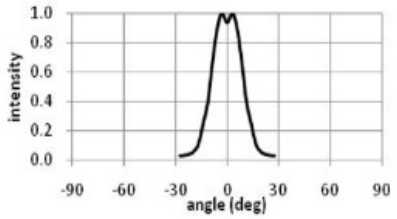


Figure-4 Ø 5Mold (Type 04)

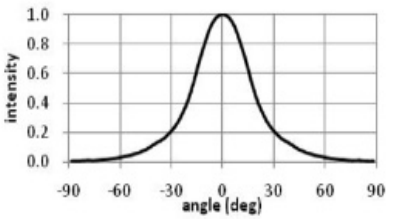


Figure-5 Ø 5Mold (Type 05)

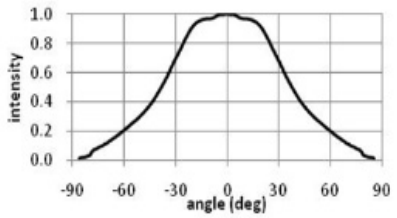


Figure-6 Ø 5Mold (Type 06)

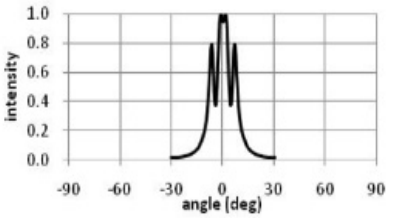


Figure-7 Ø 5Mold (Type 09)

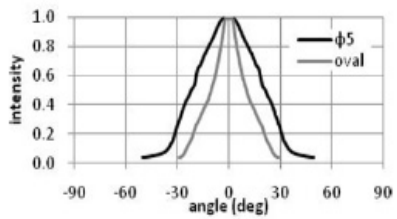


Figure-8 Ø 5Mold (Type 46)

Figure-9 Ø 4Mold (Type 41)

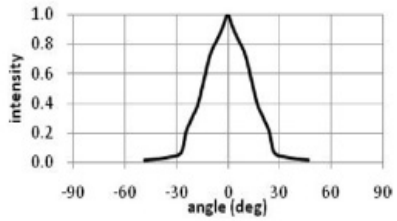
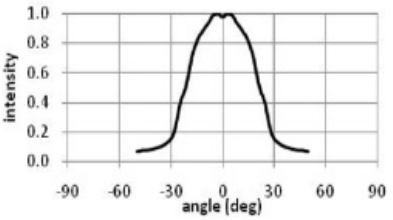
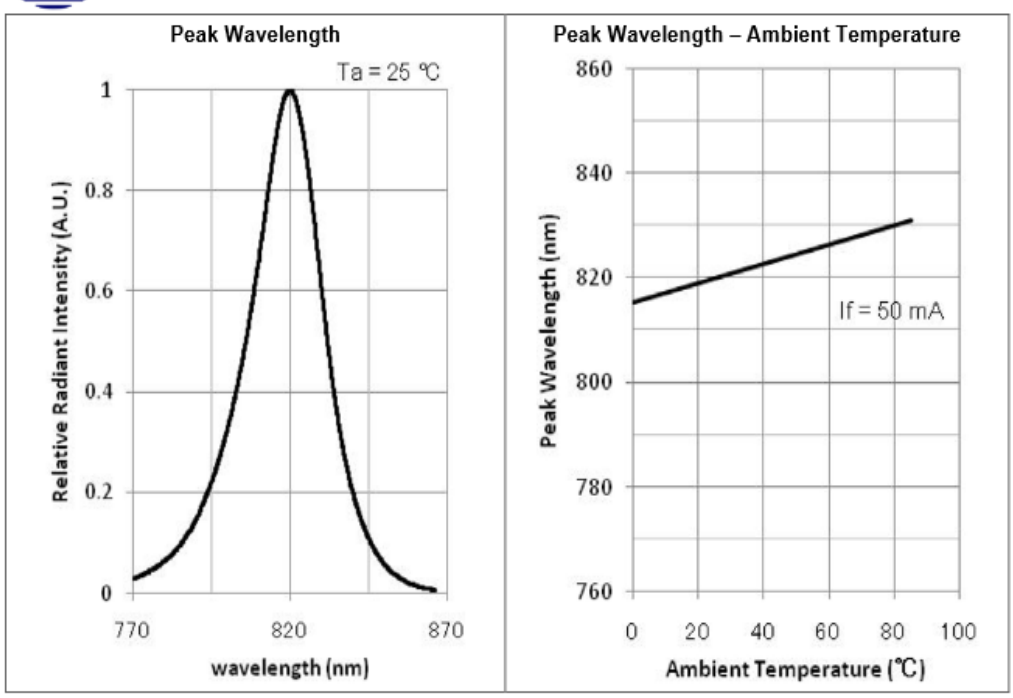


Figure-10 Ø 4Mold (Type 42)



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM



Precaution for Use

1. Cautions

- DO NOT look directly into the emitted light or look through the optical system. To prevent in adequate exposure of the radiation, wear protective glasses.
- The LEDs are emitting invisible light.

2. Lead Forming

- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

W54L5111P

TECHNICAL DATA

White LED 5 mm, InGaN

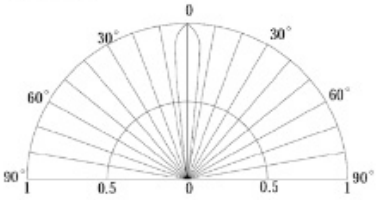
Features

- High Luminous LEDs
- 5mm Round Standard Directivity
- Long Lifetime Operation
- Superior Weather-resistance
- UV Resistant Epoxy
- Water Clear Type

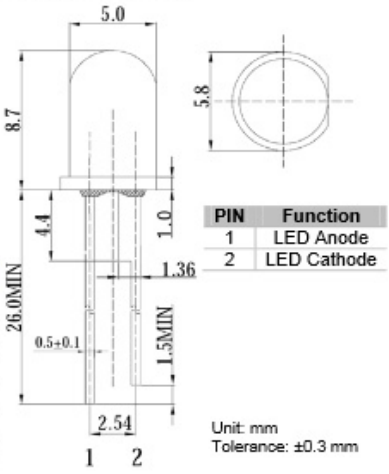
Applications

- Automotive Dashboard Lighting
- Small Area Illuminations
- Back Lighting
- Other Lighting

Diretivity:



Outline Dimension:



PIN	Function
1	LED Anode
2	LED Cathode

Unit: mm
Tolerance: ±0.3 mm

Absolute Maximum Ratings (T_a=25°C)

Item	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation	P_D	190	mW
Forward Current	I_F	50	mA
Pulse Forward Current *	I_{FP}	120	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{opr}	-30 … +85	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 … +100	°C
Soldering Temperature (5 sec.)	T_{sol}	260	°C

* pulse width max. 10 ms, duty ratio max. 1/10

Specifications (T_a=25°C)

Item	Condition	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Optical Specifications						
Luminous Intensity *1	I_F = 50 mA	I_V	60	75	-	cd
Chromaticity Coordinates *2	I_F = 50 mA	x	-	0.27	-	
	I_F = 50 mA	y	-	0.28	-	
Viewing Angle	I_F = 50 mA	$2\Theta_{1/2}$	-	15	-	deg
Electrical Specifications						
Forward Voltage	I_F = 50 mA	U_F	3.0	3.3	3.8	V
Reverse Voltage	U_F = 5 V	U_R	-	-	10	µA

*1 Tolerance of chromaticity coordinates is ±10%
*2 Tolerance of luminous intensity is ±15%

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

Precaution for Use

1. ***Cautions***
   - DO NOT look directly into the light or look through the optical system.

2. ***Lead Forming***
   - When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
   - Lead forming should be done before soldering.
   - DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
   - When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.

3. ***Soldering Conditions***
   - Solder the LEDs no closer than 3 mm from the base of the lead.
   - Recommended soldering conditions:

Dip Soldering	
Pre-Heat	120 °C Max.
Pre-Heat Time	60 Seconds Max.
Solder Bath Temperature	260 °C Max.
Dipping Time	5 Seconds Max.
Dipping Position	No lower than 3 mm from the base of the epoxy bulb

   - DO NOT apply any stress to the lead particularly when heat.
   - The LEDs must not be reposition after soldering.
   - After soldering the LEDs, the lead should be protected from mechanical shock or vibration until the LEDs return to room temperature.
   - When it is necessary to clamp the LEDs to prevent soldering failure, it is important to minimize the mechanical stress on the LEDs.
   - Cut the LED leads at room temperature. Cutting the leads at high temperature may cause the failure of the LEDs.

4. ***Static Electricity***
   - The LEDs are very sensitive to Static Electricity and surge voltage. So it is recommended that a wrist band or an anti-electrostatic glove be used when handling the LEDs.
   - All devices, equipment and machinery must be grounded properly. It is recommended that precautions should be taken against surge voltage to the equipment that mounts the LEDs.

5. ***Heat Generation***
   - The powered LEDs generate heat. Heat dissipation should be considered in the application design to avoid the environmental conditions for operation in excess of the absolute maximum ratings.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Applied Optix. 2014. « ASTM / IEC / JIS Standards ». *SOLARLUX*.

ASTM l. 2010. *Standard specification for solar simulation for photovoltaic testing*. Designation. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States: ASTM International,

Baniya, Rupak Raj. 2012. *Study of various metrics evaluating color quality of light sources*. En ligne <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/5176>. Consulté le 15 november 2013.

Benoit, Alexandre. 2007. « Le système visuel humain au secours de la vision par ordinateur ». Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, February 14. En ligne <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00193715>. Consulté le 15 november 2013.

Bouaraba, Fazia. 2012. « Etude d'une LED blanche à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche ». Masters, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou - Faculté de génie électrique et d'informatique - Département d'électronique.

C. Baillet. 2005. « Photométrie ».

Chalmers, Andrew and Snjezana Soltic. 2010. « Towards the Optimum Light Source Spectrum ». *Advances in OptoElectronics*, vol. 2010 (July 14). En ligne <http://www.hindawi.com/journals/aoe/2010/596825/abs/>. Consulté le 15 november 2013.

Chherawala, Youssouf. 2007. « Prédiction de la teneur en anthocyane du fruit de la canneberge par vision par ordinateur ». Masters, Montréal, École de technologie supérieure, June 27, 240 p. En ligne <http://espace.etsmtl.ca/567/>. Consulté le 15 november 2013.

CIE. 1986c. *CIE standards illuminant for colorimetry*. Technical. Vienna, AUSTRIA. En ligne <www.cie.org>.

CIE. 1999. *Colour rendering (TC 1-33 closing remarks)*. Rapport Technique. CIE Central Bureau : Commission Internationale de l'Éclairage.

CIE. 2004. *Colorimetry*. Vienna : CIE, Central Bureau.

CIE. 2007. *Color Rendering of White LED Light Sources*. Technical. Vienna, AUSTRIA: Commission Internationale de l'Éclairage.

CIE. 2013. *Methods for re-defining CIE D illuminants*. Technical. Vienna, AUSTRIA: Commission Internationale de l'Éclairage.

Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son. 1998. « Introduction à la colorimétrie (2 ème partie) ».

CVRL. 2013. « CIE 2006 "physiologically-relevant" LMS functions ». University. *Colour & Vision Research Laboraory*. En ligne <http://www.cvrl.org/>.

Dangol, Rajendra. 2011. *Colour Rendering Index and colour rendering of LEDs*. En ligne <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/3662>. Consulté le 15 november 2013.

Davis and al., W. and Y. 2004. « Development of a Color Quality Scale ». National Institute of Standards and Technology. En ligne. Consulté le 12 december 2002.

Dean, B. and al. 1964. « Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature ». *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*.

Dick Erdmann. « Color Rendering Index (CRI) ». En ligne. Consulté le 20 juin 2013.

E. Fred Schubert. 2006. *Light-Emitting Diodes*. 2nd Édition. New York: Cambridge University Press, 415 p. En ligne <www.cambridge.org>.

Gillet, Steve. 2008. « Colorimétrie ». En ligne <www.isipack.be>. Consulté le 6 february 2013.

Guillo, Stéphane. 2004. « La balance des blancs: Réglages et effets de la balance des blancs ». École Nationale Supérieure Louis Lumière, 93 p.

Hamadani, B. H. and al. 2011. « Towards realization of a large-area light-emitting-diode-based solar simulator ».

Honsberg, Christiana and Stuart Bowden. 2013. « A collection of resources for the photovoltaic educator ». *PV EDUCATION*. En ligne <http://pveducation.org/>. Consulté le 14 february 2014.

Huang, Chien-Hao and Teng-Ming Chen. 2011. « A Novel Single-Composition Trichromatic White-Light $Ca_3Y(GaO)_3(BO_3)_4:Ce^{3+},Mn^{2+},Tb^{3+}$ Phosphor for UV-Light Emitting Diodes ». *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 115, no 5 (February 10), p. 2349–2355. En ligne. Consulté le 13 december 2013.

HunterLab. 2008. « Equivalent white light sources and CIE illuminants ».

ISO TC 34/SC 12. 2007. *Sensory analysis - General guidance and test method for assessment of the colour of foods*. International Standard. Genève 20 - Switzerland: Multiple. Distributed through American National Standards Institute.

Kosztyán, Z. and János Schanda. 2013. « Smoothing spectral power distribution of daylights », October.

Kránicz, Balázs and János Schanda. 2000. « Reevaluation of daylight spectral distributions ». *Color Research & Application*, vol. 25, no 4, p. 250–259. En ligne. Consulté le 5 december 2013.

Lam, Yuk-Ming and John H. Xin. 2002. « Evaluation of the quality of different D65 simulators for visual assessment ». *Color Research & Application*, vol. 27, no 4, p. 243–251. En ligne. Consulté le 14 november 2013.

Liu, Sheng and Xiaobing Luo. 2011. *LED Packaging for Lighting Applications - Design, Manufacturing and Testing*. 1 st. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 349 p.

Lumitronix. 2013. « LED blanches ». Commercial. *Lumitronix - High Performance LED Technologies & Solutions*. En ligne. Consulté le 20 november 2013.

Meyaard, David S., Qifeng al, Jaehee al, E. Fred al, Sang-Heon al, Min-Ho al, Cheolsoo al, Seung Jae al and Jong Kyu al. 2012. « Temperature dependent efficiency droop in GaInN light-emitting diodes with different current densities ». *Applied Physics Letters*, vol. 100, no 8 (February 22), p. 081106. En ligne. Consulté le 4 february 2014.

Mottier, Patrick. 2008. *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*. 25 vols. Hermes. Hermes Science/Lavoisier entitled, 275 p. En ligne <www.hermes-science.com>.

Mottier. 2009. *LEDs for Lighting Applications*. John Wiley & Sons (USA).

Narukawa, Yukio, Masatsugu al., Daisuke al, Masahiko al and Takashi al. 2010. « White light emitting diodes with super-high luminous efficacy ». *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43, no 35 (September 8), p. 354002. En ligne. Consulté le 15 january 2014.

Newport. 2014a. « Class AAA Solar Simulators ». En ligne <http://search.newport.com>. Consulté le 26 january 2014.

Newport. 2014b. « Introduction to Solar Radiation ». En ligne <http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>. Consulté le 27 january 2014.

NIST. 2006. « Color rendering of light sources ». Vision Science.

Schanda. János. 1998. « CIE Standards for assessing quality of light sources ». En ligne <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.3077&rep=rep1&type=pdf>. Consulté le 14 november 2013.

Schanda. 2003. « Photometry and colorimetry of LED lighting divices. Progress of automobile ligting (PAL) ». In Darsmtadt, Germany, 955 -63: The Society of light and Lighting (SAGE).

Schanda. 2007. *COLORIMETRY - Understanding the CIE System*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication. Wiley, 499 p.

US-DOE. 2013. *Solid-State Lighting Research and Development - Multi-Year Program Plan*. US Department of Energy (DOE). En ligne. Consulté le 10 december 2013.

Velay, B. 2011. « Sources de lumiére ». IUT Saint Nazaire - Mesures Physiques - S3 - Optique & Optoélectronique.

Wei, Minchen. 2011. « Effects of Spectral Modification on Perceived Brightness and Color Discrimination ». The Pennsylvania State University. En ligne <https://etda.libraries.psu.edu/paper/12389/7702>. Consulté le 15 november 2013.

Wikipédia. 2014a. « Standard illuminant ». *Wikipedia, the free encyclopedia*. Canada. En ligne <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Standard_illuminant&oldid=589885532>. Consulté le 23 january 2014.

Wikipédia. 2014b. « Solar simulator ». *Wikipedia, the free encyclopedia*. En ligne <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar_simulator&oldid=572416200>. Consulté le 27 january 2014.

Yuji, Beijing. 2014. « High CRI LED Lighting Supplier ». En ligne <http://www.yujiintl.com/ high-cri-led-lighting>. Consulté le 12 february 2014.