

Caractérisation du rendu des couleurs des nouvelles sources : les diodes électroluminescentes (LED)

Nicolas Pousset

▶ **To cite this version:**

Nicolas Pousset. Caractérisation du rendu des couleurs des nouvelles sources : les diodes électroluminescentes (LED). Physique [physics]. Conservatoire national des arts et métiers, 2009. Français. NNT : . tel-00452845

HAL Id: tel-00452845
https://theses.hal.science/tel-00452845

Submitted on 3 Feb 2010

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

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

THESE

présentée au

Conservatoire national des arts et métiers

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

dans la spécialité

Lasers, métrologie, communications

par

Nicolas POUSSET

CARACTERISATION DU RENDU DES COULEURS DES NOUVELLES SOURCES : LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES

Soutenue en 2009

devant le jury composé de

Marie Claude Castex	Directrice de recherche au CNRS, Villetaneuse	Présidente
Frédéric du Burck	Professeur à Paris XIII, Villetaneuse	Rapporteur
Jimmy Dubard	Docteur au LNE, Trappes	Examinateur
Marc Himbert	Professeur du Cnam, Paris	Examinateur
Annick Razet	Professeur au Cnam, Paris	Directrice de thèse
Françoise Viénot	Professeur du MNHN, Paris	Rapporteur

Remerciements

Mon initiation au monde de la métrologie a commencé, pour moi, dès l'âge de 16 ans aux côtés de mon père, Roland Pousset, au sein du laboratoire de métrologie dimensionnelle de TRESCAL (autrefois Metrotech), chez nous, à Vendôme dans le Loir-et-Cher. Grâce à lui, j'ai pu gagner mes premiers salaires en passant mes vacances scolaires (de 2000 à 2004) à nettoyer et à étalonner des cales étalons, des pieds à coulisses, des tampons lisses ou filetés, des comparateurs, et autres instruments de mesures dimensionnelles aux noms plus ésotériques les uns que les autres.

Par l'intermédiaire de ma formation d'ingénieur en optronique (Polytech'Paris-Sud à Orsay) tournée vers un pragmatisme et une professionnalisation importante - concrétisée par une période de dix huit mois de stages sur un cursus de cinq années d'études - j'ai pu améliorer la formation initiale de mon père. Cela s'est d'abord traduit par un stage de trois mois au laboratoire de métrologie dimensionnelle de la Délégation générale pour l'armement (DGA) à Arcueil, sous la responsabilité de Serge Bussières. Puis, ont suivi deux autres stages de cinq et six mois, dans l'équipe de métrologie dimensionnelle du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) à Paris, sous la tutelle de José Salgado et de Georges-Pierre Vailleau.

A 22 ans, après l'obtention de mon diplôme d'ingénieur en juillet 2006, j'ai décidé de poursuivre mon parcours en sollicitant un sujet de thèse au sein de l'équipe « Rayonnements optiques » de l'Institut national de métrologie (INM) du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). Cette thèse se voulait être, pour moi, une période de mise en pratique de mes connaissances d'ingénieur complétée par l'apprentissage d'une rigueur scientifique propre à la recherche.

Avec cette rapide introduction vous aurez tout de suite compris que le travail présenté dans ce document ne constitue qu'une suite logique à mon jeune parcours professionnel dans le monde de la métrologie scientifique. A ce titre, j'aimerai adresser mes remerciements à :

- Marc Himbert, directeur de l'Institut national de métrologie et professeur titulaire de la chaire de métrologie au Cnam, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

- Annick Razet, ma directrice de thèse, professeur des universités, responsable de l'équipe « Rayonnements optiques » et responsable qualité, pour son très bon accueil au sein de l'équipe et ses conseils.

- Bernard Rougié, ingénieur de recherche dans l'équipe « Rayonnements optiques », pour ses multiples conseils très utiles et indispensables. Sans Bernard ce travail n'aurait pas été possible.

- Stéphane Aubert, assistant ingénieur, responsable électronique et informatique à l'INM, pour sa sympathie, son dynamisme, ses réalisations et ses nombreuses discussions dans

divers domaines. Un grand merci pour son précieux concours dans la conception de l'expérience psychophysique.

- Gaël Obein, maître de conférences, pour son aide dans la mise en place de l'expérience psychophysique et l'interprétation des résultats.

- Zaccari Silvestri, ingénieur de recherche dans l'équipe « Masse et grandeurs associées », pour sa grande sympathie et sa disponibilité.

- Jean Bastie, ancien responsable de l'équipe « Rayonnements optiques », pour ses discussions toujours très intéressantes mais malheureusement écourtées par son départ à la retraite quelques mois après mon arrivée.

- Daniel Truong, technicien dans l'équipe « Thermométrie », pour sa sympathie, son enthousiasme et son aide pour mes conceptions mécaniques.

Un grand merci à Stéphane Aubert, Daniel du Colombier (ingénieur dans l'équipe « Masse et grandeurs associées »), Bernard Rougié et Zaccari Silvestri pour avoir accepté d'être les « Bêta-testeurs » de mon expérience psychophysique.

Et pour tout ceux qui m'ont côtoyé pendant ces trois années :

"Une cravate bien nouée est le premier pas sérieux dans la vie"
[Oscar Wilde, écrivain irlandais, 1854-1900]



Les membres de l'équipe « Rayonnements optiques » qui ont participé aux travaux sur les LED.
De gauche à droite : Bernard Rougié, Gaël Obein, Annick Razet, et Nicolas Pousset.
Photo : Philippe Stropa (Studio Pons).

"Lorsque souffle la tempête,
ce qui sauve l'arbre,
ce ne sont pas les feuilles ou les fruits,
ce sont les racines"

A mes parents Chantal et Roland,
à ma fiancée Virginie

Table des matières

Introduction 1

Chapitre I Rayonnements optiques : de la grandeur physique à la perception de la couleur 3

1 Grandeurs et unités en radiométrie et en photométrie 3

1.1. Introduction 3
1.2. Grandeurs 4
1.2.1. Flux 4
1.2.2. Intensité 4
1.2.3. Eclairement 5
1.2.4. Exitance 6
1.2.5. Luminance 6
1.3. Unités 6
1.4. Fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain 7
1.5. Relation de passage entre systèmes énergétique et lumineux 8
1.6. Référence primaires 8
1.6.1. Corps noir 8
1.6.2. Radiomètre à substitution électrique cryogénique 10
1.7. Facteur d'adaptation spectral 11

2 Physique de la couleur 12

2.1. Perception de la couleur 12
2.1.1. Introduction 12
2.1.2. Sources de lumière 12
2.1.2.1. Introduction 12
2.1.2.2. Illuminants normalisés CIE 13
2.1.3. Objet coloré 16
2.1.4. La vision humaine 16
2.2. Modélisation de la couleur 19
2.2.1. Introduction 19
2.2.2. Teinte 19
2.2.3. Saturation 20
2.2.4. Clarté 20
2.2.5. Classification des couleurs de Munsell 20
2.3. Modélisation colorimétrique de l'œil humain 22
2.3.1. Introduction 22
2.3.2. Systèmes colorimétriques 22
2.3.2.1. Espace chromatique CIE 1931 RGB 22
2.3.2.2. Espace chromatique CIE 1931 XYZ et CIE 1964 XYZ 22
2.3.2.3. Espace chromatique CIE 1960 UVW 25
2.3.2.4. Espace chromatique CIE 1964 U*V*W* 26
2.3.2.5. Espace chromatique CIE 1976 L*u*v* 26
2.3.2.6. Espace chromatique CIE 1976 L*a*b* 27
2.3.3. Adaptation chromatique et illuminant de référence 28

2.3.4. Différences de couleur 29
2.4. Température de couleur et température de couleur proximale 30
2.5. Indice de rendu des couleurs 30
2.5.1. Définition 30
2.5.2. Histoire 31
2.5.3. Méthode actuelle de détermination de l'IRC 31

3 Conclusion 40

Chapitre II Les LED : sources d'éclairage de demain 41

1 LED : passé, présent, futur 41

1.1. Histoire de la lumière artificielle 41
1.2. L'éclairage aujourd'hui en quelques chiffres 43
1.3. Les sources artificielles dans le contexte actuel du réchauffement climatique et du développement durable 44
1.4. La place des LED dans notre société 44
1.4.1. Histoire et évolution de la technologie LED 44
1.4.2. Quelques domaines d'application 45
1.4.3. Marché des LED et principaux fabricants 47

2 Description et caractéristiques métrologiques des LED 48

2.1. Principe de fonctionnement 48
2.2. Architectures d'une LED 49
2.3. Différents types de LED 50
2.3.1. LED colorées 50
2.3.2. LED blanches 51
2.4. Caractéristiques intrinsèques des LED 52
2.4.1. Caractéristiques électroniques 52
2.4.2. Caractéristiques optiques 53
2.4.3. Caractéristiques thermiques 53
2.4.4. Caractéristiques énergétiques 55
2.4.5. Caractéristiques mécaniques 57
2.4.6. Durée de vie 57
2.4.7. Température de couleur proximale 58
2.5. Dimensionnement d'applications 59
2.6. Etude métrologique d'une LED blanche 60
2.6.1. LED et module d'asservissement en température 60
2.6.2. Caractérisation intrinsèque 61
2.6.2.1. Montage expérimental 61
2.6.2.2. Résultats expérimentaux 61
2.6.3. Mesure d'intensité lumineuse 62
2.6.3.1. Principe et considérations pour les LED 63
2.6.3.2. Banc photométrique 64
2.6.3.3. Procédure d'alignement du banc 66
2.6.3.4. Résultats et budget d'incertitude 67
2.6.4. Conclusion sur l'étude métrologique 70

3 Conclusion 70

Chapitre III L'indice de rendu des couleurs traçable au Système international d'unités 71

1 Mesures spectrales de sources à LED, calculs colorimétriques et incertitudes 72

1.1. Montage expérimental 72
1.1.1. Cabine à lumière et éclairages à LED 72
1.1.2. Spectroradiomètre 74
1.1.3. Etalonnage du spectroradiomètre 75
1.1.3.1. Etalonnage en longueur d'onde 75
1.1.3.2. Etalonnage en sensibilité spectrale 76
1.2. Mesures spectrales sur les LED : résultats et incertitudes 79
1.2.1. Spectres de LED 80
1.2.3. Analyse des incertitudes : méthode Monte Carlo 81
1.2.3.1. Principe de la méthode 81
1.2.3.2. Causes d'erreurs et incertitudes 81
1.2.3.3. Expression analytique entre grandeurs 82
1.2.3.4. Attribution d'une fonction de densité de probabilité à chaque cause d'erreur 82
1.2.3.5. Résultats d'analyse 91
1.3. Paramètres colorimétriques des LED : résultats et incertitudes 94
1.3.1. Coordonnées chromatiques 94
1.3.2. Température de couleur proximale 96
1.3.3. Indice de rendu des couleurs 97
1.3.4. Commentaires sur les résultats d'incertitudes 102
1.3.5. Conclusion 103

2 Variations radiométriques et colorimétriques en fonction de paramètres d'influence 103

2.1. Alimentation électrique 104
2.1.1. Etude en courant continu 104
2.1.1.1. Etude sur des alimentations en courant commerciales 104
2.1.1.1.1. Dispositif expérimental 104
2.1.1.1.2. Résultats 105
2.1.1.2. Variations autour du courant nominal 106
2.1.1.2.1. Dispositif expérimental 106
2.1.1.2.2. Résultats 107
2.1.2. Comparaisons entre courant continu et courant pulsé 108
2.1.2.1. Introduction 108
2.1.2.2. Dispositifs expérimentaux 110
2.1.2.3. Résultats 111
2.2. Fonction de transfert du monochromateur 116
2.2.1. Principe 116
2.2.2. Résultats 117
2.2.3. Méthodes de correction de l'effet de la largeur de bande 123
2.3. Observateurs colorimétriques 2° et 10° 123
2.4. Pas en longueur d'onde des spectres 126
2.5. Conclusion sur les paramètres d'influence 126

3 Conclusion 127

Chapitre IV Vers une redéfinition de l'indice de rendu des couleurs 129

1 Indice de rendu des couleurs : passé, présent, futur 129

1.1. Limitations 129
1.2. Considérations pour les LED 131
1.3. Méthode proposée par le NIST : « Color Quality Scale » 131

2 Etude psychophysique sur les éclairages à LED 136

2.1. Principe 136
2.2. Calcul de l'IRC et du CQS sur les éclairages à LED 136
2.3. Dispositif expérimental et protocole 140
2.4. Résultats et analyses 143
2.4.1. Mesures de luminance lumineuse 143
2.4.2. Mesures de reproductibilité 143
2.4.3. Analyse en moyenne des réponses des observateurs 144
2.4.4. Analyse par la loi du jugement comparatif 150
2.4.4.1. Introduction 150
2.4.4.2. Analyse par la « condition C » 151
2.4.4.3. Analyse par la « condition B » 153
2.4.4.4. Tests d'ajustement 157
2.4.4.5. Résultats 162
2.5. Conclusion sur l'étude psychophysique 166

3 Conclusion 167

Conclusion générale 169

Bibliographie 171

Annexe A : La métrologie en quelques mots 185
Annexe B : La Commission internationale de l'éclairage 191
Annexe C : Programme Matlab de calcul d'incertitude par la méthode Monte Carlo 195
Annexe D : Schéma électronique du boitier de commande des éclairages à LED 213
Annexe E : Publications et communications de l'auteur 215

Introduction

"Découvrir consiste à voir comme tout le monde et à réfléchir comme personne"

[Albert Szent Györgyi, biochimiste américain, 1893-1986]

Mon activité de recherche s'est effectuée dans l'équipe d'accueil 2367 « Instrumentation et références pour la mesure ». Cette activité est intégrée à celle de l'équipe « Rayonnements optiques » de l'Institut national de métrologie (INM) du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam).

Depuis 2005, le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) pilote et coordonne les travaux de l'ensemble des organismes français de métrologie qu'ils soient publics ou privés et regroupés en deux catégories : les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires associés. L'INM fait partie des quatre laboratoires nationaux fédérés par le LNE. Une restructuration est actuellement en cours entre le LNE et le Cnam avec la création du Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam.

L'INM a pour missions d'assurer la mise en place, la conservation, l'amélioration et le transfert des références métrologiques françaises pour quatre des sept grandeurs de base du Système international d'unités, le SI (Annexe A) :

- longueur (mètre) ;
- masse (kilogramme) ;
- température thermodynamique (kelvin) ;
- intensité lumineuse (candela).

L'équipe « Rayonnements optiques » a, à charge, la grandeur d'intensité lumineuse. De manière plus générale elle a, à charge, la mesure des rayonnements électromagnétiques couvrant deux grands domaines. D'une part, la radiométrie qui concerne la mesure des rayonnements énergétiques, et d'autre part, la photométrie qui traite de la mesure des rayonnements optiques ramenés à l'œil d'un observateur humain. Dans ce contexte, l'équipe doit assurer, au travers de ses recherches et du développement de bancs d'étalonnage, la traçabilité au SI, des mesures effectuées, en radiométrie et en photométrie, avec l'utilisation de sources lumineuses mais également de détecteurs.

Dans ce cadre, mon travail de recherche traite des nouvelles sources de lumière qui sont récemment apparu sur le marché, à savoir les diodes électroluminescentes (LED : Light Emitting Diode).

D'une technologie datant des années 60, les LED constituent actuellement un ensemble vaste et éclectique :

- Les LED de faible puissance (inférieure à 1 W) ont, depuis les années 70, des applications au quotidien : voyants lumineux sur divers appareils, signalisation routière,…

- Les LED blanches de forte puissance (supérieure à 1 W) sont, depuis le début des années 2000, en plein essor pour une utilisation dans le rétro-éclairage des écrans, les phares avant d'automobiles et l'éclairage général.

Ces nouvelles sources possèdent des propriétés qui diffèrent des sources usuelles, maintenant bien connues, que sont les sources à incandescence ou à fluorescence. Ces propriétés engendrent des problèmes dans la prédiction de l'apparence des objets colorés vus sous ce type de sources. De ce fait, la mesure des rayonnements optiques connaît actuellement une évolution principalement dans le domaine des applications destinées à la satisfaction des besoins sociétaux. Parmi ces besoins, nous pouvons citer la mesure de l'apparence dans des domaines tels que l'industrie (peinture de voiture, maquillage, couleur de cheveux,…), la conservation et la restauration d'œuvres d'art, la synthèse d'images,…

Ces mesures d'apparence doivent s'appuyer sur des références bien établies et traçables au SI pour être fiables et reconnues, d'où l'intérêt de l'INM pour cette thématique.

Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré à présenter les notions théoriques nécessaires à la compréhension des sujets abordés. Nous détaillons, d'une part, les notions de bases de la radiométrie et de la photométrie, et d'autre part, celles liées à la colorimétrie.

Le deuxième chapitre donne des informations générales sur les LED. Une première partie situe les LED dans un contexte historique, économique, environnemental et sociétal. La seconde partie traite des aspects technologiques des LED en développant notamment l'aspect métrologique au travers de mesures de caractéristiques courant-tension et flux-courant, puis au travers de mesures d'intensité lumineuse sur des LED asservies en température. Ces premières études permettent d'estimer l'impact de certains paramètres d'influence sur la quantité de lumière émise.

Le troisième chapitre traite de la qualité de la lumière émise par des systèmes d'éclairage à LED. Ceci par l'intermédiaire d'analyses de paramètres colorimétriques (coordonnées chromatiques, température de couleur proximale et indice de rendu des couleurs) obtenus par des mesures physiques. La première partie aborde le calcul des incertitudes sur les mesures spectrales et sur les paramètres colorimétriques, à partir d'une méthode de type Monte Carlo. La deuxième partie traite de l'aspect qualitatif de la lumière en s'appuyant sur l'analyse des variations spectrales des sources d'éclairages en fonction de divers paramètres d'influence.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la redéfinition de l'indice de rendu des couleurs (IRC), qui est un indicateur de la qualité de la lumière émise par une source d'éclairage. Une première partie explique les limitations de la méthode de calcul actuelle, les aspects spécifiques des LED, ainsi que les pistes d'évolution, notamment celle proposée par le « National Institute of Standards and Technology » (NIST). La deuxième partie donne les détails d'une expérience psychophysique développée à l'INM, dont l'objectif est d'évaluer la qualité d'éclairages à LED et de tester la capacité de prédiction de la méthode du NIST.

Chapitre I

Rayonnements optiques : de la grandeur physique à la perception de la couleur

"Vouloir être de son temps, c'est déjà être dépassé"

[Eugène Ionesco, écrivain français, 1909-1994]

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter les notions théoriques nécessaires à la compréhension de la suite du document.

Une première partie est consacrée aux grandeurs et unités utilisées en radiométrie, dans le système énergétique, et en photométrie, dans le système lumineux. Le passage du système énergétique au système lumineux est explicité au travers d'une description des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$. La traçabilité des mesures énergétiques au Système international d'unités (SI) est présentée par l'intermédiaire des références primaires. Celles-ci peuvent être divisées en deux groupes. D'une part, le corps noir, référence primaire pour le raccordement des sources, et d'autre part, le radiomètre à substitution électrique cryogénique, pour le raccordement des détecteurs.

Une deuxième partie s'attache à décrire physiquement la notion de couleur. La perception de la couleur est une expérience particulièrement subjective qui dépend principalement de trois composantes : la source de lumière, l'objet coloré avec ses attributs, et la vision humaine. Malgré son caractère subjectif nous verrons que la couleur a fait l'objet de nombreuses tentatives de classification et de quantification. En parallèle, les scientifiques ont étudié les moyens de modéliser la capacité de l'œil humain à voir les couleurs. Cela a conduit à définir des espaces colorimétriques de plus en plus uniformes. Enfin, nous décrirons les indicateurs qui ont été développés autour des modélisations de la couleur et de l'œil, pour tenter de rendre compte de la qualité d'une source lumineuse. Ces indicateurs sont principalement, la température de couleur proximale, caractérisant la teinte d'une source, et l'indice de rendu des couleurs, indiquant la capacité d'une source à restituer les couleurs par rapport à une source de référence.

1 Grandeurs et unités en radiométrie et en photométrie

1.1. Introduction

Sur Terre, nous baignons dans un panel continu de rayonnements électromagnétiques. Telle que l'illustre la figure 1.1, ils ont été classés par catégories suivant la fréquence de l'onde qui porte leur énergie. Il existe ainsi les ondes radios (de quelques Hz à 10^9 Hz), les micro-ondes (de 10^9 à 3×10^{11} Hz), les infrarouges (de 3×10^{11} à 4×10^{14} Hz), la lumière visible (3,84 x 10^{14} Hz à

7,69 x 10^{14} Hz), les ultraviolets (de 8 x 10^{14} Hz à 3 x 10^{17} Hz), les rayons X (de 3 x 10^{17} Hz à 5 x 10^{19} Hz), et les rayons gamma (≥ 5 x 10^{19} Hz).

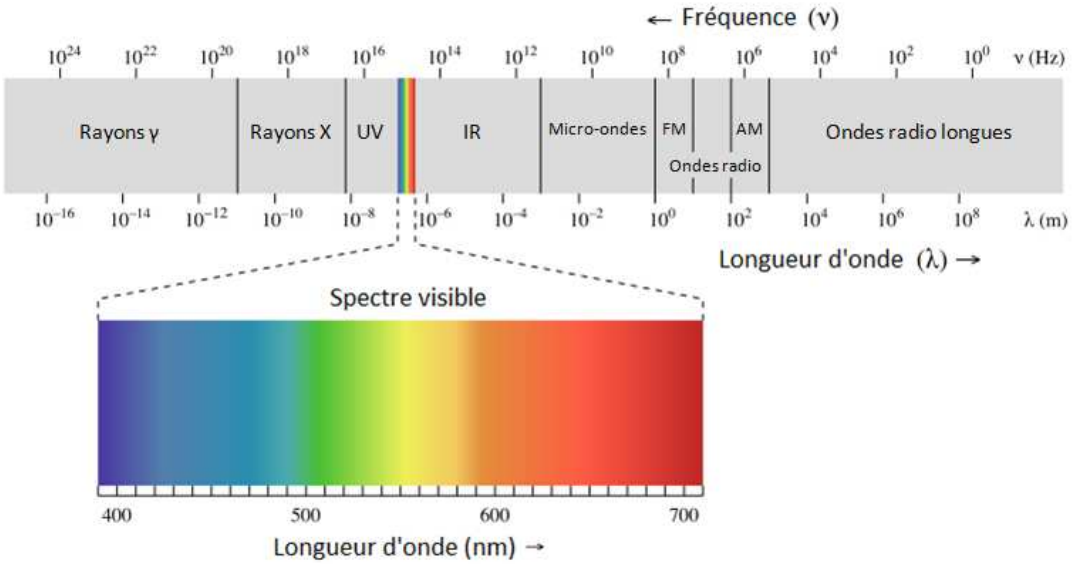


Fig. 1.1. - Spectre électromagnétique [RON 07].

La radiométrie, selon le vocabulaire international de l'éclairage [CIE 87], est la science qui concerne la « *mesure des grandeurs relatives à l'énergie rayonnante* ». Dans son sens le plus large, la radiométrie peut donc englober l'ensemble des radiations électromagnétiques détaillées précédemment. Dans son sens plus restrictif, et plus commun, la radiométrie concerne les radiations de longueurs d'onde comprises entre 100 et 2500 nm environ.

La photométrie, quant à elle, traite des mesures d'énergie rayonnante dans la zone visible du spectre électromagnétique perceptible par l'œil humain. Cette zone, ayant des limites mal définies, sera comprise, dans ce document, entre 380 et 780 nm. La définition de la photométrie est la *« mesure des grandeurs se rapportant au rayonnement tel qu'il est évalué selon une fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale donnée, par exemple V*(λ) *ou V'*(λ) *»* [CIE 87].

1.2. Grandeurs

1.2.1. Flux

Le flux ϕ correspond à un débit d'énergie *Q*. En d'autres termes, il s'agit d'une puissance émise par une source, ou transmise par un milieu de propagation, ou encore reçue par une surface, et ceci, sous forme de rayonnement tel que :

$$\Phi = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \tag{1.1}$$

1.2.2. Intensité

L'intensité *I* d'une source est le quotient entre, le flux dϕ émis par cette source et se propageant dans l'élément d'angle solide dΩ contenant la direction donnée, et cet élément d'angle solide tel que représenté sur la figure 1.2 et par l'expression :

$$I = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\Omega} \tag{1.2}$$

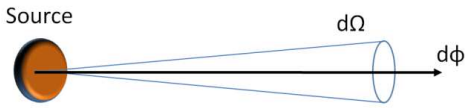


Fig. 1.2. - Intensité d'une source.

L'angle solide Ω sous lequel un objet est vu depuis un point d'observation *O* est le rapport entre l'aire *S(d)* de la projection du contour apparent de cet objet sur une sphère centrée en *O*, et le carré de la distance *d* au point d'observation (fig. 1.3) tel que :

$$\Omega = \frac{S(d)}{d^2} \tag{1.3}$$

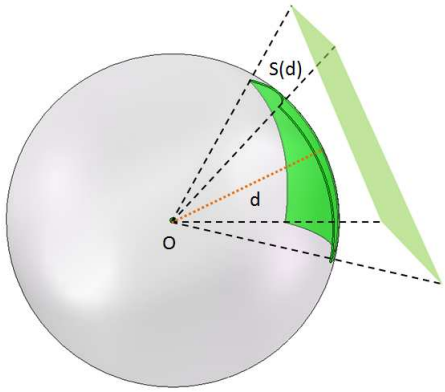


Fig. 1.3. - Schéma représentatif de la notion d'angle solide.

En général, on considère que l'angle solide correspond au rapport entre la surface apparente (fig. 1.4) de cet objet et le carré de la distance *d* entre le point *O* et le centre de cette surface, tel que :

$$d\Omega = \frac{dA.\cos\theta}{d^2} \tag{1.4}$$

Dans le cadre d'une application pratique, il est possible d'écrire que $\Omega = \frac{A.\cos\theta}{d^2}$ uniquement si les dimensions de l'objet sont petites devant la distance *d* au point d'observation *O*.

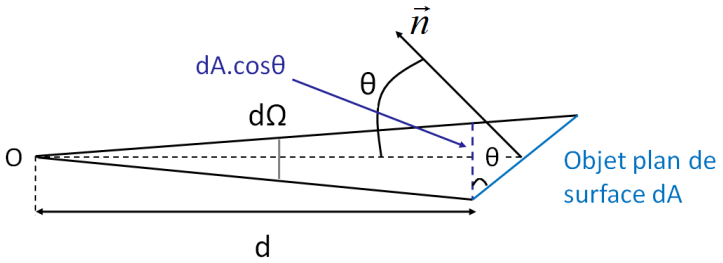


Fig. 1.4. - Schéma représentatif de la notion de surface apparente exprimée par *dA.cos*θ (*cos*θ est appelé facteur d'obliquité).

1.2.3. Eclairement

L'éclairement *E* correspond au rapport entre le flux reçu dϕ par une surface et l'aire d*A* de cette surface, tel que :

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \tag{1.5}$$

1.2.4. Exitance

L'exitance *M* correspond au rapport entre le flux émis dϕ par une surface et l'aire d*A* de cette surface, tel que :

$$M = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A} \tag{1.6}$$

1.2.5. Luminance

La luminance *L* correspond au flux dϕ transmis par un élément de surface d*A* et se propageant dans une direction donnée définie par un cône élémentaire. La luminance s'exprime alors par :

$$L = \frac{\mathrm{d}\Phi}{(\mathrm{d}A.\cos\theta).\mathrm{d}\Omega} \tag{1.7}$$

avec :

- $\mathrm{d}\Phi$, le flux transmis par un faisceau élémentaire passant par l'élément de surface d*A* et se propageant dans l'angle solide $\mathrm{d}\Omega$ contenant la direction donnée ;
- θ, l'angle entre la normale à la surface d*A* et la direction du faisceau.

En des termes plus simples, la luminance peut être vue comme étant l'énergie portée par un rayon lumineux.

1.3. Unités

Le tableau 1.1 résume les principales grandeurs et unités radiométriques et photométriques du Système international d'unités (SI) que l'on doit utiliser pour quantifier les grandeurs dans le système énergétique et lumineux.

Grandeur	**Définition mathématique**	**Système énergétique (radiométrie)**		**Système lumineux (photométrie)**	
		Symbole	**Unité**	**Symbole**	**Unité**
Flux	$\Phi = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$	Φ_e	W	Φ_v	lm
Energie	$Q = \int_{\Delta t} \Phi \mathrm{d}t$	Q_e	J	Q_v	lm.s
Intensité	$I = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\Omega}$	I_e	$W.sr^{-1}$	I_v	cd
Luminance	$L = \frac{\mathrm{d}\Phi}{(\mathrm{d}A.\cos\theta).\mathrm{d}\Omega}$	L_e	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	L_v	$cd.m^{-2}$
Eclairement	$E = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A}$	E_e	$W.m^{-2}$	E_v	lx
Exitance	$M = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A}$	M_e	$W.m^{-2}$	M_v	lx

Tab. 1.1. - Grandeurs et unités radiométriques et photométriques du Système international d'unités.

- lx (lux) = lm.m^{-2} (lux en latin signifie lumière, et plus particulièrement lumière crée par Dieu lors du premier jour de la création [ZUP 09]. C'est cette lumière (jour) qu'il sépara des ténèbres (nuit)).
- lm (lumen) = cd.sr (lumen signifie également lumière en latin, mais il s'agit de la lumière du quatrième jour correspondant à celle de la voute céleste [ZUP 09]).

Le passage des grandeurs radiométriques aux grandeurs photométriques est réalisé par l'intermédiaire des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain.

1.4. Fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain

La Commission internationale de l'éclairage (CIE) (Annexe B) a défini deux fonctions d'efficacité lumineuse moyenne de l'œil humain, nommées *V*(λ) et *V'*(λ), telles que représentées par la figure 1.5 :

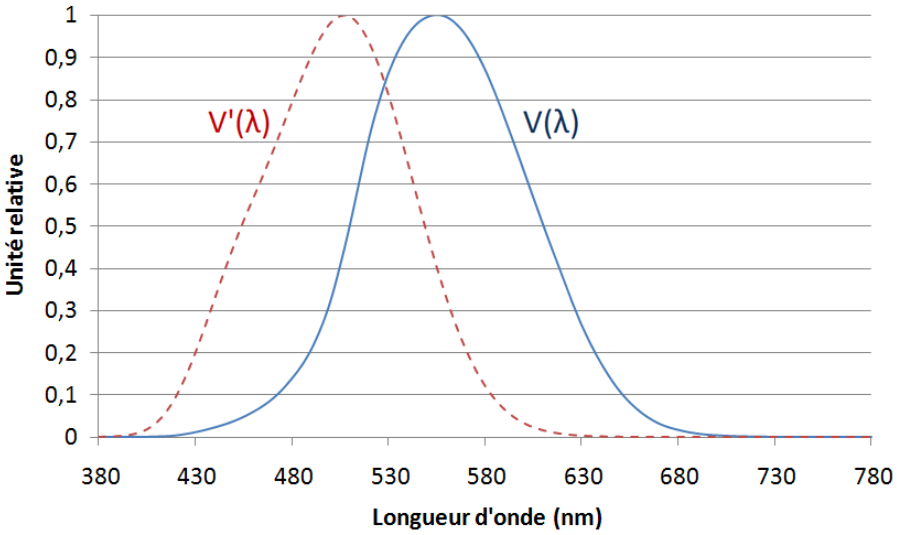


Fig. 1.5. - Fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain [CIE 04b].

- *V*(λ) est associée à la vision photopique (diurne), pour laquelle la luminance lumineuse est supérieure à 10 cd.m^{-2} environ. Elle met en jeu la vision par les cônes de la rétine (§ 2.1.4. La vision humaine) et son maximum d'efficacité se situe à λ = 0,555 µm ;

- *V'*(λ) est associée à la vision scotopique (nocturne), pour laquelle la luminance lumineuse est inférieure à 10^{-3} cd.m^{-2} environ. Elle met en jeu la vision par les bâtonnets de la rétine (§ 2.1.4. La vision humaine) et son maximum d'efficacité se situe à λ = 0,507 µm.

Le décalage vers les courtes longueurs d'onde de la courbe *V'*(λ) par rapport à *V*(λ), est dû à la différence de sensibilité spectrale des cônes et bâtonnets, et est appelé l'effet Purkinje en référence à Johannes Evangelista Purkinje (1787-1869) qui découvrit ce phénomène en 1825.

Pour les niveaux intermédiaires de luminance lumineuse compris entre 10^{-3} et 10 cd.m^{-2}, la vision est dite mésopique et la fonction d'efficacité lumineuse correspondante dépend du niveau de l'éclairage ambiant. Pour ce type de vision, les mécanismes mis en jeu sont très complexes du fait de l'intervention des quatre photorécepteurs rétiniens (§ 2.1.4. La vision humaine).

Outre le fait que les fonctions d'efficacité lumineuse varient d'une personne à l'autre, elles varient également, pour une même personne, en fonction de son âge (l'œil est plus sensible dans le bleu dans l'enfance), de sa santé, et des conditions d'observation. L'ensemble des mesures effectuées sur

un panel d'individus a permis à la CIE de définir deux courbes moyennes ($V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$) pour un observateur de référence.

1.5. Relation de passage entre systèmes énergétique et lumineux

Pour passer des grandeurs radiométriques aux grandeurs photométriques, il est nécessaire d'utiliser les fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain définies précédemment.

Considérons, à titre d'exemple, le passage d'une grandeur de flux énergétique ϕ_e, à celle de flux lumineux ϕ_v.

Le flux lumineux spectrique $\phi_{v,\lambda}(\lambda)$, s'exprime par la multiplication entre le flux énergétique spectrique $\phi_{e,\lambda}(\lambda)$, et la fonction $V(\lambda)$ (ou $V'(\lambda)$) pondérée par sa valeur absolue au maximum, c'est-à-dire par l'efficacité lumineuse maximale, notée K_m (ou K'_m), correspondant à la vision photopique (ou à la vision scotopique). L'hypothèse de validité d'un observateur de référence donne une valeur du flux lumineux spectrique perçu, en fonction d'une valeur du flux énergétique spectrique mesuré, tel que :

$$\Phi_{v,\lambda}(\lambda) = K_m.V(\lambda).\Phi_{e,\lambda}(\lambda) \tag{1.8}$$

en vision photopique avec $K_m = K(\lambda=555) = 683{,}002\ lm.W^{-1}$ [CIE 04b]

$$\Phi'_{v,\lambda}(\lambda) = K'_m.V'(\lambda).\Phi_{e,\lambda}(\lambda) \tag{1.9}$$

en vision scotopique avec $K'_m = K(\lambda=507) = 1700{,}05\ lm.W^{-1}$ [CIE 04b]

Le flux lumineux ϕ_v (ou ϕ'_v) correspondant au rayonnement, est l'intégrale de $\phi_{v,\lambda}(\lambda)$ (ou $\phi'_{v,\lambda}(\lambda)$) sur l'ensemble du spectre visible :

$$\Phi_v = \int_{380}^{780} \Phi_{v,\lambda}(\lambda).d\lambda = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda).\Phi_{e,\lambda}(\lambda).d\lambda \tag{1.10}$$

La relation de passage pour les autres grandeurs (intensité, éclairement,…) suit exactement le même raisonnement.

La mesure des grandeurs radiométriques dont découlent les grandeurs photométriques s'appuient sur des références primaires permettant d'assurer la traçabilité au SI.

1.6. Références primaires

Dans le domaine des rayonnements optiques nous retrouvons deux types de références primaires : l'une dédiée aux sources et l'autre aux détecteurs. Ces deux références sont, respectivement, le corps noir et le radiomètre à substitution électrique cryogénique.

1.6.1. Corps noir

Un corps noir est un « *radiateur thermique idéal qui absorbe complètement toutes les radiations incidentes quelles que soient leur longueur d'onde, leur direction et leur état de polarisation* » [CIE 87]. Il transforme la totalité du flux absorbé en chaleur qui est alors émise sous forme de rayonnement électromagnétique. Comme ce rayonnement est lié à sa température il est possible de

déterminer la température du corps noir, connaissant la longueur d'onde du rayonnement qu'il émet, et inversement.

La notion de corps noir étant idéale, on tente en pratique de fabriquer des corps dont les propriétés s'en approchent le mieux possible. Il est alors envisageable de calculer la température thermodynamique d'un corps quelconque avec la loi de Planck, pourvu que ses propriétés ne soient pas trop éloignées de celles du corps noir.

La loi de Planck permet d'exprimer la luminance énergétique spectrique, notée $L_{e,\lambda}(\lambda,T)$, en fonction de la longueur d'onde λ du rayonnement dans un milieu d'indice *n* et de la température thermodynamique *T* du corps noir (fig. 1.6). Cette luminance s'exprime en $W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1}$ et s'écrit :

$$L_{e,\lambda}(\lambda,T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5 n^2\left(e^{\frac{hc}{\lambda nkT}}-1\right)}=\frac{c_1}{n^2\pi\lambda^5}.\left(e^{\frac{c_2}{\lambda nT}}-1\right)^{-1} \qquad (1.11)$$

avec :

- *c*, la vitesse de la lumière dans le vide égale à 299 792 458 $m.s^{-1}$ [COD 06] ;
- *h*, la constante de Planck égale à 6,626 068 96 x 10^{-34} J.s [COD 06] ;
- *k*, la constante de Boltzmann égale à 1,380 650 4 x 10^{-23} $J.K^{-1}$ [COD 06] ;
- *n*, indice de réfraction du milieu de propagation ;
- $c_1 = 2.\pi.h.c^2$ = 3,741 771 18 x 10^{-16} $W.m^2$ [COD 06] ;
- $c_2 = h.c/k$ = 1,438 8 x 10^{-2} m.K [CIE 04a] (1,438 775 2 x 10^{-2} m.K [COD 06]).

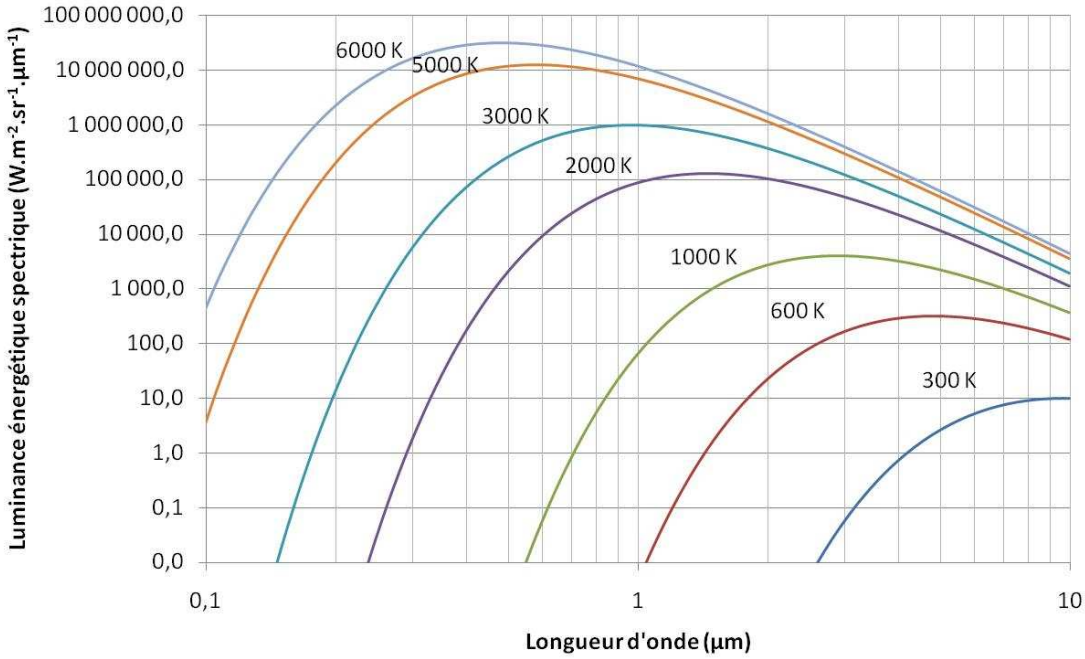


Fig. 1.6. - Luminance énergétique spectrique d'un corps noir porté à des températures comprises entre 300 et 6000 K, calculée à partir de la loi de Planck.

En pratique, le corps noir primaire est réalisé à partir de la matérialisation d'un point fixe de température de l'échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). A l'INM, il s'agit du point fixe du cuivre qui est utilisé. Son changement d'état a été fixé à une température égale à 1357,77 K [CIPM].

Ce corps noir permet d'étalonner, via un pyromètre, une lampe de référence en luminance énergétique à une longueur d'onde donnée (fixée à 650 nm par les caractéristiques du pyromètre utilisé à l'INM) et pour la température du point fixe du cuivre.

1.6.2. Radiomètre à substitution électrique cryogénique

Un radiomètre à substitution électrique permet de réaliser des mesures de flux énergétique en absolu. Cette mesure est basée sur la comparaison entre le flux énergétique d'un rayonnement et une puissance électrique.

Comme le montre la figure 1.7, le système est basé sur un détecteur qui est recouvert d'un absorbant dont le rôle est de transformer le flux incident en chaleur. Il en résulte une élévation de température du détecteur qui est mesurée par un capteur de température. Le chauffage par le rayonnement incident est ensuite remplacé par un chauffage électrique délivré par une résistance chauffante, de manière à obtenir la même élévation de température [TOU 99].

En première approximation, le flux énergétique du rayonnement incident est égal à la puissance électrique dissipée dans la résistance chauffante.

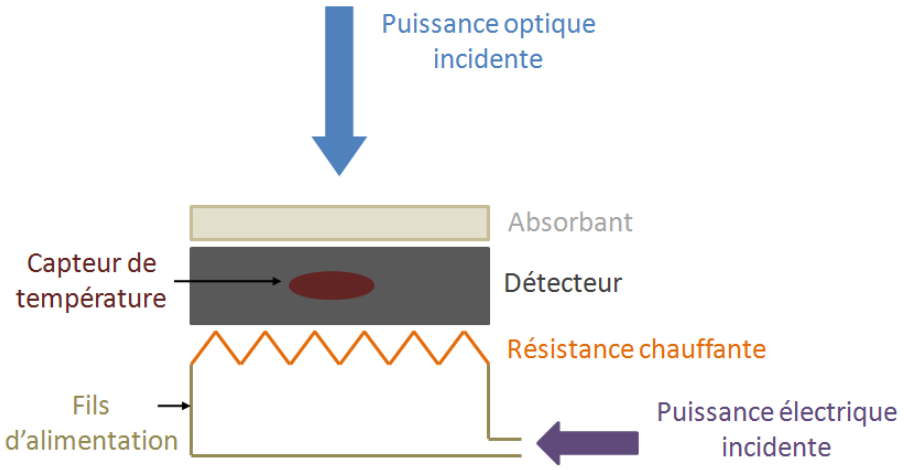


Fig. 1.7. - Schéma de principe d'un radiomètre à substitution électrique.

Dans la pratique l'égalité des puissances optique et électrique n'est pas parfaitement réalisable à cause des sources de non-équivalence entre les deux modes de chauffage dues à :

- ✓ l'absorption incomplète du rayonnement incident sur la surface absorbante. En effet, pour optimiser le temps de réponse du système par rapport à la conductivité thermique du matériau de l'absorbant, celui-ci a été choisi comme une fine couche plane de matériau métallique. Or, cette planéité de l'absorbant engendre une perte de flux par réflexion ;
- ✓ la différence de conductivité thermique entre les deux modes de chauffage qui n'ont pas lieu au même endroit ;
- ✓ la chaleur parasite produite par les fils d'alimentation de la résistance chauffante qui ont des résistances non nulles.

Afin de réduire ces sources de non-équivalence, les laboratoires ont utilisé les propriétés particulières de la matière à très basse température et ont réalisé des radiomètres à substitution électrique cryogéniques, fonctionnant à la température de l'hélium liquide (4,2 K). La conductivité thermique des matériaux utilisés est fortement améliorée (d'un facteur 10^4) à cette température, ce qui permet de remplacer la fine couche absorbante, par une cavité, et de piéger la quasi-totalité du

rayonnement incident. L'amélioration de la conductivité thermique permet, également, de réduire la différence entre les deux modes de chauffage à cause de leur localisation géographique différente. Enfin, l'emploi de fils d'alimentation supraconducteur (matériau dont la résistance est nulle en dessous d'une température seuil) permet de supprimer les erreurs dues à l'apport de chaleur par ces fils.

En pratique, le radiomètre cryogénique permet d'effectuer des mesures de flux énergétique dans une gamme de longueurs d'onde comprises entre 200 et 2500 nm environ avec une incertitude-type relative de 4×10^{-5}. Les valeurs obtenues sont ensuite comparées à celles mesurées par un détecteur de référence monté en piège. Cela permet d'obtenir la sensibilité spectrale de ce détecteur, qui servira d'élément de base pour la détermination de l'intensité lumineuse au travers de la candela [OBE 07]. La candela est l'unité de base du Système international d'unités pour la grandeur d'intensité lumineuse. Elle est définie comme suit :

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540 x 10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

1.7. Facteur d'adaptation spectral

Afin de réaliser expérimentalement des mesures dans le système lumineux, il est nécessaire de concevoir des capteurs photométriques. Ceux-ci sont principalement composés d'un détecteur - avec une sensibilité spectrale intrinsèque - et de filtres spectralement sélectifs, placés en amont de la surface sensible du détecteur.

La transmission globale de ces filtres combinée à la sensibilité du détecteur doit permettre d'obtenir une sensibilité spectrale relative de la tête photométrique qui corresponde à la fonction d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain en vision photopique $V(\lambda)$.

Suivant le soin apporté à la réalisation des filtres spectralement sélectifs, ceux-ci permettent d'obtenir une sensibilité spectrale relative de la tête photométrique qui est plus ou moins proche de la courbe normalisée $V(\lambda)$.

Le facteur d'adaptation spectral (FAS) caractérise l'écart entre la sensibilité de la tête photométrique et $V(\lambda)$. Il se calcul de la manière suivante :

$$FAS = \frac{\int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda).V(\lambda).d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda).S_{555}(\lambda).d\lambda} \qquad (1.12)$$

avec :

- $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$, le flux énergétique spectrique incident ;
- $S_{555}(\lambda)$, la sensibilité spectrale du photomètre normalisée à 555 nm (correspondant au maximum de $V(\lambda)$).

D'après l'équation (1.12), le FAS est égal à 1 pour une tête photométrique parfaite. Outre le fait qu'il dépend de la sensibilité de la tête photométrique, le FAS dépend également de la répartition spectrale de la source à mesurer. Ainsi, les écarts entre la sensibilité de la tête photométrique et $V(\lambda)$ auront des effets différents en fonction de la source. Cela engendrera des erreurs plus ou moins importantes sur le résultat du mesurage.

2 Physique de la couleur

Après avoir exploré les grandeurs physiques caractérisant les rayonnements optiques, nous allons dans cette partie nous intéresser au phénomène de perception des couleurs et à sa quantification au travers de la modélisation de la couleur et de l'œil humain. En dernier lieu, nous décrirons les indicateurs numériques permettant de prédire la qualité d'une source lumineuse grâce aux modélisations précédemment citées.

2.1. Perception de la couleur

2.1.1. Introduction

La couleur est une sensation créée par l'interaction lumière-matière, détectée par les yeux et perçue par le cerveau. Là où il n'y a pas de rayonnement contenu dans la gamme de longueurs d'onde visibles, il n'y a pas de couleurs. De plus, la couleur pourra, selon le contexte dans laquelle elle se trouve, être perçue très différemment :

- La perception de la couleur ne sera pas la même suivant la source de lumière incidente (fig. 1.8). La lumière du jour fera ressortir les couleurs dites « naturelles » des objets tandis qu'un éclairage artificiel coloré modifiera ces couleurs.

- L'aspect physique d'un objet (matériau, état de surface, forme,…) influencera également la perception des couleurs.

- Selon l'environnement dans lequel est placé l'objet coloré (couleur d'arrière plan, objets colorés voisins,…) la sensation visuelle perçue évoluera. La sensibilité de l'observateur en fonction de son âge, son sexe, sa nationalité, sa religion, ses souvenirs,… feront de la couleur une expérience psychologique unique et très subjective.



Fig. 1.8. - Perception de mêmes échantillons de couleurs
en fonction de diverses sources d'éclairage.

La perception des couleurs est donc liée à la combinaison des éléments suivants :

- La **source lumineuse** avec sa répartition spectrale ;
- L'**objet coloré** avec ses propriétés intrinsèques (facteur spectral de luminance (§ 2.1.3. Objet coloré), texture, brillant,...) ;
- La **vision humaine** comprenant essentiellement l'œil avec ses photorécepteurs et le cerveau avec son système d'analyse.

2.1.2. Sources de lumière

2.1.2.1. Introduction

La source de lumière la plus couramment rencontrée est, bien entendu, la lumière du soleil. Cela étant, elle est très différente suivant l'endroit où l'on se trouve sur la planète, mais également suivant l'heure de la journée ou du temps qu'il fait. Sa répartition spectrale évolue donc en fonction

de multiples paramètres. Par conséquent, les objets colorés vus sous la lumière du jour n'ont jamais tout à fait le même aspect.

Pour pouvoir travailler sur les couleurs et obtenir des résultats prédictibles et répétables, la CIE a défini des sources d'éclairage de référence que l'on nomme illuminants.

2.1.2.2. Illuminants normalisés CIE

L'illuminant A représente le rayonnement d'un corps noir (radiateur de Planck) à une température de 2856 K, de coordonnées chromatiques dans l'espace CIE 1931 égales à : $(x,y) = (0{,}4476, 0{,}4074)$ (§ 2.3.2.2. Espace chromatique CIE 1931 XYZ et CIE 1964 XYZ). Sa répartition spectrale est donnée par l'expression (1.11) et est représentée sur la figure 1.9. Expérimentalement l'illuminant A peut être approché par une lampe à incandescence à filament de tungstène dont la température de couleur proximale est de 2856 K.

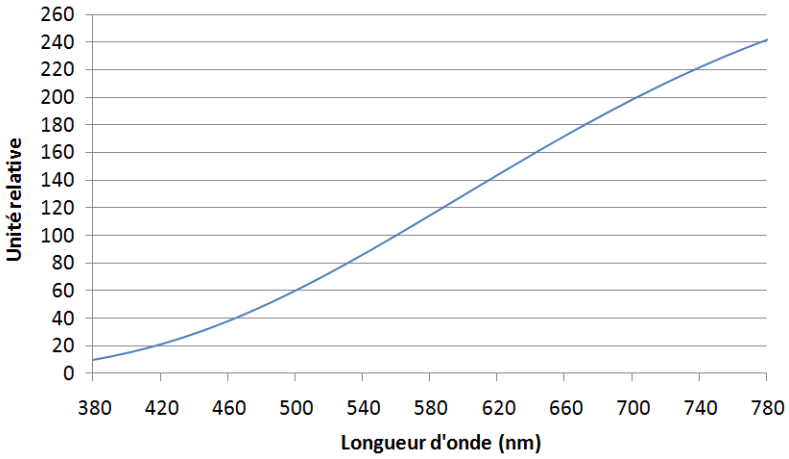


Fig. 1.9. - Répartition spectrale de l'illuminant A [CIE 04a].

L'illuminant B (obsolète depuis la normalisation des illuminants D) représente le rayonnement solaire direct à midi à une température de couleur proximale de 4870 K environ, de coordonnées chromatiques dans l'espace CIE 1931 égales à : $(x,y) = (0{,}3484, 0{,}3516)$.

L'illuminant C représente la lumière moyenne du jour à une température de couleur proximale de 6770 K environ, de coordonnées chromatiques dans l'espace CIE 1931 égales à : $(x,y) = (0{,}3101, 0{,}3162)$.

Les illuminants D (initiale de « daylight ») représentent diverses phases du rayonnement solaire global pour des températures de couleur proximale variant de 4000 à 25 000 K. Les répartitions spectrales de ces rayonnements sont données par l'expression (1.13).
Le calcul de ces répartitions est effectué à partir de valeurs expérimentales associées à une méthode de vecteurs propres.

Les valeurs expérimentales correspondent à des distributions d'éclairement spectrique relatif de différents échantillons de rayonnement solaire. Elles ont été fournies par H. R. Condit, S. T. Henderson et H. W. Budde pour un total de six cent vingt deux répartitions spectrales [JUD 64].
Le traitement de ces distributions est basé sur une méthode de vecteurs propres décrite par J. L. Simonds [SIM 63]. Celle-ci consiste à déterminer, à partir de courbes expérimentales, le nombre et la forme de courbes de base, autrement appelées vecteurs propres, qui, lorsqu'on les combine linéairement, donnent les courbes mesurées expérimentalement.

En appliquant cette méthode à partir des six cent vingt deux répartitions spectrales obtenues, il a été possible de déterminer trois courbes de base que l'on nomme $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ (fig. 1.10). A partir de celles-ci, il est possible de reconstituer une infinité de phases de la lumière du jour.

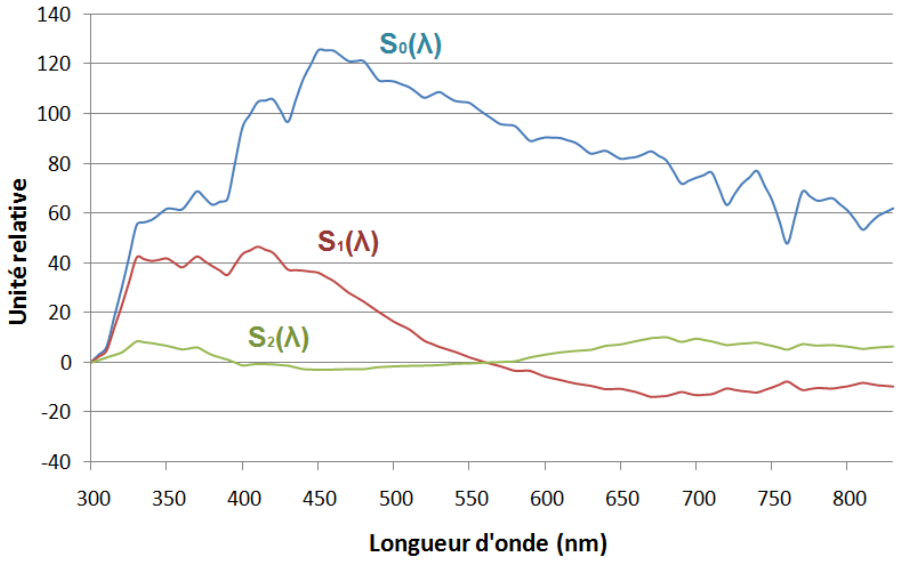


Fig. 1.10. - Représentation des courbes utilisées pour la reconstruction des phases du rayonnement solaire [CIE 04a].

La répartition spectrale d'un illuminant D est exprimée par [JUD 64] [SEV 96] [CIE 04a] :

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 . S_1(\lambda) + M_2 . S_2(\lambda) \tag{1.13}$$

où M_1 et M_2 sont des coefficients ajustables.

Ces deux coefficients sont donnés par :

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{-1{,}3515 - 1{,}7703.x_D + 5{,}9114.y_D}{0{,}0241 + 0{,}2562.x_D - 0{,}7341.y_D} \\ M_2 &= \frac{0{,}0300 - 31{,}4424.x_D + 30{,}0717.y_D}{0{,}0241 + 0{,}2562.x_D - 0{,}7341.y_D} \end{aligned} \tag{1.14}$$

avec :

$$\begin{aligned} x_D &= -4{,}6070.m^3 + 2{,}9678.m^2 + 0{,}09911.m + 0{,}244063 \quad \text{si} \quad 4000 < T' \le 7000 \\ x_D &= -2{,}0064.m^3 + 1{,}9018.m^2 + 0{,}24748.m + 0{,}237040 \quad \text{si} \quad 7000 < T' \le 25000 \\ y_D &= -3{,}000.x_D^{\,2} + 2{,}870.x_D - 0{,}275 \end{aligned} \tag{1.15}$$

où T' est la température de couleur proximale corrigée :

$$T' = \frac{1{,}4388}{1{,}4380} T \tag{1.16}$$

Cette correction provient du changement de valeur de la constante c_2 de l'équation (1.11) lors de la redéfinition de l'échelle internationale de température.

et *m* est la température inverse :

$$m = \frac{1000}{T'} \tag{1.17}$$

Voici quelques exemples d'illuminants D de référence, couramment utilisés (fig. 1.11) :

- D_{55} qui a une température de couleur proximale de 5500 K ;
- D_{65} qui a une température de couleur proximale de 6500 K, de coordonnées chromatiques dans l'espace CIE 1931 égales à : (*x*,*y*) = (0,3128, 0,3292) ;
- D_{75} qui a une température de couleur proximale de 7500 K.

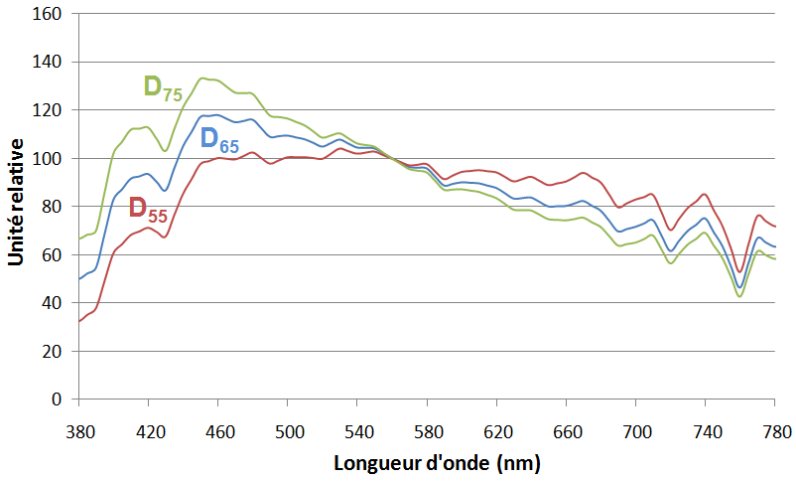


Fig. 1.11. - Répartition spectrale relative de quelques illuminants D [CIE 04a].

L'illuminant E représente la lumière d'énergie constante de coordonnées chromatiques dans l'espace CIE 1931 égales à : (*x*,*y*) = (0,3333, 0,3333).

Les illuminants F représentent le rayonnement émis par diverses lampes fluorescentes.
Les illuminants F1 à F6 correspondent à des lampes conventionnelles, les illuminants F7 à F9 représentent des lampes à bandes larges, et les illuminants F10 à F12 sont des lampes à trois bandes étroites. La figure 1.12 illustre des répartitions spectrales de quelques illuminants F représentatifs de ces trois catégories.

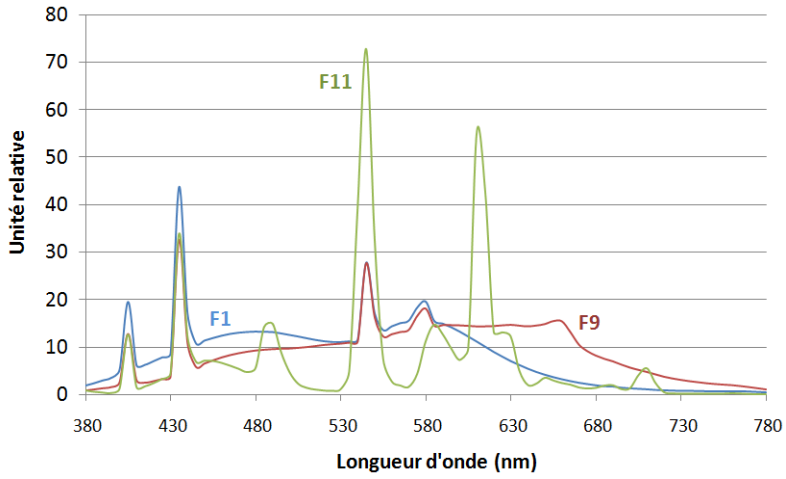


Fig. 1.12. - Répartition spectrale relative de quelques illuminants F [CIE 04a].

2.1.3. Objet coloré

Un objet nous apparaît coloré car il possède la capacité d'absorber des rayonnements incidents et d'en diffuser d'autres sur une gamme de longueur d'onde où l'œil humain est sensible.
Cet objet est caractérisé par ses propriétés intrinsèques d'absorption et de diffusion représentées, essentiellement, par son facteur spectral de luminance. Ce facteur est défini comme étant le « *rapport de la luminance énergétique de l'élément de surface dans la direction donnée à celle d'un diffuseur parfait par réflexion ou par transmission irradié dans les mêmes conditions* » [CIE 87]. La figure 1.13 représente un exemple de facteurs spectraux de luminance de trois plaques de céramiques de couleurs jaune, orange et rouge.

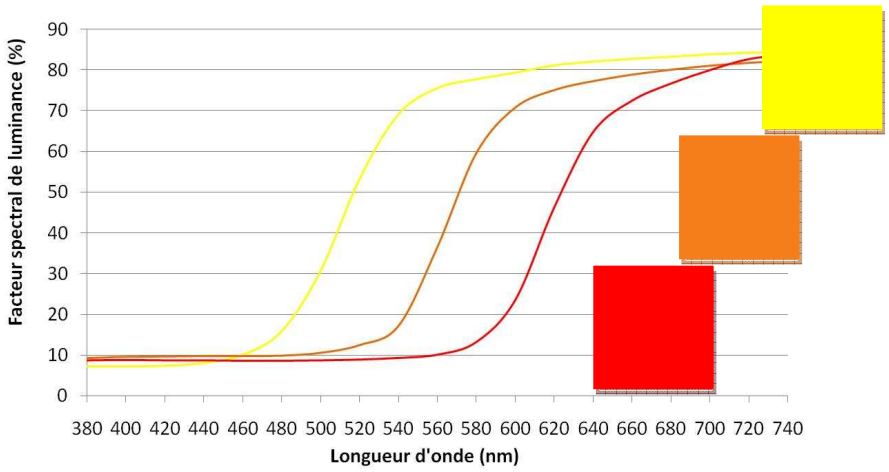


Fig. 1.13. - Facteurs spectraux de luminance de trois plaques de céramiques jaune, orange et rouge [CER].

2.1.4. La vision humaine

La vision humaine se compose des yeux, des nerfs optiques et des régions du cerveau où se forment les sensations visuelles.

L'***<u>œil humain</u>***, représenté par le schéma de la figure 1.14, est un organe sensoriel complexe qui a pour fonction de recevoir les rayonnements incidents et de les transformer en signaux bioélectriques pour que ceux-ci soient analysés par le cerveau. Il est de forme presque sphérique avec comme caractéristiques moyennes, un diamètre de 25 mm, une masse de 7 g, et un volume de 6,5 cm^3.

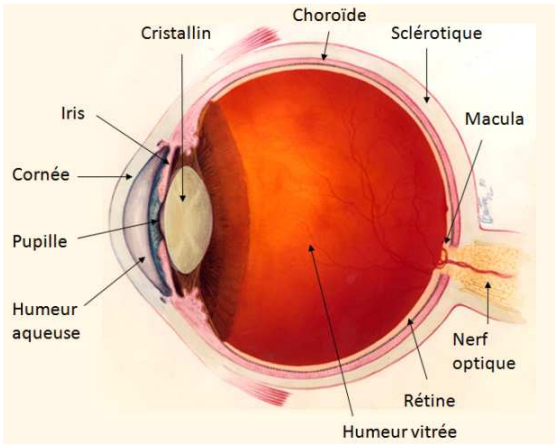


Fig. 1.14. - Représentation schématique de l'œil humain [NEI/NIH].

L'orientation de l'œil est assurée par six muscles qui le font se mouvoir dans la cavité osseuse qu'il occupe dans le crâne (fig. 1.15). Même lorsque l'œil paraît immobile les muscles conservent une activité permanente. Consciemment, ou inconsciemment, ils amènent l'axe optique à s'orienter dans la direction des scènes qui nous intéressent.

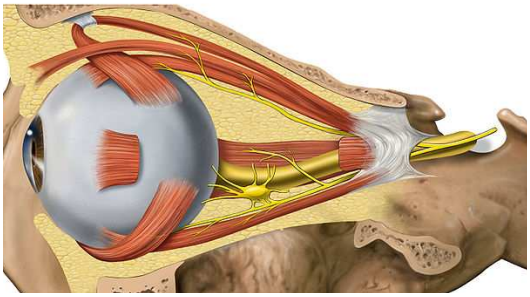


Fig. 1.15. - Représentation de l'œil humain positionné dans sa cavité osseuse et actionné par ses six muscles associés [LYN 06].

L'œil a une couche externe, la **sclérotique**, qui est une enveloppe de protection résistante. Elle recouvre environ les 5/6 de la surface de l'œil et elle lui confère sa couleur blanche et sa rigidité.

La **choroïde** est une couche vasculaire, de couleur noire et d'épaisseur comprise entre 0,5 et 0,75 mm. Elle est en continuité avec le corps ciliaire et l'iris qui se situent à l'avant de l'œil. Elle tapisse les 3/5 postérieurs du globe oculaire. Elle est également très riche en vaisseaux sanguins afin de nourrir, d'une part, l'iris et d'autre part, les photorécepteurs de la rétine.

La **rétine**, d'une épaisseur approximative de 250 µm, est la partie photosensible de l'œil, et ceci, grâce aux cellules nerveuses photoréceptrices qu'elle contient. Ces cellules qui se divisent en deux catégories (les bâtonnets et les cônes) ont pour rôle de transformer les photons absorbés en signaux bioélectriques :

- Les cônes sont environ 4 à 7 millions. Ils sont sensibles aux niveaux élevés de lumière (luminance supérieure à 10 $cd.m^{-2}$ environ) et sont responsables de la vision de jour. La densité de cônes est très élevée au centre de la rétine. Cette zone particulière, responsable de la vision des détails, est appelée fovéa.
Il existe trois types de cônes, nommés *S*, *M* et *L* pour « Short », « Medium », et « Long ». Chacun de ces types de cônes contient une protéine nommée iodopsine (constituée de deux molécules : le rétinal et l'opsine). Des différences dans la séquence des acides aminées de cette protéine engendrent des réponses spectrales différentes pour chaque type de cône. Ainsi, les cônes *S* sont sensibles aux courtes longueurs d'onde plutôt présentes dans la zone « bleue » du spectre visible avec un maximum de sensibilité autour de 420 nm. Les cônes *M* sont les plus sensibles dans la partie « verte » du spectre visible. Leur maximum de sensibilité se situe à 530 nm environ. Enfin, les cônes *L* sont sensibles aux grandes longueurs d'onde dans le « rouge » et leur maximum de sensibilité se situe aux alentours de 560 nm. Grâce à ces différentes réponses spectrales (fig. 1.16), les cônes sont responsables de la vision des couleurs.

- Les bâtonnets, de forme allongée, doivent, eux aussi, leur nom à leur forme. Ils sont environ 100 à 130 millions et sont présents dans les zones périphériques de la rétine. Les bâtonnets ont une très grande sensibilité à la lumière (à des niveaux de luminance inférieures à 10^{-3} $cd.m^{-2}$ environ) et sont, par conséquent, responsables de la vision de nuit. Ils contiennent une protéine appelée rhodopsine.
Les bâtonnets sont absents de la fovéa et ne proposent qu'un seul type de réponse spectrale (fig. 1.16). La vision scotopique est achromatique. De plus, l'absence des bâtonnets de la fovéa et

leur faible densité surfacique dans les zones périphériques de la rétine, ne permet pas la vision des détails.

La **cornée** est une membrane solide et transparente au travers de laquelle la lumière entre à l'intérieur de l'œil. Elle est quasi sphérique en son centre et possède un diamètre approximatif de 15 mm et une épaisseur de 0,5 mm environ. Elle est privée de vaisseaux sanguins (sinon notre vision serait troublée) mais est nourrie par un liquide : **l'humeur aqueuse**. La cornée contient 80% d'eau et pour maintenir ce degré d'hydratation elle est constamment recouverte de larmes alimentées par les glandes lacrymales et réparties par le battement des paupières. La cornée est la principale lentille de l'œil, elle assure environ 80% de la réfraction.

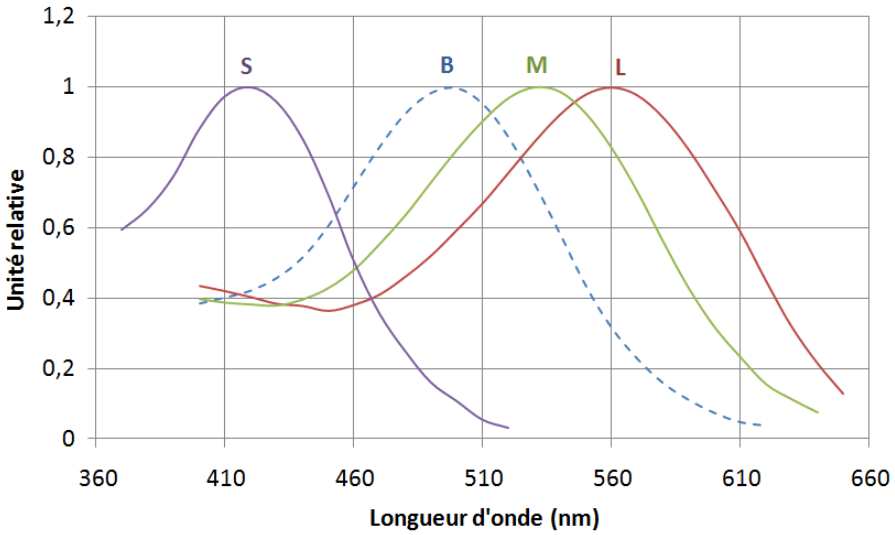


Fig. 1.16. - Densité optique (traduit indirectement la capacité d'un milieu à absorber la lumière qui le traverse) relative associée aux cônes (S, M, L) et aux bâtonnets (B) de l'œil humain [SEV 96] [DAR 83].

Le **cristallin** est une lentille molle d'environ 4 mm d'épaisseur composée de fines couches superposées. Il se déforme sous l'action du muscle ciliaire pour permettre une vision nette.

L'**humeur vitrée** occupe 80% du volume de l'œil et est constituée d'une gelée (acide hyaluronique) qui donne à l'œil sa consistance.

L'**iris** est le diaphragme de l'œil. Il est percé en son centre par la **pupille**. C'est un muscle qui fait varier l'ouverture de la pupille (entre 2,5 et 7 mm) afin de modifier la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil pour éviter l'éblouissement en plein soleil ou capter toute la lumière disponible la nuit.

La couleur de l'iris est déterminée par la présence d'un pigment, la mélanine. Il s'agit du même composé chimique qui donne leur couleur aux cheveux et à la peau. L'iris est bleu si la mélanine est peu concentrée, il est plus foncé quand la concentration augmente. Tous les nouveau-nés ont les yeux bleus parce que la mélanine est enfouie profondément dans le tissu de l'iris. Cependant, quelques mois plus tard, ce composé peut se rapprocher de la surface de l'iris et modifier sa teinte.

La **macula**, qui est également appelée tâche jaune, contient en son centre une petite dépression, la fovéa. Cette dernière est la zone d'acuité maximum de l'œil.

L'endroit de la rétine où le ***nerf optique*** se forme et part en direction du cerveau, ne possède pas de cellules photoréceptrices et n'est donc pas sensible. On l'appelle le point aveugle.

Le nerf optique est constitué d'un million de fibres nerveuses environ et a pour rôle de conduire les informations au cerveau, en passant par un relais très important, le corps genouillé latéral situé dans le thalamus. Ce dernier est chargé d'effectuer une première analyse des données en codant précisément les trains d'impulsions électriques qui lui parviennent des cellules de la rétine. Plusieurs cellules sont présentes dans le corps genouillé. D'une part, les cellules non antagonistes qui ont pour fonction d'adapter l'information envoyée au cerveau en fonction du niveau de luminance perçue (elles n'interviennent pas dans la vision des couleurs), et d'autre part, les cellules antagonistes qui ont pour fonction d'assurer le codage de l'information couleur.

Après l'étape de « pré-traitement » de l'information réalisé par le corps genouillé latéral, l'information est transmise dans le ***cortex visuel*** situé au pôle occipital du cerveau, à l'extrême opposé des yeux.

2.2. Modélisation de la couleur

2.2.1. Introduction

La couleur est un élément complexe à quantifier physiquement de par sa relation avec la vision humaine et donc, de par sa subjectivité. Malgré cet aspect très relatif de la couleur, certains scientifiques se sont attachés à la quantifier. Actuellement, nous retrouvons une multitude de classifications plus ou moins complètes, et plus ou moins complexes. Nous ne nommerons dans cette introduction que les plus emblématiques.

La première classification connue est celle de Aron Sigfrid Forsius (1569-1624) publiée en 1611 [FOR 11]. Vinrent, plus tard, celles de Philipp Otto Runge (1777-1810) en 1810 [RUN 10], de Eugène Chevreul (1786-1889) en 1839 [CHE 39], de Albert Henry Munsell (1858-1918) à partir de 1905 [MUN 05] [MUN 15], de Wilhelm Ostwald (1853-1932) à partir de 1916 [OST 16] [OST 17], ou beaucoup plus récemment le « Pantone matching system® » crée en 1963 par Lawrence Herbert [PAN].

Des classifications issus de travaux collectifs ont également vu le jour. Citons le Natural Color System (NCS) élaboré par le « Scandinavian Colour Institute » dont les travaux initiaux datent des années 1920 [NCS]. Quelques années plus tard émergea le système « Uniform Color Scale » (UCS) de l'« Optical Society of America » initié en 1947 par la création d'un comité de recherche présidé par Deane Brewster Judd (1900-1972) jusqu'en 1972, puis par David Lewis MacAdam (1910-1998). Cette classification a été publiée en 1974 par D. L. MacAdam [MAC 74].

Les publications de la Commission internationale de l'éclairage sur le rendu des couleurs des sources de lumière [CIE 65] [CIE 74] [CIE 95], que nous utiliserons dans la suite de ce document, s'appuient sur des échantillons de couleurs de la classification de A. H. Munsell. C'est pourquoi nous ne présenterons que cette classification.

Celle-ci se base sur trois attributs perceptifs fondamentaux : la teinte, la saturation et la clarté.

2.2.2. Teinte

La teinte, ou tonalité chromatique, correspond à ce que l'on pourrait appeler dans l'usage courant la « couleur » que l'on caractérise par les termes rouge, vert, bleu, marron,… (fig. 1.17) Pour pallier le manque de vocabulaire permettant de caractériser des teintes voisines, des références en rapport à des objets, des paysages, des plantes,… ont été définies au cours des générations. Par exemple : jaune citron, jaune provençal, bleu marine, bleu ciel, rose fuchsia, rose bonbon,…

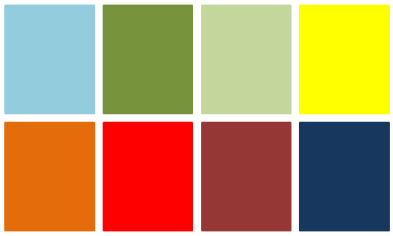


Fig. 1.17. - Représentation de diverses teintes.

2.2.3. Saturation

La saturation correspond au niveau de coloration (chromie) d'une surface évaluée relativement à sa luminosité (attribut d'une sensation visuelle selon lequel une surface paraît émettre plus ou moins de lumière) [CIE 87]. Une surface, de couleur fortement saturée, a un niveau de coloration élevé. Par contre, lorsque son niveau de coloration est très faible, la couleur de la surface est achromatique (couleur perçue dépourvue de teinte) (fig. 1.18).

Fig. 1.18. - Evolution croissante (de gauche à droite) de la saturation d'une couleur de teinte jaune.

2.2.4. Clarté

La clarté est un indicateur sur le degré de clair-sombre de la teinte, c'est-à-dire sur la quantité de lumière réfléchie par la surface colorée (fig. 1.19).



Fig. 1.19. - Evolution décroissante (de gauche à droite) de la clarté.

2.2.5. Classification des couleurs de Munsell

A. H. Munsell, peintre et professeur d'art américain, étudia les couleurs et décida de les ordonner. Pour ce faire, il les classa selon les trois attributs perceptifs que nous avons explicités précédemment (teinte, clarté et saturation) pour décrire un solide à trois dimensions représenté par la figure 1.20 :

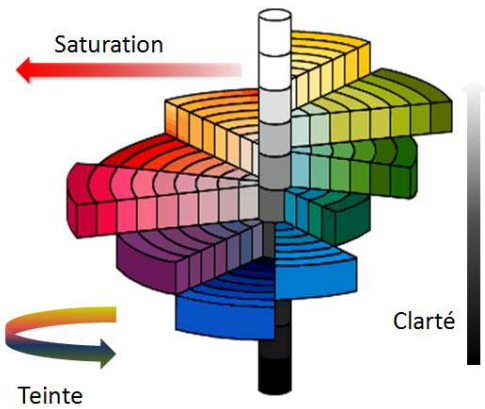


Fig. 1.20. - Représentation schématique de l'arbre des couleurs de Munsell [BRI 96].

- Une **teinte** *T*, est désignée par un chiffre variant de 1 à 10 associé à une ou deux lettres. Le chiffre désigne la position sur le cercle des teintes (fig. 1.21) autour d'une teinte de base. Munsell a défini dix teintes de base à partir de cinq teintes principales : R (rouge), Y (jaune), G (vert), B (bleu) et P (violet) et de cinq teintes secondaires : YR (rouge-jaune), GY (jaune-vert), BG (vert-bleu), PB (bleu-violet) et RP (violet-rouge). Par défaut, le chiffre 5 a été associé à ces dix teintes de base.

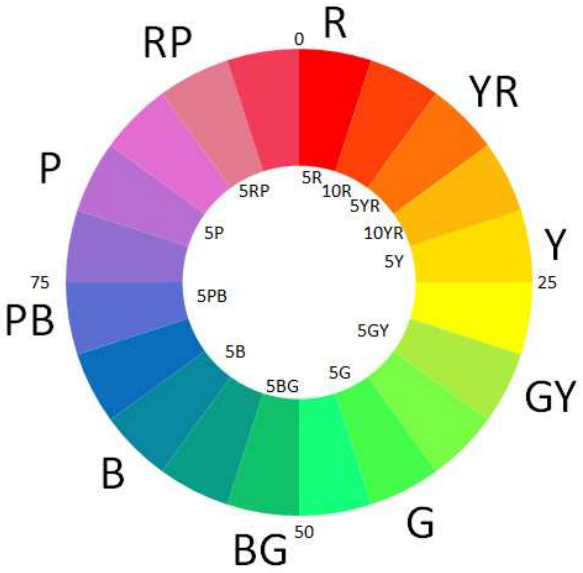


Fig. 1.21. - Cercle des teintes de l'atlas de Munsell.

Chaque secteur est alors découpé en dix intervalles pour obtenir un cercle de cent teintes. De cette façon, "10YR" désigne la teinte située en position 20 sur le cercle de la figure 1.21, "2G" désigne la position 42, "5B" la position 65,...

- La **clarté** *C*, est associée à un nombre variant entre 0 (noir) et 10 (blanc) et décrit le degré de clair-sombre de la couleur entre 0 et 100%.

- La **saturation** *S*, commence à 0 et va jusqu'à une limite variable selon les teintes. Les couleurs « pastels » ont des saturations pouvant aller jusqu'à 10, les couleurs « vives » ont plutôt des saturations comprises entre 10 et 20. Il est également possible d'attribuer des saturations variant entre 20 et 30 pour des couleurs « fluo ».

Par l'intermédiaire de cette classification une couleur se voit attribuer une notation du type "T C/S". Par exemple, une teinte « jaune provençale » aura comme notation Munsell "10YR 7/12", "10YR" désignant la teinte rouge-jaune, "7" la clarté (70%) et "12" la saturation (moyen-vif).

Progressivement la notation Munsell a été étendue afin de pouvoir décrire davantage de couleurs. Des nombres décimaux sont désormais utilisés pour caractériser les couleurs absentes de la classification de base. Par exemple, "5,6R 8,7/14,2" pour un rouge soutenu.

Lorsqu'une couleur est évaluée par sa teinte, sa clarté et sa saturation, la distinction des deux derniers paramètres n'est pas évidente surtout pour des niveaux d'éclairement faibles où toutes les couleurs ont tendance à perdre leur saturation. Il est donc d'usage de regrouper la teinte et la saturation d'une couleur dans une seule propriété d'apparence : la chromaticité, à laquelle on attribue un niveau de clarté. Cette organisation bipartite, des caractéristiques descriptives, à la base tripartites de la couleur, permet une représentation de la couleur dans un espace bidimensionnel plus facile à manipuler dans des calculs.

2.3. Modélisation colorimétrique de l'œil humain

2.3.1. Introduction

La Commission internationale de l'éclairage s'intéressa dès les années 1920 à l'élaboration d'un système de modélisation colorimétrique de l'œil humain.

Dès 1802, Thomas Young (1773-1829) émit l'hypothèse de la trivariance visuelle. Il voyait dans le système visuel une composition de trois récepteurs sélectif en longueur d'onde : l'un sensible au rouge, l'autre au vert, et le dernier en bleu. En 1855, James Clerk Maxwell (1831-1879) effectua les premières mesures visuelles dans l'objectif de tester l'hypothèse portant sur la trivariance. Ses résultats permirent de la vérifier et d'unifier les différentes théories de l'époque sur cette question. En 1931, la CIE reprit les travaux menés par William David Wright [WRI 28] [WRI 29] et John Guild [GUI 31], et définit un observateur colorimétrique de référence dont le système visuel était composé de trois filtres rétiniens, sous formes de trois fonctions primaires.

2.3.2. Systèmes colorimétriques

2.3.2.1. Espace chromatique CIE 1931 RGB

Le système proposé par la CIE en 1931 est associé aux trois couleurs primaires que sont le rouge *R*, le vert *G* et le bleu *B* avec, respectivement, des maximums en longueur d'onde de 700,0 nm, 546,1 nm et 435,8 nm.
Dans ce contexte, des fonctions colorimétriques représentatives d'un observateur moyen ayant une vision normale des couleurs et utilisant un champ visuel restreint d'une étendue angulaire de 2° ont été normalisées. Ces fonctions nommées $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, (nous les écrirons sous la forme $\bar{r}_\lambda$, $\bar{g}_\lambda$, $\bar{b}_\lambda$ dans la suite du document pour alléger les équations) et représentées sur la figure 1.22, correspondent aux fractions de lumière de couleurs primaires *R*, *G*, *B* nécessaires pour reproduire toutes les couleurs du spectre visible. Ce sont ces valeurs normalisées qui définissent l'observateur de référence colorimétrique CIE 1931 RGB.

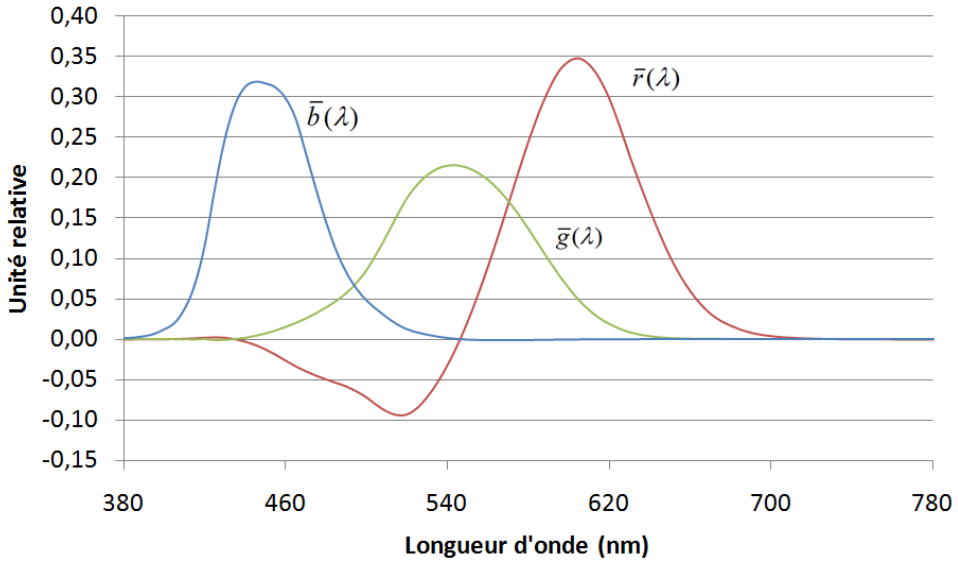


Fig. 1.22. - Fonctions colorimétriques du système RGB [CIE 31].

Ainsi à tout stimulus de couleur correspond une luminance et trois composantes trichromatiques *R*, *G* et *B* du stimulus de couleur, exprimées par :

$$R = \int_{\lambda} L_{\lambda} . \bar{r}_{\lambda} . \mathrm{d}\lambda$$
$$G = \int_{\lambda} L_{\lambda} . \bar{g}_{\lambda} . \mathrm{d}\lambda \qquad (1.18)$$
$$B = \int_{\lambda} L_{\lambda} . \bar{b}_{\lambda} . \mathrm{d}\lambda$$

avec :

- L_{λ}, la répartition spectrale relative (par exemple la luminance énergétique spectrique relative) de la source, ou de l'échantillon, étudié(e) dans le domaine visible (380-780 nm) ;

Pour représenter graphiquement la chromaticité du stimulus, les coordonnées chromatiques *r*, *g* et *b* sont calculées par :

$$r = \frac{R}{R+G+B}$$
$$g = \frac{G}{R+G+B} \qquad (1.19)$$
$$b = \frac{B}{R+G+B}$$

Comme $b + r + g = 1$ on utilise que les coordonnées *r* et *g* pour les représentations graphiques dans un espace à deux dimensions.

Dans ce système, les fonctions colorimétriques ont des valeurs négatives ce qui pose problème dans certains calculs. Pour pallier cela, la CIE étudia un nouveau choix de fonctions colorimétriques pour ne plus avoir que des valeurs positives dans les fonctions colorimétriques.

2.3.2.2. Espace chromatique CIE 1931 XYZ et CIE 1964 XYZ

La présence de valeurs négatives dans les fonctions $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, conduisit à la normalisation des fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, (que nous écrirons dans les équations $\bar{x}_{\lambda}$, $\bar{y}_{\lambda}$, $\bar{z}_{\lambda}$) qui elles, n'ont pas de valeur négative. Celles-ci ont été déterminées par D. B. Judd à partir des travaux expérimentaux de W. D. Wright et J. Guild, précédemment cités, effectués entre 1928 et 1931 sur un panel d'observateurs utilisant un champ visuel restreint d'une étendue angulaire de 2°.

Des ajustements ont été faits afin que la fonction $\bar{y}(\lambda)$ ait des valeurs proportionnelles à la fonction d'efficacité lumineuse de l'œil $V(\lambda)$. De cette façon, la composante trichromatique *Y* est proportionnelle à toute grandeur photométrique caractérisant le stimulus lumineux considéré [SEV 96].

Afin de compléter ces fonctions colorimétriques qui donnent des prédictions acceptables jusqu'à 4° [SEV 96], la CIE a défini en 1964 un second observateur de référence. Ceci a conduit à la normalisation des fonctions colorimétriques $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ qui ont été déterminées par D. B. Judd à partir des mesures effectuées par Walter Stanley Stiles (1901-1985), J. M. Burch [STI 59] [SEV 96] et N. I. Speranskaya [SPE 59] [SEV 96] en 1959 sur un panel d'observateurs utilisant un champ visuel élargi d'une étendue angulaire de 10° (abstraction fut faite de la partie centrale de 4° environ).

Ces six fonctions sont représentées ensemble sur la figure 1.23.

Il est possible de voir des variations vers les courtes longueurs d'onde des fonctions $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$. Cela est à imputer essentiellement à deux paramètres. Le premier paramètre concerne la variation de la densité optique par transmission (logarithme décimal de l'inverse du facteur de transmission) du pigment maculaire à 10° par rapport à 2°. Le pigment maculaire est une substance inerte qui absorbe les longueurs d'onde inférieures à 520 nm et dont le facteur d'absorption est maximal au niveau de la fovéa. Le second paramètre concerne la diminution de la taille du segment externe des cônes lorsque l'on s'éloigne de la fovéa. Ceci engendre une diminution de la densité optique par transmission des cônes, et par conséquent, une absorption plus sélective en longueur d'onde. Pour davantage de détails sur l'influence de ces deux paramètres nous renvoyons le lecteur à des références spécialisées traitant ce sujet [VIE 01][SCH 07].

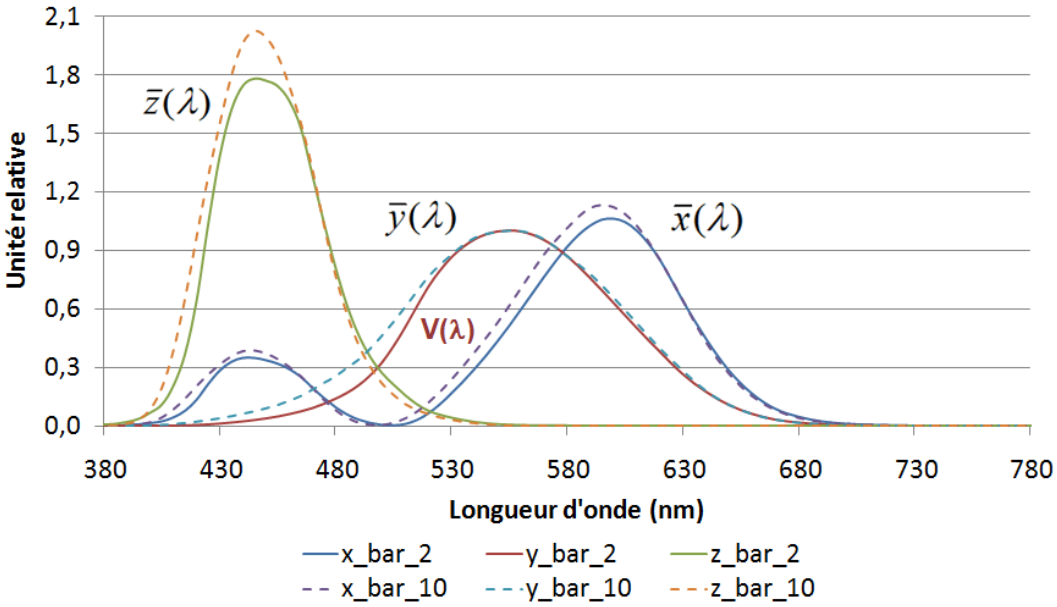


Fig. 1.23. - Fonctions colorimétriques du système CIE XYZ [CIE 06].

Les primaires *X*, *Y* et *Z* associées à ces fonctions sont irréalisables expérimentalement - par opposition aux primaires *R*, *V*, *B* qui existent physiquement - d'où leur appellation de « primaires non physiques ». Elles s'expriment par :

$$\begin{aligned} X &= k\int_{\lambda} L_\lambda.\bar{x}_\lambda.\mathrm{d}\lambda \\ Y &= k\int_{\lambda} L_\lambda.\bar{y}_\lambda.\mathrm{d}\lambda \\ Z &= k\int_{\lambda} L_\lambda.\bar{z}_\lambda.\mathrm{d}\lambda \end{aligned} \qquad (1.20)$$

avec :

- Dans le cas où L_λ est associée à la surface d'un échantillon, $k = \dfrac{100}{\int_{\lambda} L_\lambda.\bar{y}_\lambda.\mathrm{d}\lambda}$ donc Y est égal à 100. Dans le cas d'une source lumineuse où la valeur absolue d'une grandeur photométrique est nécessaire, $k = K_m$ = 683 lm/W [CIE 04a].

Les coordonnées chromatiques *x*, *y* et *z* s'expriment alors comme :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$
$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \qquad (1.21)$$
$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Les deux coordonnées *x* et *y* suffisent pour repérer les couleurs dans un plan puisque *x* + *y* + *z* = 1. Un exemple de représentation visuelle du diagramme de chromaticité associé est représenté sur la figure 1.24.

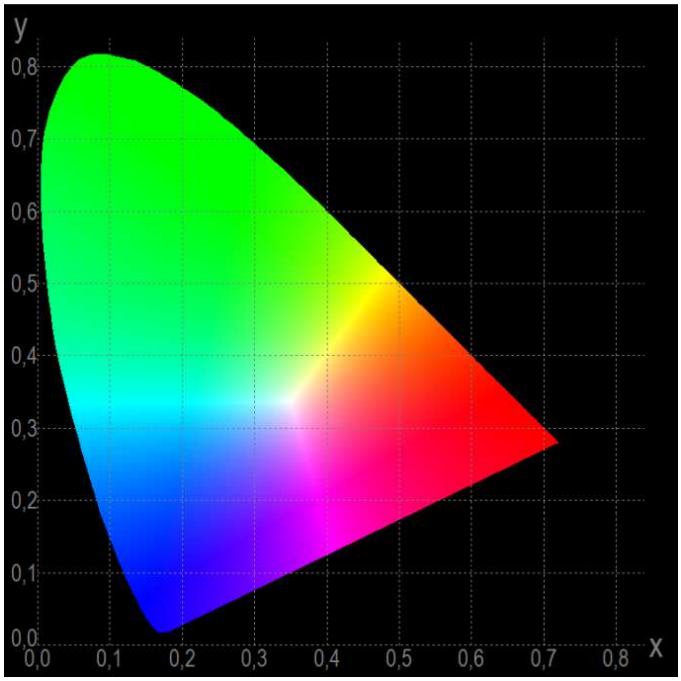


Fig. 1.24. - Exemple de représentation visuelle du diagramme de chromaticité dans l'espace CIE 1931 XYZ (2°) [GLY].

2.3.2.3. Espace chromatique CIE 1960 UVW

Afin d'augmenter l'uniformité du diagramme de chromaticité de 1931, la CIE recommanda en 1960 un nouvel espace chromatique définit par les coordonnées chromatiques *u* et *v* exprimées par :

$$u = \frac{4x}{-2x+12y+3}$$
$$v = \frac{6y}{-2x+12y+3}$$

ou (1.22)

$$u = \frac{4X}{X+15Y+3Z}$$
$$v = \frac{6Y}{X+15Y+3Z}$$

Ceci permet de tracer un nouveau diagramme de chromaticité représenté par la figure 1.25.

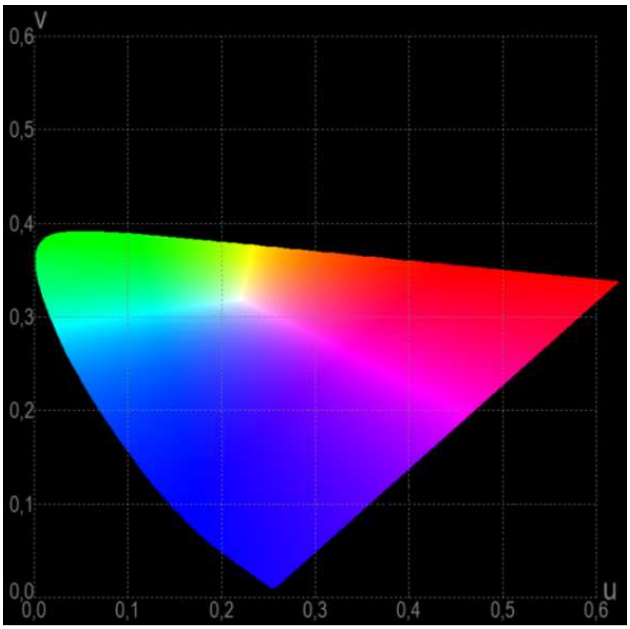


Fig. 1.25. - Exemple de représentation visuelle du diagramme de chromaticité dans l'espace CIE 1960 UVW (2°) [GLY].

Cette représentation n'est plus utilisée sauf pour les calculs de température de couleur proximale et d'indice de rendu des couleurs.

2.3.2.4. Espace chromatique CIE 1964 U*V*W*

Sur la base de l'espace UVW de 1960, Günter Wyszecki (1925-1985) proposa un nouvel espace en 1964 s'appuyant sur un illuminant de référence :

$$\begin{aligned} W^* &= 25.Y^{1/3} - 17 \\ U^* &= 13.W^*.(u - u_r) \\ V^* &= 13.W^*.(v - v_r) \end{aligned} \qquad (1.23)$$

avec :

- W^*, l'indice de clarté ;
- U^* et V^*, les indices de chromaticité ;
- Y, la luminance du rayonnement étudié : $1 \leq Y \leq 100$;
- u et v, les coordonnées chromatiques du rayonnement étudié dans l'espace CIE 1960 ;
- u_r et v_r, les coordonnées de l'illuminant de référence.

Pour la première fois, cette représentation prenait en considération une source de référence et essayait d'uniformiser les grandeurs afin d'évaluer les différences de couleur. Cet espace fut utilisé jusqu'à ce que la CIE propose en 1976 deux espaces CIELAB et CIELUV plus uniformes et surtout normalisés [CHA 04]. Aujourd'hui cet espace n'est plus utilisé que pour calculer l'indice de rendu des couleurs d'une source.

2.3.2.5. Espace chromatique CIE 1976 L*u*v*

La CIE a défini en 1976 un nouvel espace L*u*v*, autrement nommé CIELUV, dans l'objectif de mieux uniformiser les couleurs. Il est défini par [CIE 04a] :

$$
\begin{aligned}
L^* &= 116.\left(\frac{Y}{Y_r}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \qquad \text{quand} \qquad \frac{Y}{Y_r} > \left(\frac{24}{116}\right)^3 \\
L^* &= \frac{841}{108}.\left(\frac{Y}{Y_r}\right) + \frac{16}{116} \qquad \text{quand} \qquad \frac{Y}{Y_r} \le \left(\frac{24}{116}\right)^3 \\
u^* &= 13.L^*.(u' - u'_r) \\
v^* &= 13.L^*.(v' - v'_r)
\end{aligned}
\tag{1.24}
$$

avec :

- L^*, la clarté du rayonnement étudié ;
- Y, la luminance du rayonnement étudié ;
- Y_r, la luminance de l'illuminant de référence ;
- u' et v', les coordonnées du rayonnement étudié dans le diagramme de chromaticité CIE 1976 $u'v'$ décrit ci-dessous ;
- u'_r et v'_r, les coordonnées de l'illuminant de référence.

Le diagramme de coordonnées (u', v') (fig. 1.26) reprend celui de 1960 de coordonnées (u, v). Les nouvelles coordonnées u' et v' sont égales à :

$$u' = u \text{ et } v' = 1{,}5.v \tag{1.25}$$

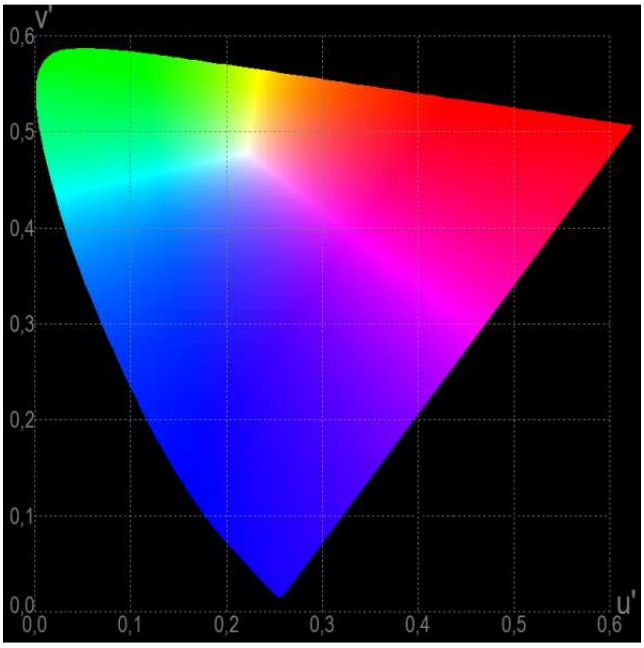


Fig. 1.26. - Exemple de représentation visuelle du diagramme de chromaticité CIE 1976 $u'v'$ (2°) [GLY].

2.3.2.6. Espace chromatique CIE 1976 L*a*b*

En 1976, la CIE adopta un deuxième espace chromatique en complément du CIELUV. Il s'agit de l'espace chromatique L*a*b*, également nommé CIELAB, et défini dans le cas où $\frac{Y}{Y_r} > \left(\frac{24}{116}\right)^3$ par [CIE 04a] :

$$L^* = 116.\left(\frac{Y}{Y_r}\right)^{\frac{1}{3}} - 16$$
$$a^* = 500.\left[\left(\frac{X}{X_r}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_r}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \quad (1.26)$$
$$b^* = 200.\left[\left(\frac{Y}{Y_r}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_r}\right)^{\frac{1}{3}}\right]$$

avec :

- X, Y et Z, les composantes chromatiques du rayonnement étudié dans l'espace CIE 1931 XYZ ;
- X_r, Y_r et Z_r, les composantes chromatiques du rayonnement de la source de référence.

Si $\frac{Y}{Y_r} \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3$ alors les termes $\left(\frac{X}{X_r}\right)^{\frac{1}{3}}$, $\left(\frac{Y}{Y_r}\right)^{\frac{1}{3}}$, $\left(\frac{Z}{Z_r}\right)^{\frac{1}{3}}$ sont remplacés par :

$$\left(\frac{X}{X_r}\right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow \frac{841}{108}.\left(\frac{X}{X_r}\right) + \frac{16}{116}$$
$$\left(\frac{Y}{Y_r}\right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow \frac{841}{108}.\left(\frac{Y}{Y_r}\right) + \frac{16}{116} \quad (1.27)$$
$$\left(\frac{Z}{Z_r}\right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow \frac{841}{108}.\left(\frac{Z}{Z_r}\right) + \frac{16}{116}$$

L'espace CIELAB est actuellement le plus utilisé pour la représentation des couleurs des objets.

2.3.3. Adaptation chromatique et illuminant de référence

Comme nous venons de le voir, les espaces CIE 1964 U*V*W*, CIELAB et CIELUV prennent en compte un illuminant de référence. Cela provient de la volonté de considérer l'adaptation chromatique de l'œil humain.

L'adaptation, au sens général, représente selon la CIE, le « *processus de modification de l'état d'un système visuel qui a été, ou est, soumis à des stimulus lumineux de différentes luminances, répartitions spectrales et étendues angulaires* » [CIE 87]. L'adaptation chromatique concerne, plus spécifiquement, le processus produit « *sous l'action de stimulus où l'effet des différences de répartition spectrale relative prédomine* » [CIE 87].

Ce phénomène a pour origine les variations de sensibilité des photorécepteurs de l'œil en fonction de la scène observée, à un instant *t*, dans un environnement donné et l'adaptation résultante de l'observation, à l'instant *t-1*, d'une autre scène, dans un autre environnement. Cette adaptation chromatique à une lumière colorée a pour effet de modifier l'apparence générale de la scène observée à l'instant *t* car la lumière de l'instant *t-1* a diminué la sensibilité des photorécepteurs qu'elle a excité.

La prise en compte de cette adaptation amène à choisir un illuminant de référence de même température de couleur proximale (§ 2.4. Température de couleur et température de couleur proximale), ou dit plus simplement, de même teinte, que la source étudiée pour pouvoir effectuer des comparaisons de sources lumineuses.

2.3.4. Différences de couleur

La comparaison de sources lumineuses s'appuie sur la notion de différence de couleur. Ainsi, pour pouvoir apprécier rigoureusement une différence de couleur entre deux sources, dans les domaines scientifique, industriel et commercial, il est indispensable de pouvoir la quantifier. C'est la condition de base pour pouvoir effectuer des comparaisons objectives.

En principe, il serait nécessaire que les méthodes de calcul des différences de couleur soient identiques et utilisées de la même façon, par tous, pour pouvoir être comparées. Malheureusement, aucune définition, ni normalisation, n'existe pour le calcul de différence de couleur. Cela étant, plusieurs méthodes de calcul ont été développées et dès lors que des différences de couleur sont nécessaires pour des calculs colorimétriques « normalisés », le choix de la méthode est spécifié dans les recommandations de la CIE [CIE 95].

La représentation graphique des couleurs dans un espace uniforme permet de quantifier, mathématiquement, une distance entre deux points de coordonnées connues. Cette distance correspond à la différence de couleur.

En mathématiques, la distance *d* sur un ensemble *E,* contenu, par exemple, dans $\Re$, correspond à une application vérifiant les propriétés suivantes :

symétrie	$\forall x, y \in E, d(x,y) = d(y,x)$
séparation	$\forall x, y \in E, d(x,y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
inégalité triangulaire	$\forall x, y, z \in E, d(x,z) \leq d(x,y) + d(y,z)$

avec *x*, *y* et *z* trois éléments de l'ensemble *E*.

La façon la plus intuitive de quantifier cette distance est d'utiliser le théorème de Pythagore. Si l'on considère deux points de coordonnées (a_1, a_2) et (b_1, b_2) dans un espace à deux dimensions uniforme, alors la distance euclidienne d_2, entre ces deux points est donnée par :

$$d_2 = \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2} \tag{1.28}$$

Il est possible, mathématiquement, de généraliser ce principe pour des espaces à *n* dimensions de façon à obtenir une distance d_n, égale à :

$$d_n = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (b_i - a_i)^2} \tag{1.29}$$

La difficulté d'application de cette méthode vient de la validité de l'uniformité de l'espace colorimétrique au sein duquel les différences de couleur sont calculées.

2.4. Température de couleur et température de couleur proximale

La température de couleur d'une source est la « *température du radiateur de Planck dont le rayonnement a la même chromaticité que celle du stimulus donné* » [CIE 87]. De façon usuelle, rares sont les sources à avoir des spectres semblables à ceux du corps noirs. Ainsi, la notion de température de couleur proximale a été définie comme étant la « *température du radiateur de Planck dont la couleur perçue ressemble le plus, dans les conditions d'observation spécifiées, à celle d'un stimulus donné de même luminosité* » [CIE 87]. Cette définition revêt un caractère expérimental et qualitatif que la définition de la température de couleur ne possède pas.

La température de couleur d'une source lumineuse émettant une lumière « blanche » caractérise sa teinte. Les lumières de type blanc chaud (jaune - rouge) ont des températures de couleur inférieures à 4000 K et les lumières de type blanc froid (bleu) des températures de couleur supérieures à 6000 K (fig. 1.27).

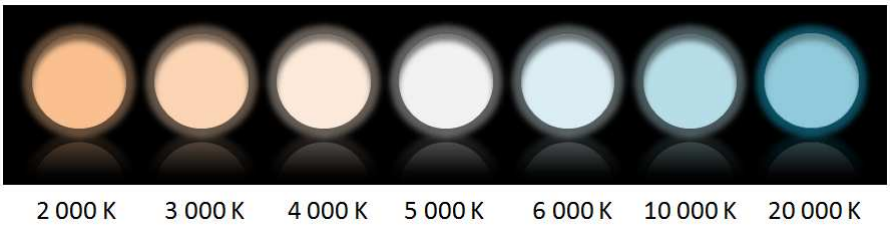


Fig. 1.27. - Exemple de représentation visuelle de températures de couleur proximales.

2.5. Indice de rendu des couleurs

2.5.1. Définition

L'indice de rendu des couleurs (IRC), est un chiffre compris entre 0 et 100, qui a pour objectif de rendre compte de l'aptitude d'une source de lumière à restituer les couleurs d'un objet par rapport à celles produites avec une source de référence.

La Commission internationale de l'éclairage en donne la définition suivante : « *Évaluation quantitative du degré d'accord entre la couleur psychologique d'un objet éclairé par l'illuminant en essai et celle du même objet éclairé par l'illuminant de référence, l'état d'adaptation chromatique ayant été correctement pris en compte* » [CIE 87].

La lumière du soleil, capable de restituer toutes les nuances de couleur par l'intermédiaire d'un spectre continu et relativement homogène sur l'ensemble du domaine visible, s'est vue attribuer une valeur d'IRC égale à 100. Par opposition, les lampes à vapeurs de sodium basse pression utilisées, par exemple, dans les tunnels routiers ont typiquement un IRC de 20, très mauvais (tab. 1.2 et 1.3) à cause de leur spectre très inhomogène dans le domaine visible.

IRC typique	Sources lumineuses
100	Lumière du jour
100	Lampe à incandescence
65-95	LED
60-90	Tubes fluorescents
20-25	Sodium basse et haute pression

Tab. 1.2. - Exemple de valeurs d'indice de rendu des couleurs pour quelques sources lumineuses.

IRC	Qualificatifs d'appréciations
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

Tab. 1.3. - Appréciations de la valeur des indices de rendu des couleurs.

2.5.2. Histoire

Les premiers travaux de la Commission internationale de l'éclairage pour le calcul de l'IRC datent de 1948 [CIE 48] et la méthode adoptée alors avait initialement été proposée par P. J. Bouma en 1937 [BOU 37]. Elle fut ensuite précisée par B. H. Crawford, qui travaillait sur le sujet au National Physical Laboratory (NPL) au milieu du XX^{ème} siècle.

Par la suite, de nombreuses recherches en Europe et aux Etats-Unis, ont permis de mettre en place une nouvelle méthode qui est toujours d'actualité. Celle-ci est basée sur le degré de changement de chromaticité produit par des échantillons colorés éclairés successivement par une source lumineuse à mesurer et une source de référence de même température de couleur proximale. Durant ces recherches de nombreux échantillons issus de la classification des couleurs de Munsell ont été utilisés, et finalement, il a été conclu que huit échantillons étaient suffisants pour décrire de manière générale le rendu des couleurs d'une source lumineuse.

Les différents résultats qui ont été obtenus à l'époque, furent réutilisés par le comité technique « Colour rendering » de la CIE en 1965 afin d'édicter une recommandation sur la détermination d'un indice de rendu des couleurs [CIE 65].

En 1974, la CIE a publié une révision de la méthode de 1965 [CIE 74] qui apporta quelques améliorations notamment sur la correction de distorsions par adaptation chromatique. Une nouvelle publication a été éditée en 1995 [CIE 95] sans modifications fondamentales des recommandations techniques. Cette dernière publication était accompagnée de deux programmes informatiques (sous forme d'exécutable) nommés « CIE13_3D » et « CIE13_3W ». Ceux-ci ont été développés pour fonctionner sur deux architectures d'ordinateur différentes. A l'heure actuelle, la méthode [CIE 95] est adoptée sur le plan international et est utilisée par les scientifiques, les industriels et les commerciaux.

Cependant, la révision de cette méthode, notamment pour les LED, est en cours d'investigation dans de nombreux laboratoires de recherche. La CIE, par l'intermédiaire du comité technique TC 1-69, **«** Colour Rendering of White Light Sources », dont la présidente, depuis la création du comité en 2006, est Wendy Davis du « National Institute of Standards and Technology » (NIST), doit préparer un rapport sur la recommandation d'une nouvelle méthode de détermination de l'IRC courant 2010.

2.5.3. Méthode actuelle de détermination de l'IRC

Le calcul de l'indice de rendu des couleurs se fait en comparant dans un espace colorimétrique donné, la couleur d'un objet lorsque celui-ci est éclairé, dans un premier temps, par la source à mesurer, notée indice *k*, puis, dans un deuxième temps, par une source de référence, notée indice *r*, de même température de couleur proximale T_{cp}. Le schéma de la figure 1.28 présente le raisonnement suivi pour l'élaboration de la méthode de calcul.

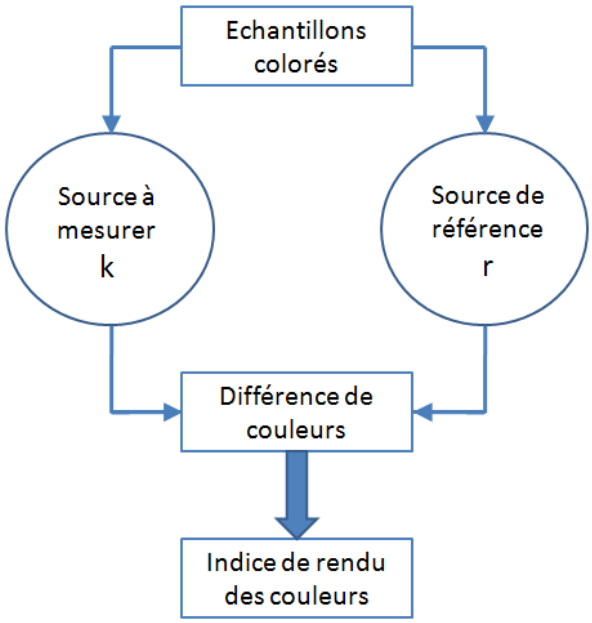


Fig. 1.28. - Schéma de principe de la méthode de calcul de l'indice de rendu des couleurs.

Les étapes de calcul, qui s'appuient très largement du descriptif de Robert Sève [SEV 96], se décomposent comme suit et sont résumées par un schéma à la fin de cette description :

1. La répartition spectrale énergétique du rayonnement de la source à mesurer, par exemple, sa luminance énergétique spectrique relative L_λ, échantillonnée avec un pas en longueur d'onde Δλ (fig. 1.29), est mesurée :

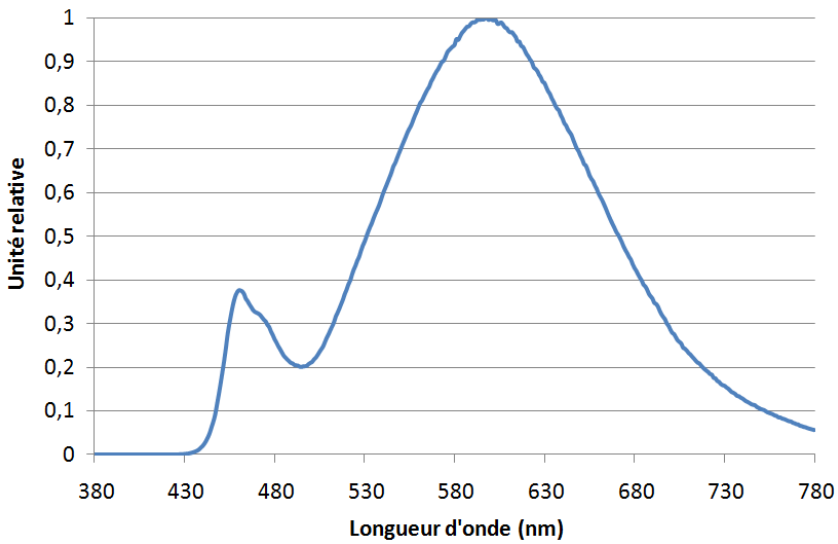


Fig. 1.29. - Exemple de répartition énergétique spectrique relative d'une LED de type blanc chaud.

2. Une série de calculs est ensuite effectuée sur la source à mesurer *k*, à partir de la répartition spectrale énergétique précédemment obtenue.

A partir de L_λ et à l'aide des fonctions colorimétriques $\bar{x}_\lambda$, $\bar{y}_\lambda$, $\bar{z}_\lambda$, les coordonnées chromatiques x_k et y_k de la lumière émise par la source à mesurer sont calculées par :

$$x_k = \frac{X_k}{X_k + Y_k + Z_k}$$
$$y_k = \frac{Y_k}{X_k + Y_k + Z_k} \qquad (1.30)$$
$$z_k = \frac{Z_k}{X_k + Y_k + Z_k}$$

avec les composantes trichromatiques X_k, Y_k, Z_k définies par :

$$X_k = k' \int_{\lambda} L_\lambda . \bar{x}_\lambda . d\lambda$$
$$Y_k = k' \int_{\lambda} L_\lambda . \bar{y}_\lambda . d\lambda \qquad (1.31)$$
$$Z_k = k' \int_{\lambda} L_\lambda . \bar{z}_\lambda . d\lambda$$

En pratique, ces équations sont approximées par :

$$X_k = k' \sum_{\lambda} L_\lambda . \bar{x}_\lambda . \Delta\lambda$$
$$Y_k = k' \sum_{\lambda} L_\lambda . \bar{y}_\lambda . \Delta\lambda \qquad (1.32)$$
$$Z_k = k' \sum_{\lambda} L_\lambda . \bar{z}_\lambda . \Delta\lambda$$

avec :

- $k' = \frac{100}{\sum_{\lambda} L_\lambda . \bar{y}_\lambda . \Delta\lambda}$ donc Y_k est égal à 100 ;
- Δλ, le pas en longueur d'onde de la fonction de répartition spectrale de la source à mesurer.

Ces coordonnées sont converties, dans un premier temps, pour obtenir les coordonnées u_k et v_k de l'espace CIE 1960 :

$$u_k = \frac{4.x_k}{-2.x_k + 12.y_k + 3}$$
$$v_k = \frac{6.y_k}{-2.x_k + 12.y_k + 3}$$

ou exprimées autrement : (1.33)

$$u_k = \frac{4.X_k}{X_k + 15.Y_k + 3.Z_k}$$
$$v_k = \frac{6.Y_k}{X_k + 15.Y_k + 3.Z_k}$$

et, dans un second temps, un nouveau jeu de coordonnées chromatiques c_k et d_k sont déterminées par les relations :

$$c_k = \frac{(4 - u_k - 10.v_k)}{v_k}$$
$$d_k = \frac{1{,}708.v_k + 0{,}404 - 1{,}481.u_k}{v_k} \quad (1.34)$$

Les coordonnées *c* et *d* sont obtenues à partir d'une transformation linéaire des composantes trichromatiques *X*, *Y* et *Z* proposées par D. B. Judd et telles que :

$$K = Z$$
$$W_p = -0{,}460.X + 1{,}359.Y + 0{,}101.Z \quad (1.35)$$
$$W_d = Y$$

Les coordonnées *c* et *d* ont été choisies pour être égale à :

$$c = 2.\frac{K}{W_d} = 2.\frac{Z}{Y}$$
$$d = 2.\frac{W_p}{W_d} = 2.\left(-0{,}460.\frac{X}{Y} + 1{,}359 + 0{,}101.\frac{Z}{Y}\right) \quad (1.36)$$

Exprimées dans l'espace CIE 1960, les expressions (1.36) s'écrivent par les expressions (1.34).

3. La température de couleur proximale T_{cp} de la source à mesurer est ensuite déterminée.

Pour ce faire, la recommandation [CIE 95] offre le choix entre plusieurs méthodes parmi lesquelles figurent celles de Kenneth L. Kelly (1963), R. Robertson (1968), Janós Schanda (1978) et dont la plus récente est celle de C. S. McCamy (1992) [McC 92] [McC 93].

Nous avons choisi d'utiliser la méthode de C. S. McCamy. Elle est décrite par :

$$T_{cp} = 5520{,}33 - 6823{,}3.n + 3525.n^2 - 449.n^3 \quad (1.37)$$

avec :

$$n = \frac{(x - 0{,}3320)}{(y - 0{,}1858)} \quad (1.38)$$

La méthode de C. S. McCamy prend comme hypothèse que les droites d'isotempérature symbolisant les températures de couleur proximale, sur le diagramme de chromaticité CIE 1931 XYZ, convergent en un seul point de coordonnées (*x* : 0,3320 , *y* : 0,1858) (fig. 1.30).

La méthode de C. S. McCamy a le mérite de fournir la température de couleur proximale d'une source à partir simplement des coordonnées chromatiques *x* et *y*. Cela étant, cette méthode repose sur l'approximation que les droites d'isotempérature sont concourantes en un seul point ce qui n'est pas tout à fait exact.

En effet, les droites d'isotempératures ont été définies comme étant des droites perpendiculaires au lieu des corps noirs (défini par le « *lieu des points représentant, dans un diagramme de chromaticité, les chromaticités du rayonnement des radiateurs de Planck à différentes températures* » [CIE 87])

lorsqu'elles sont représentées sur un diagramme de chromaticité uniforme. De cette façon, K. L. Kelly représenta ces droites sur le diagramme de chromaticité (*uv)* de l'espace CIE 1960 UVW [KEL 63]. A partir des données issues de ce diagramme, il calcula les droites d'isotempérature du diagramme de chromaticité (*xy*) dans l'espace CIE 1931 XYZ (fig. 1.31). D'après ce diagramme il est possible de voir que les droites d'isotempérature ne sont pas strictement concourantes en un point unique. D'après C. S. McCamy, cette approximation engendre une erreur sur le calcul de la température de couleur proximale qui est inférieure à 2 K dans une plage de valeurs comprises entre 2856 et 7500 K.

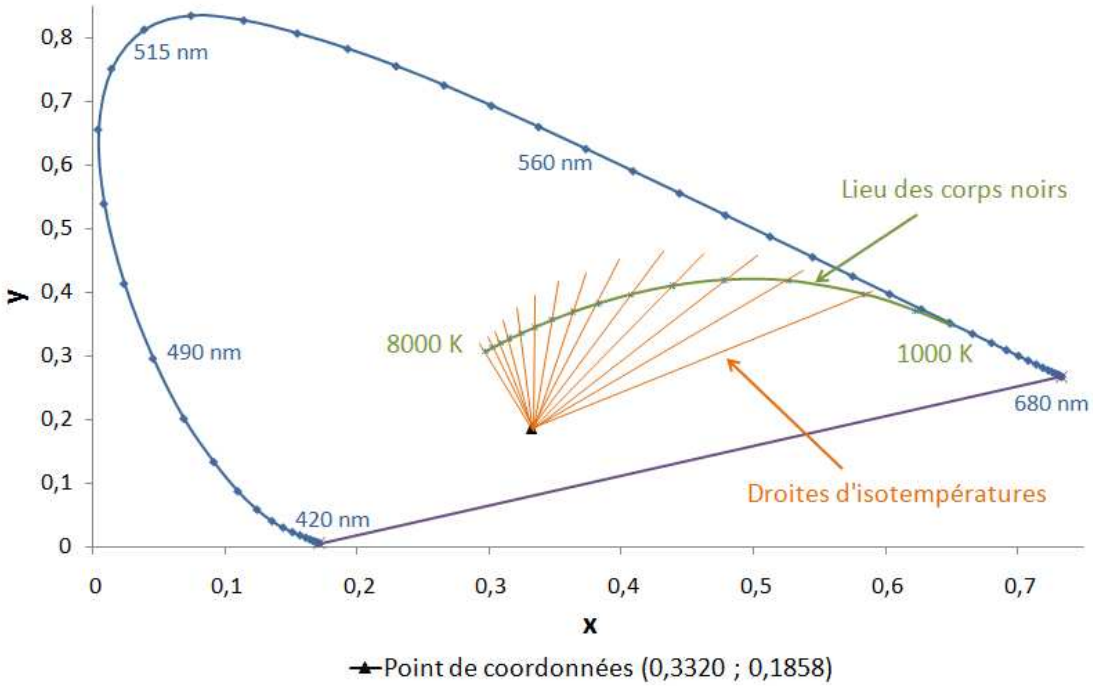


Fig. 1.30. - Droites d'isotempérature sur le diagramme de chromaticité CIE XYZ 1931 d'après l'approximation de C. S. McCamy.

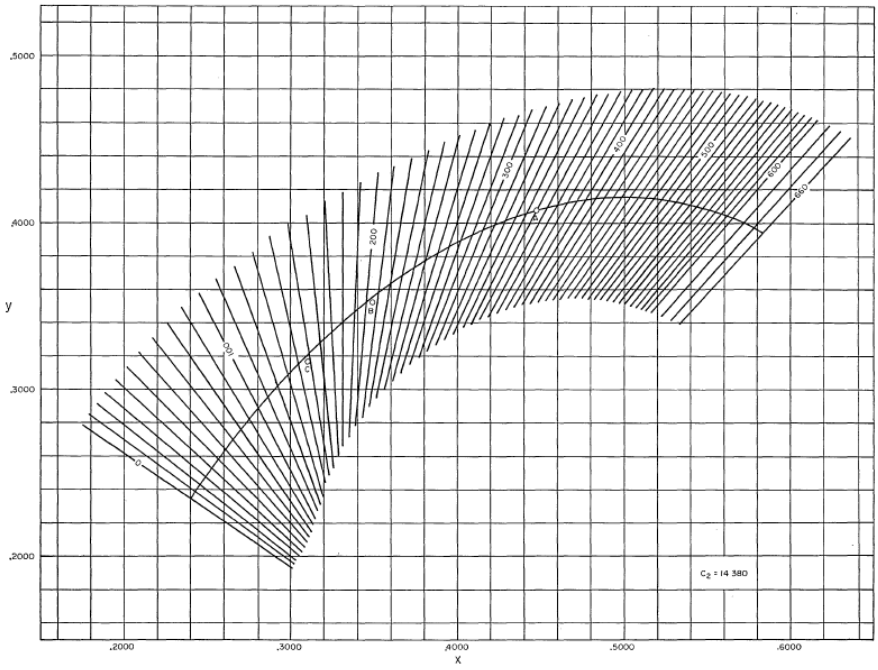


Fig. 1.31. - Droites d'isotempérature sur le diagramme de chromaticité CIE XYZ 1931 [KEL 63].

A l'aide de la température de couleur proximale de la source à mesurer on choisit la source de référence à laquelle on comparera la source à mesurer. La source de référence sera un des illuminants D pour une température de couleur proximale supérieure ou égale à 5000 K et un radiateur de Planck pour une température de couleur proximale inférieure. La différence de chromaticité Δ*C* entre la source de référence et la source à mesurer ne doit, en principe, pas dépasser la valeur limite donnée ci-dessous [CIE 95] :

$$\Delta C = \sqrt{(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2} \leq 5{,}4 \times 10^{-3} \qquad (1.39)$$

La tolérance ΔC = 5,4 x 10^{-3} correspond à environ 15 MK^{-1} sur le lieu des corps noirs ([MK^{-1}] correspond à l'unité nommée « remek » pour « reciprocal megakelvin » et correspond à $10^6/T_{cp}$ [K]. Cette unité est utilisée, dans de rare cas, pour exprimer les différences de température de couleur).

4. Les coordonnées chromatiques de la source de référence sont calculées de la même façon que pour la source à mesurer grâce aux expressions (1.30), (1.33), et (1.34).

5. Pour chaque échantillon de couleur test, noté indice *i*, la série de calculs explicitée ci-après doit être faite pour la source à mesurer *k* :

Les échantillons de couleur test de la classification de Munsell définis par la CIE (tab. 1.4), ont des facteurs spectraux de luminance $R_i(\lambda)$ (que nous écrirons par la suite $R_{i,\lambda}$ pour simplifier les équations) explicités dans la recommandation [CIE 95]. Ces facteurs sont représentés sur les figures 1.32 et 1.33. Un exemple de représentation visuelle des échantillons est donné par la figure 1.34.

N° des échantillons de couleur test	Notation Munsell			Couleur apparente sous la lumière naturelle
	Teinte	Clarté	Saturation	
1	7,5 R	6	4	Rose grisé clair
2	5 Y	6	4	Jaune grisé sombre
3	5 GY	6	4	Jaune vert soutenu
4	2,5 G	6	6	Vert jaunâtre moyen
5	10 BG	6	4	Vert bleuâtre clair
6	5 PB	6	8	Bleu clair
7	2,5 P	6	8	Violet clair
8	10 P	6	8	Violet rougeâtre clair
9	4,5 R	4	13	Rouge saturé
10	5 Y	8	10	Jaune saturé
11	4,5 G	5	8	Vert saturé
12	3 PB	3	11	Bleu saturé
13	5 YR	8	4	Rose jaunâtre clair (peau humaine)
14	5 GY	4	4	Vert olive moyen (vert feuille)

Tab. 1.4. - Echantillons de couleurs tests, issus de la classification de Munsell, recommandés par la CIE pour le calcul de l'IRC [CIE 95].

Les composantes trichromatiques $X_{k,i}$, $Y_{k,i}$, $Z_{k,i}$ sont déterminées à l'aide des relations :

$$\begin{aligned} X_{k,i} &= k' . \sum_{\lambda} L_\lambda . R_{i,\lambda} . \bar{x}_\lambda . \Delta\lambda \\ Y_{k,i} &= k' . \sum_{\lambda} L_\lambda . R_{i,\lambda} . \bar{y}_\lambda . \Delta\lambda \\ Z_{k,i} &= k' . \sum_{\lambda} L_\lambda . R_{i,\lambda} . \bar{z}_\lambda . \Delta\lambda \end{aligned} \qquad (1.40)$$

avec :

- $k' = \frac{100}{\sum_{\lambda} L_{\lambda} . \bar{y}_{\lambda} . \Delta\lambda}$

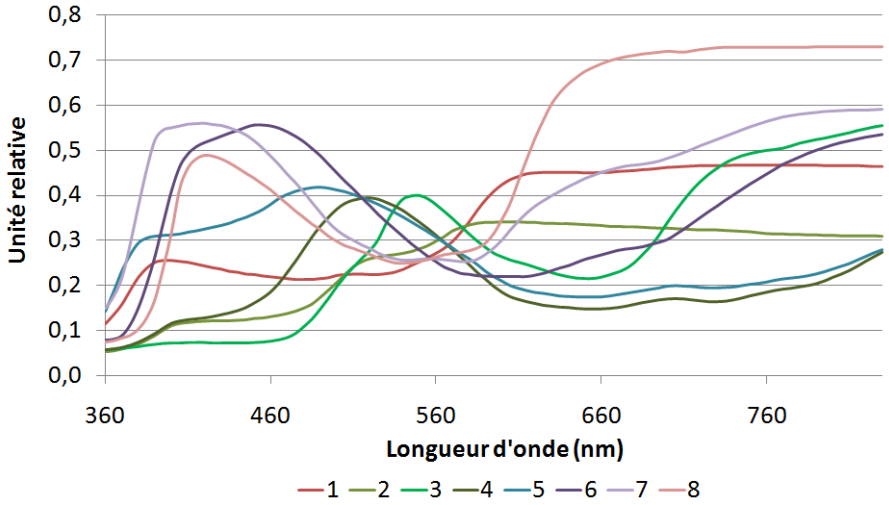


Fig. 1.32. - Facteurs spectraux de luminance des échantillons colorés 1 à 8 [CIE 95].

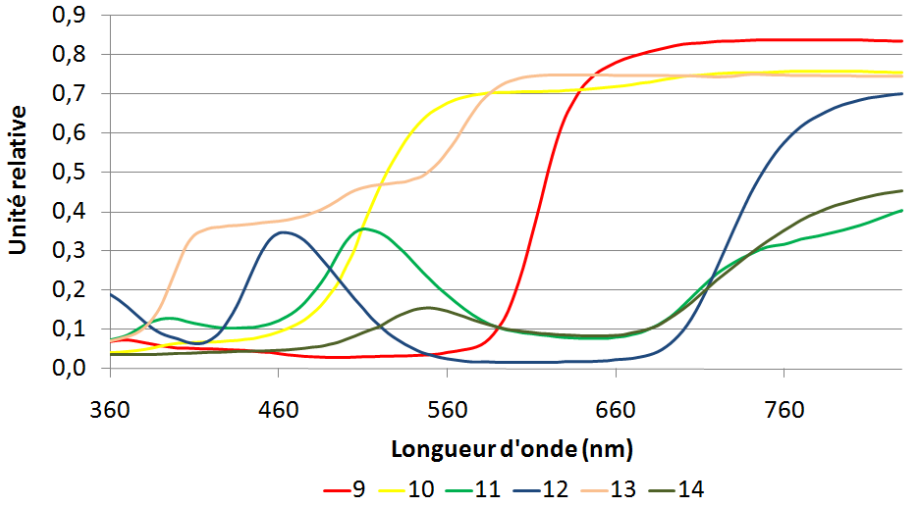


Fig. 1.33. - Facteurs spectraux de luminance des échantillons colorés 9 à 14 [CIE 95].

Dans la recommandation [CIE 95] les facteurs spectraux de luminance sont donnés avec un pas de 5 nm. Si un pas plus faible est requis, une interpolation linéaire doit être effectuée.

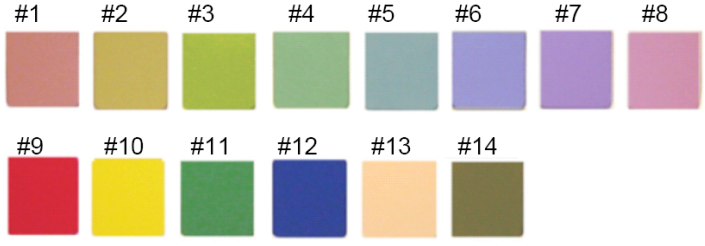


Fig. 1.34. - Exemple d'une représentation visuelle
des quatorze échantillons de Munsell [OHN 04].

Les coordonnées chromatiques $c_{k,i}$ et $d_{k,i}$ sont exprimées par :

$$c_{k,i} = \frac{(4 - u_{k,i} - 10.v_{k,i})}{v_{k,i}}$$
$$d_{k,i} = \frac{1{,}708.v_{k,i} + 0{,}404 - 1{,}481.u_{k,i}}{v_{k,i}} \quad (1.41)$$

avec :

$$u_{k,i} = \frac{4.X_{k,i}}{X_{k,i} + 15.Y_{k,i} + 3.Z_{k,i}}$$
$$v_{k,i} = \frac{6.Y_{k,i}}{X_{k,i} + 15.Y_{k,i} + 3.Z_{k,i}} \quad (1.42)$$

Afin de tenir compte d'une éventuelle différence de couleur entre la source de référence et la source à mesurer, une correction d'adaptation chromatique est effectuée en appliquant une méthode inspirée par Johannes Von Kries (1853-1928). Cette méthode s'appuie sur le fait que bien que la réponse des trois types de cônes de la rétine soit affectée différemment par l'adaptation chromatique, la sensibilité spectrale relative associée à chacun des cônes reste inchangée. De ce fait, l'adaptation chromatique peut être considérée comme un changement de sensibilité par trois facteurs constants associés chacun à un des cônes [CIE 04c] [DeCU 97].

De cette façon, les coordonnées $c_{k,i}$ et $d_{k,i}$ sont corrigées à partir de deux facteurs α et β pour obtenir les coordonnées $c'_{k,i}$ et $d'_{k,i}$ telles que :

$$c'_{k,i} = \alpha.c_{k,i} = \left(\frac{c_r}{c_k}\right).c_{k,i}$$
$$d'_{k,i} = \beta.d_{k,i} = \left(\frac{d_r}{d_k}\right).d_{k,i} \quad (1.43)$$

avec :

- c_k et d_k, les coordonnées intrinsèques de la source à mesurer ;
- c_r et d_r, les coordonnées intrinsèques de l'illuminant de référence.

Les coordonnées $u_{k,i}$ et $v_{k,i}$ sont également corrigées de l'adaptation chromatique :

$$u'_{k,i} = \frac{(10{,}872 + 0{,}404.c'_{k,i} - 4.d'_{k,i})}{16{,}518 + 1{,}481.c'_{k,i} - d'_{k,i}}$$
$$v'_{k,i} = \frac{5{,}520}{16{,}518 + 1{,}481.c'_{k,i} - d'_{k,i}} \quad (1.44)$$

Ensuite ces coordonnées sont transformées dans l'espace CIE 1964. $U^*_{k,i}$, $V^*_{k,i}$, $W^*_{k,i}$ sont alors calculées par les relations suivantes :

$$W^*_{k,i} = 25.Y_{k,i}^{1/3} - 17$$
$$U^*_{k,i} = 13.W^*_{k,i}.(u'_{k,i} - u_r) \quad (1.45)$$
$$V^*_{k,i} = 13.W^*_{k,i}.(v'_{k,i} - v_r)$$

avec :

- u_r et v_r, les coordonnées intrinsèques de l'illuminant de référence.

6. Après avoir obtenu l'ensemble des coordonnées $U^*_{k,i}$, $V^*_{k,i}$, $W^*_{k,i}$ pour chacun des échantillons colorés avec la source à mesurer, la même série de calculs est effectuée avec les mêmes échantillons de couleur test mais, cette fois-ci, avec la source de référence. Les grandeurs $U^*_{r,i}$, $V^*_{r,i}$, $W^*_{r,i}$ sont alors obtenues.

7. Les différences de couleur ΔE_i pour les échantillons de couleur test *i*, éclairés par la source à mesurer *k,* et la source de référence *r,* sont calculées à partir de l'expression (1.29) par :

$$\Delta E_i = \sqrt{(U^*_{r,i} - U^*_{k,i})^2 + (V^*_{r,i} - V^*_{k,i})^2 + (W^*_{r,i} - W^*_{k,i})^2} \tag{1.46}$$

8. Les indices particuliers de rendu des couleurs R_i, pour chacun des échantillons de couleur test, sont alors déterminés avec :

$$R_i = 100 - b.\Delta E_i = 100 - 4{,}6.\Delta E_i \tag{1.47}$$

La valeur de b = 4,6 a été choisie de manière à avoir un indice général de rendu des couleurs R_a, d'une lampe fluorescente de type blanc chaud (3000 K) égal à 50.

9. La moyenne arithmétique des huit premiers indices particuliers est effectuée pour obtenir l'indice général de rendu des couleurs R_a :

$$R_a = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} R_i \tag{1.48}$$

La moyenne arithmétique des quatorze indices, que nous nommerons R_{a_14}, peut également être calculée par :

$$R_{a_14} = \frac{1}{14}\sum_{i=1}^{14} R_i \tag{1.49}$$

Le schéma de la figure 1.35 résume en détail l'ensemble des étapes de calcul nécessaires à la détermination de l'IRC.

3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension de la suite du document. Ce chapitre était essentiellement divisé en deux parties. La première concernait les aspects radiométriques et photométriques, et la seconde les aspects colorimétriques.

Dans le chapitre suivant, nous allons explorer en détail les caractéristiques de nouvelles sources qui suscitent de plus en plus d'intérêts chez les professionnels et les particuliers, et dont l'utilisation dans des applications d'éclairage général paraît prometteur : les diodes électroluminescentes.

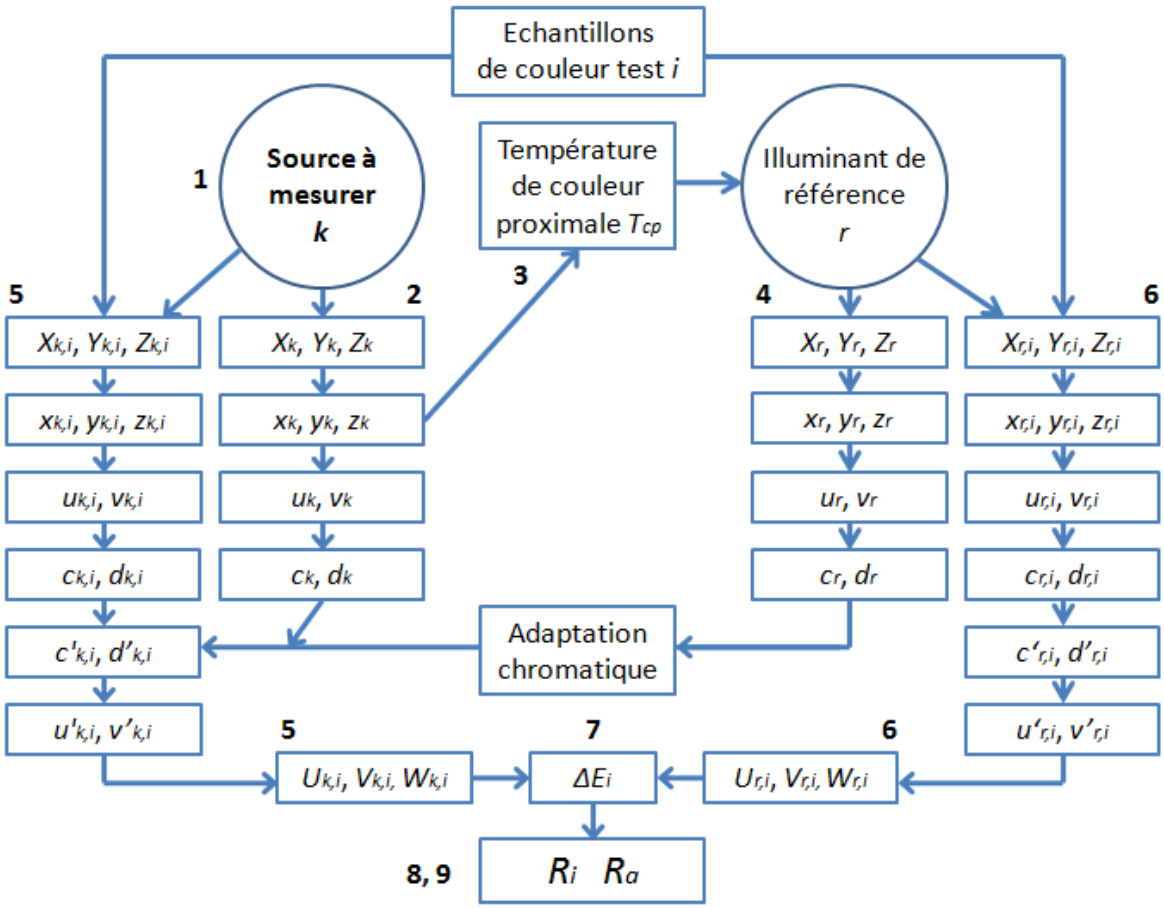


Fig. 1.35. - Schéma résumant les étapes de calcul de l'indice de rendu des couleurs.

Chapitre II

Les LED :
Sources d'éclairage de demain

"Personne n'a vécu dans le passé, personne ne vivra dans le futur ; le présent est le mode de toute vie"

[Arthur Schopenhauer, philosophe allemand, 1788-1860]

Depuis l'apparition sur le marché, dans les années 60, des LED, celles-ci ont petit à petit envahi notre quotidien.

Au cours de ce chapitre, nous allons aborder, dans une première partie, les aspects historiques, économiques, environnementaux et sociétaux des LED. A l'heure du développement durable et des économies d'énergie, les LED profitent d'un engouement qui est à la hauteur de leurs capacités actuelles et de leurs promesses pour le futur. D'ailleurs, nous verrons au travers d'un tour d'horizon des applications des LED que, déjà, leurs promesses sont en train de devenir réalité.

Une deuxième partie sera consacrée à une description détaillée des aspects technologiques qui entourent les LED. Au travers de cette description nous verrons l'importance de prendre en compte leurs propriétés intrinsèques pour effectuer le dimensionnement d'une application. Ensuite, une étude métrologique sur une LED blanche nous permettra d'appréhender les grandeurs d'influence qui interviennent sur la quantité de lumière émise.

1 LED : passé, présent, futur

1.1. Histoire de la lumière artificielle

Dès les débuts de l'humanité, la vie quotidienne est rythmée par le soleil, première source de lumière naturelle. Le soleil fut longtemps vénéré et/ou craint par les civilisations. Un exemple est donné par la figure 2.1, avec la vénération du peuple Incas pour le soleil, symbolisé dans un extrait de « Tintin et le temple du Soleil ». Dans cette bande dessinée d'Hergé, les Incas personnifient le soleil en le nommant d'un nom masculin « Pachacamac », mais dans d'autres civilisations le soleil est personnifié par d'autres noms masculins tels que « Ra » en Egypte ancienne, « Hélios » dans la mythologie Grec, « Utu » dans la civilisation sumérienne, « Shamash » dans l'empire akkadien, « Mithra » dans l'empire romain,… ou d'un nom féminin « Amaterasu » dans la religion la plus ancienne du Japon.

La maîtrise de la lumière artificielle a, peu à peu, permis à l'homme de s'affranchir des rythmes de la nature et lui a permis d'accélérer son développement. Les progrès des civilisations sont étroitement liés à l'évolution de la lumière artificielle, laquelle a influencé notre rythme de vie par l'intermédiaire de notre conception du spirituel (démystification progressive du soleil), de notre santé (bienfaits de

la lumière sur l'organisme (luminothérapie)), de notre sécurité (éclairage la nuit des rues), de notre efficacité (travail de nuit),…



Fig. 2.1. - Extrait de la bande dessinée de « Tintin et le temple du soleil » par Hergé aux éditions Casterman. Avec l'autorisation exceptionnelle de la société Moulinsart S.A.
© Hergé / Moulinsart 2009.

Probablement durant le paléolithique inférieur, il y a 400 000 ans, nos ancêtres domestiquèrent le feu. Au début, celui-ci ne servait qu'à se chauffer ou à cuire les aliments, mais pas encore à éclairer, dans le sens où nous l'entendons aujourd'hui. En effet, d'après ce que nous en savons actuellement, nos ancêtres vivaient dans des cavernes et ne pouvaient pas faire de feu trop profondément à l'intérieur de celles-ci à cause des problèmes d'évacuation de la fumée. Ils ne s'aventuraient donc pas à l'intérieur des grottes. Pour pouvoir se servir du feu comme moyen d'éclairage il fallait du combustible, et qui plus est, qui ne produisait pas trop de fumée. C'est ainsi qu'apparurent il y a 70 000 ans les premières lampes (du grec « lampa » qui signifie torche) à graisse, puis la première chandelle en 1000 avant J.C. environ.

La chandelle a perduré pendant plusieurs siècles avant que n'apparaisse vers 1770 la première lampe à gaz, puis la lampe à pétrole au cours de la révolution industrielle, vers 1850.

Le XIX^{ème} siècle a ensuite été le siècle des premières découvertes majeures dans le domaine des sources artificielles électriques. En 1876, Pavel Nikolayevich Yablochkov (1847-1894) a développé la première lampe à arc. En 1878, Joseph Wilson Swan (1828 -1914) inventa la lampe à incandescence à filament de coton. Thomas Alva Edison (1847-1931) améliora dans la même période, le principe de cette lampe à incandescence. Il sut tirer profit de cette découverte et fonda en 1890, la « Edison General Electric Company » qui est à l'origine de l'actuelle société General Electric. En 1897, Walther Nernst (1864-1941) créa la première lampe électrique avec un filament métallique (oxyde de cérium).

Le XX^{ème} siècle a connu des évolutions régulières et très rapides dans le développement des sources artificielles. Nous pouvons ainsi lister, de manière non exhaustives, quelques avancées majeures par ordre chronologique :

- *1900* : Peter Cooper Hewitt (1861-1921), lampe à vapeur de mercure ;
- *1903* : Sándor Just et Ferenc Hanaman, lampe à filament de tungstène ;
- *1907* : Joseph Henry Round (1881-1966), première émission de lumière par un semi-conducteur ;
- *1910* : Georges Claude (1870-1960), lampe à décharge avec du gaz inerte (tube néon) ;
- *1927* : Oleg Vladimirovich Losev (1903-1942), premier brevet d'une diode électroluminescente inorganique (LED) ;
- *1938* : General Electric and Westinghouse corporation, lampe à fluorescence ;
- *1959* : Edward George Zubler (1925-2004) et Frederick Mosby, lampe à halogènes offrant une meilleure durée de vie que les simples lampes à incandescence ;
- *1962* : Nick Holonyak et Sam Bevacqua de General Electric, première LED rouge ;
- *1987* : Ching W. Tang et Steven Van Slyke employés de Kodak aux Etats-Unis, première diode électroluminescente organique (OLED).

1.2. L'éclairage aujourd'hui en quelques chiffres

D'après l'Agence internationale de l'énergie [OECD 06] [WAI 07], l'éclairage représente, au début de ce XXI^{ème} siècle, environ 19 % de la production électrique mondiale soit 2650 TWh d'énergie électrique par an. Cela a engendré en 2005 environ 1890 millions de tonnes de CO_2 soit l'équivalent de 70% de l'émission due aux automobiles. Selon Georges Zissis [ZIS 07], environ 33 milliards de lampes électriques fonctionnent dans le monde chaque jour et 16 milliards de nouvelles lampes électriques se retrouvent sur le marché mondial chaque année. L'industrie des lampes représenterait un chiffre d'affaire annuel de 25 milliards d'euros en croissance constante depuis quelques décennies.

L'image de la figure 2.2 illustre très bien dans quelle mesure l'éclairage artificiel joue un rôle primordial dans nos vies à l'échelle planétaire.

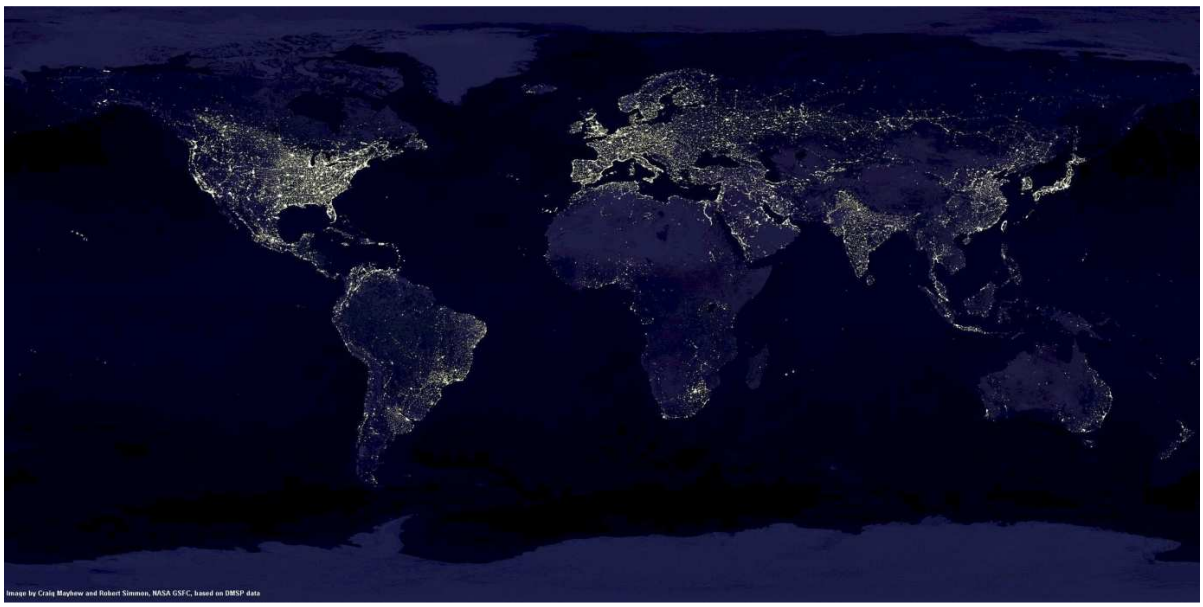


Fig. 2.2. - Vue globale de la terre la nuit. R. Simmon et C. Mayhew/NASA [SIM].
Avec l'aimable autorisation de R. Simmon.

1.3. Les sources artificielles dans le contexte actuel du réchauffement climatique et du développement durable

Si nous essayons de tracer un rapide bilan de la situation aujourd'hui dans le monde, nous voyons que la population mondiale croît de façon exponentielle depuis le milieu du XIX^{ème} siècle (fig. 2.3), que l'exploitation d'énergie non renouvelable et de matières premières est intensive, et que les changements climatiques sont une réalité (fonte rapide et importante des glaciers aux pôles, augmentation des catastrophes naturelles,…).

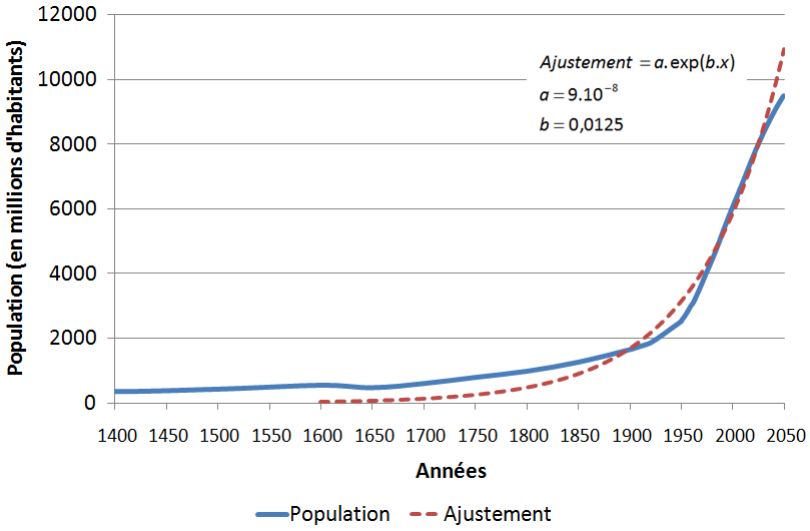


Fig. 2.3. - Estimation de l'évolution de la population mondiale depuis 1400 jusqu'à 2050 [UNPP] [USCB].

Depuis peu, les gouvernements de par le monde, affichent une prise de conscience des enjeux d'une gestion plus raisonnable des ressources de la planète. C'est ainsi qu'ils se sont imposés comme objectif, de réduire les émissions de CO_2 engendrées par l'activité humaine, considérant qu'il s'agit de la principale cause des évolutions climatiques. L'Union Européenne s'est fixée comme objectif, dans le cadre de la ratification du protocole de Kyoto, de réduire de 8% les émissions au sein de l'Union dans la période 2008-2012, par rapport à leurs niveaux de 1990 [UNFCCC].

Dans ce contexte, une remise en question de l'utilisation des lampes à incandescence classique à faible efficacité lumineuse (typiquement de l'ordre de 15 lm/W) a été formulée en France et à l'étranger, et ceci, au profit de sources artificielles à plus forte efficacité lumineuse telles que les tubes fluorescents (efficacité lumineuse typique comprise entre 70 et 100 lm/W environ) et les diodes électroluminescentes (efficacité lumineuse comprise approximativement entre 40 et 80 lm/W). Un engagement en faveur d'un retrait progressif du marché (et non un arrêt de la fabrication) des lampes à incandescence, a été signé fin 2008 en France, entre le ministère de l'écologie et les grands distributeurs de lampes (et non les fabricants) [MEEDA].

1.4. La place des LED dans notre société

1.4.1. Histoire et évolution de la technologie LED

La première émission de lumière par un semi-conducteur date de 1907 et fut découverte par H. J. Round [ROU 07]. Quelques années après O. V. Losev [LOS 27] dépose le premier brevet en 1927 de ce qui sera appelé, bien plus tard, une diode électroluminescente. Ce n'est qu'en 1962 que la première LED rouge est créée par N. Holonyak et S. Bevacqua [HOL 62].

Dans les années 60, des groupes industriels tels que International Business Machines (IBM), Radio Corporation of America (RCA), General Electric (GE),… travaillèrent activement sur les LED. Les premières LED émettant dans le rouge furent commercialisées par GE. Du fait de leur prix très élevé, les LED n'étaient, à cette époque, vendues qu'en très petites quantités. Lorsqu'en 1964, IBM utilisa des LED rouges sur des cartes d'ordinateur ce fut le premier pas vers l'utilisation industrielle des LED comme indicateur lumineux. Durant les années 70, les sociétés Monsanto et Hewlett-Packard développèrent des chaînes de fabrication pour augmenter les volumes de production. Ceci engendra une diminution des coûts, ce qui permis l'expansion du marché des LED comme indicateur visuel, d'abord dans les calculatrices, puis dans les montres à affichage numérique.

A cette époque, les LED utilisées dans les afficheurs d'instruments autonomes consommaient beaucoup d'énergie et il fallait recharger les batteries régulièrement. De par ces problèmes, la technologie LCD introduite à la fin des années 70, beaucoup moins consommatrice d'énergie, a totalement remplacé l'affichage à LED dans les montres et les calculatrices au début des années 80.

George Craford qui fut d'abord employé de Monsanto, puis de Hewlett-Packard, et aujourd'hui de Philips Lumileds Lighting, a effectué en 1972 la première démonstration d'émission par LED de lumière jaune [CRA 72]. Dans le même temps, les progrès réalisés dans la technologie des semi-conducteurs GaP permirent de mettre sur le marché des LED vertes.

Dans les années 90, les recherches, entre autre, de Shuji Nakamura et Takashi Mukai de Nichia Chemical Industries, dans la technologie des semi-conducteurs InGaN permirent la création de LED bleue [NAK 93a] [NAK 93b] [NAK 94] et par conséquent de LED blanches par l'utilisation couplée de LED bleue et de luminophore jaune.

Du fait de la disponibilité d'une palette quasi complète de couleurs, les LED devinrent rapidement des éléments incontournables des applications colorées en éclairage. Les LED trouvent aujourd'hui des applications dans de multiples domaines.

1.4.2. Quelques domaines d'application

Les LED sont de plus en plus présentes dans notre quotidien, pour la visualisation et la transmission d'informations, l'éclairage, la décoration,… Comme nous allons le voir, pour chacune des ces applications, l'utilisation des LED repose sur des choix réfléchis (économique, esthétique,…).

Visualisation d'informations
L'utilisation des LED dans les feux de signalisation tricolores permet, pour les communes, de réduire les coûts de maintenance et la consommation d'énergie par rapport aux lampes à incandescence précédemment utilisées.

Les LED offrent la possibilité de créer des écrans de communications de grandes dimensions. Nous pouvons citer comme exemples celui présent sur la façade de la « National Association of Securities Dealers Automated Quotations » (NASDAQ) à New York avec ses 16 millions de LED, ou le « Skyscreen » du centre commercial de Pékin, « The Place », d'une surface de 7500 m^2 (fig. 2.4). Cela permet d'afficher de manière dynamique, lumineuse et avec un très grand panel de couleurs, des informations à moindre coût en ce qui concerne l'énergie consommée et la maintenance.

Transmission d'informations
L'intégration des LED de faible puissance dans les télécommandes de divers appareils ménagers (téléviseurs, chaine hi-fi, lecteurs DVD,…) a été possible grâce à leur taille réduite, leur faible consommation et leur robustesse à l'épreuve des chutes de télécommande.

Grâce, essentiellement, à leur gamme d'émission dans le spectre électromagnétique, à leur temps de commutation très rapide, et à leur durée de vie, les LED sont utilisées avec les fibres optiques pour le développement des réseaux internet haut débit.

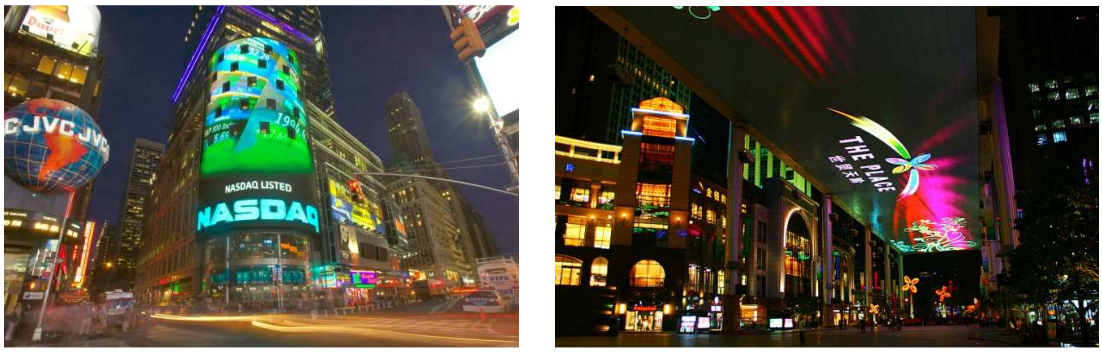


Figure 2.4. - A gauche : écran de la NASDAQ à New York. © The Nasdaq Stock market, Inc. Photo : Peter Aaron/Esto. A droite : « Skyscreen » du centre commercial « The Place » à Pékin [MEI].

Eclairage

Véhicules

Les LED sont utilisées pour l'éclairage d'intérieur de voiture et le rétro-éclairage de tableaux de bord. Elles sont également utilisées, dans les phares avant, en tant que feux de jour (fig. 2.5), et dans les feux arrières et les feux de stop (fig. 2.5). Elles apportent un design novateur et permettent de réaliser des économies de maintenance et de consommation d'énergie.



Fig. 2.5. - A gauche : Feux de jour à LED sur l'Audi A4.
A droite : feux de stop sur le concept Audi Sportback. © Audi AG.

En ce qui concerne les deux roues, les Vélib' de la ville de Paris (fig. 2.6) sont équipés de LED de puissance, à l'avant comme à l'arrière, qui sont alimentées par un système dynamoélectrique.



Fig. 2.6. - Eclairage à LED sur les Velib' de la ville de Paris.
© Sophie Robichon / Mairie de Paris

Téléviseurs et téléphones mobiles

L'intégration des LED dans les écrans de téléviseurs permet d'obtenir un meilleur rendu des mouvements par l'intermédiaire de temps de réponse très courts. Cela permet également de réduire l'épaisseur des écrans grâce au très faible encombrement des LED CMS (composant monté en surface).

Par l'intermédiaire de leur faible consommation, de leur faible encombrement et de leur faible coût (en très grosse quantité), les LED de puissance ont été intégrées depuis 2005 environ, sur beaucoup de modèles de téléphones portables. Dans une première application pour le rétro-éclairage des claviers, et dans une deuxième application, en tant que flash pour compléter l'intégration des cellules CCD qui permettent d'effectuer des photographies.

Œuvre d'art

La société italienne FRAEN et Marc Fontoynont de l'Ecole nationale des travaux publics de l'état (ENTPE) ont permis l'illumination de la Joconde au Musée du Louvre à Paris, grâce à un éclairage à base de LED de puissance. Celui-ci émet une lumière qui s'approche de la lumière naturelle sans les effets néfastes des rayons ultraviolets. En effet, la répartition spectrale des LED émettant dans le domaine visible ne contient pas, ou très peu, d'énergie aux longueurs d'onde correspondant à l'ultraviolet.

Confort et décoration

La puissance lumineuse, la robustesse et la durée de vie des LED ont permis de les incorporer dans les Trains à grande vitesse (TGV) rénovés par Christian Lacroix. Des LED de faible puissance sont utilisées dans la voiture bar et des LED de forte puissance dans les sièges des passagers (fig. 2.7).



Fig. 2.7. - Eclairages à LED dans les TGV « Lacroix ».

Les illuminations de Noël des Champs Elysées, et plus largement, un bon nombre de décorations de communes et de particuliers utilisent des LED. Leur faible consommation, leur robustesse, leur durée de vie, leur émission à diverses longueurs d'onde,… tous ces critères ont permis à ces nouvelles sources artificielles de s'imposer.

1.4.3. Marché des LED et principaux fabricants

Le marché des LED a dépassé, pour la première fois en 2000, le milliard de dollars US [STE 07]. D'après Strategies Unlimited, en 2006, le marché s'élevait à environ quatre milliards de dollars US après la pénétration du segment des applications mobiles : la téléphonie mobile (flash intégré sur les téléphones portables, rétro-éclairage des claviers et des écrans), les lecteurs mp3, les lecteurs DVD portables,... Le marché à l'horizon 2010-2012 est estimé entre huit et onze milliards de dollars US

avec une croissance de l'utilisation des LED de puissance dans l'éclairage général intérieur et extérieur, dans le rétro-éclairage des écrans LCD (télévisions et ordinateurs), et dans les phares avant d'automobiles.

La croissance très rapide qu'a connu le marché des LED de puissance ces dernières années, est désormais en train de ralentir, du fait des fortes capacités de production (augmentation de 30% en 2006) des pays d'Asie tels que le Japon, la Chine, ou la Corée qui engendrent une baisse des prix. Le prix moyen de vente a diminué, en 2006, de 18%. Cependant, les recettes en 2006 des LED de puissance ont augmenté de 52%, alors que celles des LED de faible puissance (type 5 mm) ont seulement augmenté de 4%, et celles des composants RGB ont stagné.

Le marché des LED est supporté par un panel de fabricants de plus en plus large. Les principaux fabricants en Europe, aux Etats-Unis, et au Japon, restent Philips au travers de sa filiale Lumileds, OSRAM, GE, Cree et Nichia. Le coût des LED a fortement diminué de par un renforcement dans les pays d'Asie avec des fabricants tels que Seoul semi-conducteur, Toyolite, UPEC Electronics, Liteon, HuiYuan Opto-electronics, Everlight Electronics, EOI, Brightech et bien d'autres encore.

Des entreprises ont également fait leur apparition aux Etats-Unis sur le segment des LED à très fortes puissances comme Lamina et LEDEngin. Ces deux entreprises ont un très fort potentiel de croissance dans les années qui viennent avec le développement des LED dans les applications d'éclairage général.

2 Description et caractéristiques métrologiques des LED

2.1. Principe de fonctionnement

Une diode électroluminescente fonctionne sur le principe d'une jonction *pn*. Cette jonction est en fait un semi-conducteur ayant deux régions de conductivité différente : une de type *p* (constituée essentiellement de charges positives : les trous) et une autre de type *n* (constituée essentiellement de charges négatives : les électrons), ainsi qu'une région de recombinaison radiative qui donne lieu au phénomène de luminescence.
Sous l'effet d'une différence de potentiel entre deux électrodes, les électrons se recombinent avec les trous dans la zone de recombinaison. Cela engendre l'émission de photons, dont la nature dépend des caractéristiques des matériaux constituant la jonction (§ 2.3.1. LED colorées).
Actuellement, il existe deux familles de jonctions *pn*, les homojonctions et les hétérojonctions :

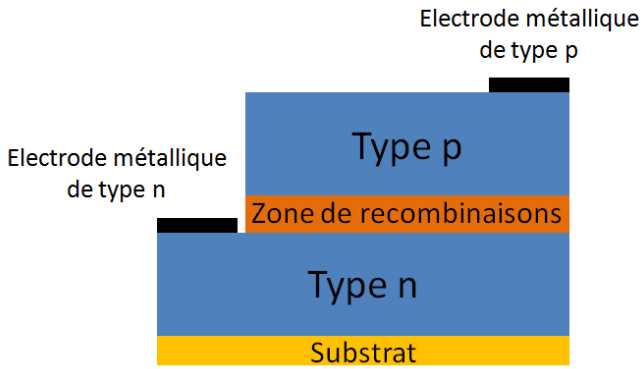


Fig. 2.8. - Schéma de principe d'une homojonction *pn*.

- Une homojonction (fig. 2.8) est constituée du même semi-conducteur pour les deux régions dopées de type *p* et *n*. Cette architecture atteint ses limites lorsque l'on augmente le niveau de dopage des

semi-conducteurs dans l'objectif d'améliorer l'efficacité d'injection (indicateur sur l'influence des recombinaisons non radiatives par rapport aux recombinaisons radiatives). En procédant de cette manière, les impuretés dans le semi-conducteur augmentent et constituent des éléments de recombinaisons non radiatives. L'efficacité d'injection n'est donc plus améliorée. Pour résoudre ce problème, la technologie à hétérojonctions a été développée.

- Une hétérojonction (fig. 2.9) repose essentiellement sur un assemblage de deux (ou plusieurs) semi-conducteurs de différentes compositions et de différents degrés de dopage.

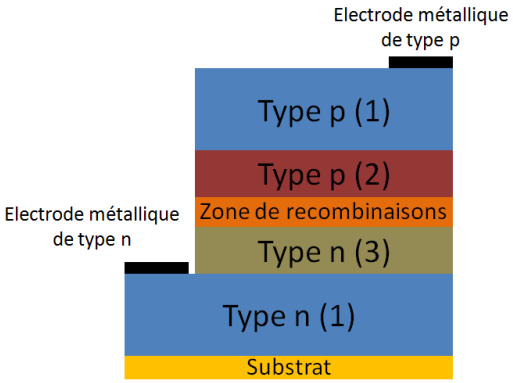


Figure 2.9. - Schéma de principe d'une hétérojonction *pn* avec trois types de semi-conducteurs.

2.2. Architectures d'une LED

Suivant leur puissance électrique, les LED n'ont pas la même architecture. Il en existe deux principales : une architecture classique, pour des LED de faible puissance (inférieure à 1 W), de type 5 mm (diamètre du dôme) par exemple, et une architecture pour les LED de forte puissance (supérieure ou égale à 1 W).

L'**architecture classique**, illustrée par la figure 2.10, possède un dôme en époxy qui n'a pas de symétrie de révolution autour de son axe central, mais possède un bord plat du côté de la cathode. Cette caractéristique permet à l'utilisateur de pouvoir distinguer l'anode de la cathode lorsque l'identification de la longueur des pattes de la LED n'est plus possible. Ce dôme a pour rôles, d'une part, de protéger la puce semi-conductrice (jonction *pn*) de l'environnement extérieur, et d'autre part, de servir de lentille optique permettant l'extraction de la lumière émise.

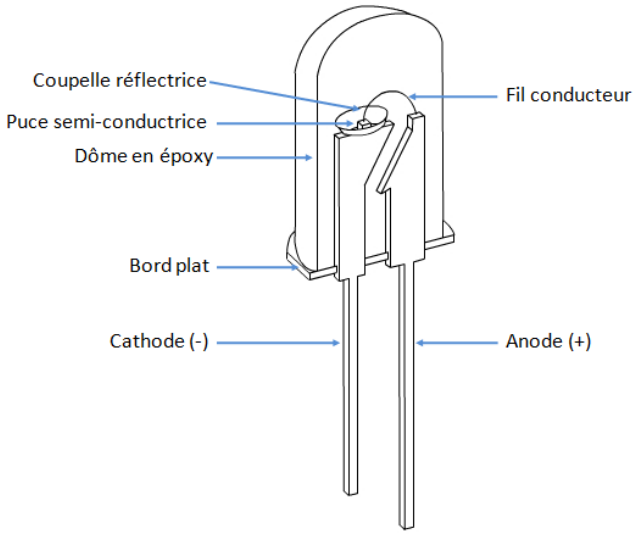


Fig. 2.10. - Schéma de principe d'une LED de type 5 mm vue en coupe [MON].

L'alimentation électrique de la puce est assurée par une cathode (contact avec l'électrode de type *n*) et une anode (contact avec l'électrode de type *p*) reliées par un fil conducteur. La dissipation de la chaleur produite par la jonction *pn* se fait au travers de l'anode.

Un exemple d'**architecture de LED de forte puissance** est donné par la figure 2.11. Le principe de base reste identique à la précédente architecture. L'alimentation de la puce semi-conductrice est assurée par deux électrodes reliées par deux fils conducteurs. Contrairement à l'architecture précédente, dans celle-ci il y a une dissociation du chemin de l'alimentation électrique et de la dissipation thermique. La dissipation thermique se faisant sous le composant.

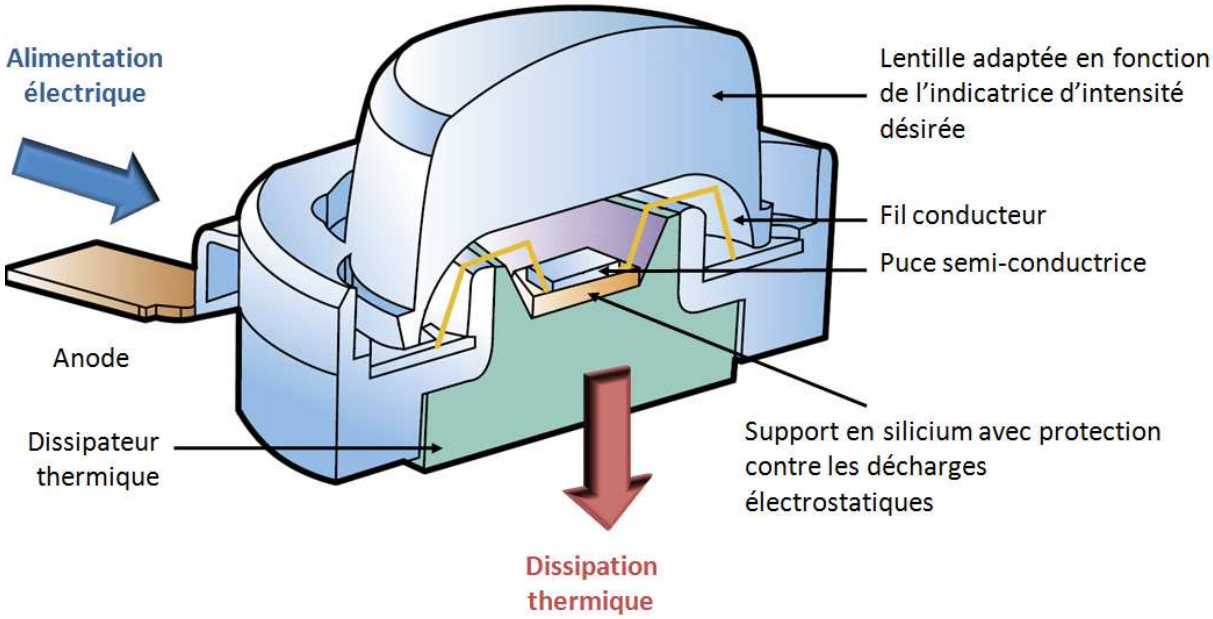


Fig. 2.11. - Schéma de principe d'une LED de forte puissance vue en coupe [PHI].

2.3. Différents types de LED

Depuis la commercialisation, au début des années 60, des premières LED émettant des rayonnements infrarouges et visibles (dans le rouge), la gamme de LED s'est considérablement élargie. Il existe désormais de nombreux critères de distinction parmi lesquels il y a la taille, la forme, le courant d'alimentation,… et surtout la couleur de la lumière émise.

2.3.1. LED colorées

Les LED permettent d'obtenir de la lumière colorée dans un domaine de longueur d'onde qui couvre l'intégralité du spectre visible mais également le proche infrarouge et l'ultraviolet. Le tableau 2.1 donne, de manière non exhaustive, quelques semi-conducteurs utilisés en fonction de la longueur d'onde d'émission désirée.

Zone du spectre électromagnétique	Longueur d'onde λ (nm)	Tension directe V_F (V) [1]	Semi-conducteurs utilisés
Infrarouge	λ > 780	$V_F < 2,5$	arséniure de gallium aluminium (AlGaAs) arséniure de gallium (GaAs) phosphure arsenium gallium indium (InGaAsP)
Rouge	610 < λ < 780	$1,5 < V_F < 3$	phosphure aluminium gallium indium (AlGaInP) arséniure de gallium aluminium (AlGaAs) arséniure phosphure de gallium (GaAsP) phosphure de gallium (GaP)
Orange	590 < λ < 610	$2 < V_F < 2,5$	phosphure aluminium gallium indium (AlGaInP) arséniure phosphure de gallium (GaAsP) phosphure de gallium (GaP)
Jaune	570 < λ < 590	$1,5 < V_F < 3$	phosphure aluminium gallium indium (AlGaInP) arséniure phosphure de gallium (GaAsP) phosphure de gallium (GaP)
Vert	500 < λ < 570	$1,5 < V_F < 3$	nitrure de gallium indium (InGaN) phosphure de gallium (GaP) phosphure aluminium gallium indium (AlGaInP)
Bleu	450 < λ < 500	$2,5 < V_F < 4$	nitrure de gallium indium (InGaN) séléniure de zinc (ZnSe) carbure de silicium (SiC)
Violet	380 < λ < 450	$3 < V_F < 5$	nitrure de gallium indium (InGaN) nitrure gallium (GaN)
Ultraviolet	λ < 380	$3 < V_F < 5$	nitrure de gallium indium (InGaN) nitrure gallium aluminium (AlGaN) nitrure gallium (GaN) nitrure aluminium gallium indium (AlGaInN) nitrure aluminium (AIN)
Blanc		$3 < V_F < 5$	idem que le bleu ou l'ultraviolet

[1] voir § 2.4.1. Caractéristiques électroniques.

Tab. 2.1. - Différents semi-conducteurs utilisés en fonction de la couleur souhaitée de la lumière.

2.3.2. LED blanches

Pour générer de la lumière blanche il existe plusieurs méthodes :

Trois LED de couleurs différentes (RGB)

Cette méthode consiste à utiliser trois types de LED de couleurs différentes (rouge, verte, bleue). La synthèse des trois couleurs conduit à la production de lumière blanche dont la température de couleur proximale dépend de la proportion de chacune des trois couleurs.

Il est également possible d'envisager de créer de la lumière blanche à partir d'une multitude de LED de couleurs. Cela permet d'améliorer l'homogénéité spectrale de la source. Cela étant, il faut contrôler individuellement chaque type de LED parmi plusieurs dizaines, voire plus. Cela devient rapidement problématique et coûteux sachant que la tension directe d'alimentation varie en fonction des semi-conducteurs et de leurs degrés de dopage.

LED UV et trois luminophores

Cette méthode repose sur une jonction *pn* émettant dans l'ultraviolet et qui est recouverte de différents luminophores. Les photons « UV », au contact des luminophores, sont absorbés, et des

photons de longueurs d'onde complémentaires sont réémis. Ceux-ci, en se combinant, provoquent une sensation de lumière blanche.
L'inconvénient majeur de cette méthode concerne le fait que le rayonnement ultraviolet doit être intégralement absorbé par les luminophores pour garantir une sécurité optimale d'utilisation.

Méthode PRS-LED

La méthode PRS-LED (Photon Recycling Semiconductor Light Emitting Diode) utilise deux régions actives de semi-conducteur. Du fait d'un passage de courant, la première région émet des photons bleus, dont certains, vont être absorbés par la seconde région qui émettra à son tour du jaune, orange ou rouge (fig. 2.12). Cette méthode, comme la précédente, est basée sur le fait que deux photons de longueurs d'onde complémentaires arrivant simultanément sur l'œil humain provoquent une sensation de blanc.

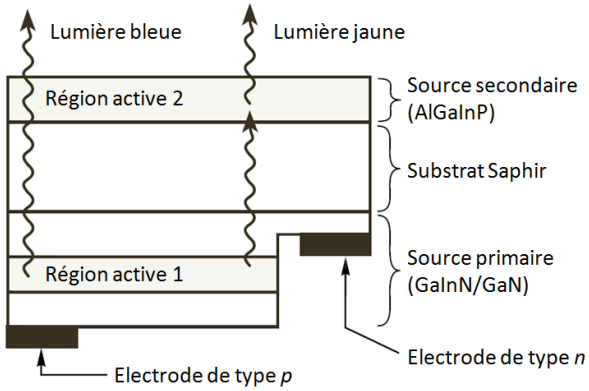


Fig. 2.12. - Schéma de principe de la méthode PRS-LED [GUO 99].

LED bleue et luminophore jaune

La méthode qui est la plus répandue chez les industriels, consiste à utiliser une jonction *pn*, émettant de la lumière bleue, qui est recouverte d'un (ou de plusieurs) luminophore jaune. Typiquement, il s'agit d'yttrium aluminium garnet dopé au cérium (YAG : Ce) pour un blanc froid ou YAG : Ce + CaS :Eu pour obtenir un blanc chaud. Les photons émettant du bleu, au contact du luminophore, engendrent des photons émettant du jaune. Comme pour les deux méthodes précédentes, des photons de longueurs d'onde complémentaires provoquent une sensation de blanc.

2.4. Caractéristiques intrinsèques des LED

2.4.1. Caractéristiques électroniques

Une LED est un composant polarisé, ce qui implique qu'en fonction du sens du courant électrique *i*, qui la traverse, elle se situera dans le cas d'une polarisation inverse ou directe. Dans son fonctionnement normal, une LED s'utilise en polarisation directe, c'est-à-dire lorsque le courant circule de l'anode à la cathode (fig. 2.13).

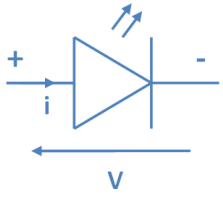


Fig. 2.13. - Schéma électronique d'une LED polarisée dans le sens direct.

Dans cette configuration elle a deux modes de fonctionnement : un mode bloqué et un mode passant. Cela s'observe lorsque l'on trace sa caractéristique courant-tension (fig. 2.24). Cette caractéristique indique qu'il faut atteindre une valeur minimale de tension directe d'alimentation (V_F) - que l'on nomme tension de seuil - aux bornes de la LED avant qu'un courant direct d'alimentation (I_F) la traverse. Pour qu'une LED émette de la lumière il faut donc l'alimenter avec une tension minimale.

2.4.2. Caractéristiques optiques

Alors qu'une ampoule à incandescence classique émet dans presque tout l'espace (ou le demi-espace suivant les conditions d'utilisation) et de façon très homogène, le faisceau d'une LED de faible puissance, de type 5 mm, encapsulée dans une résine en époxy, est plus directif et est inhomogène (fig. 2.14). Les angles typiques d'émission (représentés par α sur la figure 2.14) sont de l'ordre de 10 à 40° environ.

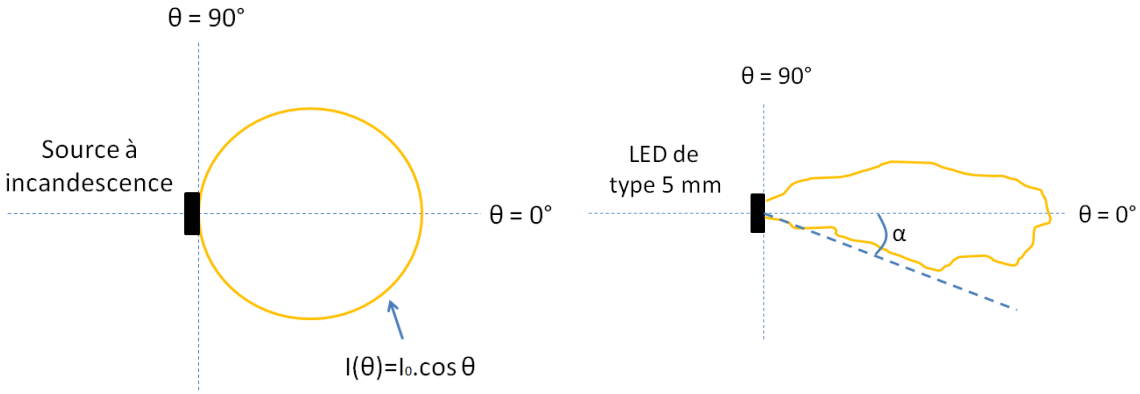


Fig. 2.14. - A gauche : indicatrice d'intensité d'une source à incandescence (source lambertienne). A droite : indicatrice d'intensité d'une LED encapsulée dans une résine en époxy.

Les LED de forte puissance émettent, quant à elle, de la lumière avec des angles d'émission d'environ 110 à 140° et avec une distribution spatiale du rayonnement maitrisée grâce à des lentilles optique, spécifiquement étudiées en fonction des besoins.

2.4.3. Caractéristiques thermiques

De multiples travaux ont montré l'influence de la température des LED sur la stabilité des paramètres physiques, colorimétriques et sur la durée de vie.

Nadarajah Narendran [NAR 07] a mis en évidence l'influence de la température des LED sur leur durée de vie et leurs coordonnées chromatiques. Ainsi, pour une augmentation de la température extérieure des LED, notée T_b sur la figure 2.15, de l'ordre de 30 °C, leur durée de vie (définie à 70% du flux initial (§ 2.4.6. Durée de vie)) peut être divisée d'un facteur 1,5 à 15 environ, suivant le fabricant. Pour une même variation de température, les coordonnées chromatiques *x* et *y* de l'espace CIE 1931 XYZ évoluent avec des écarts compris entre 0,0007 et 0,04.

János Schanda [SCH 01] [SCH 04] a montré les effets de la température de jonction des LED sur leur répartition spectrale. Sur des LED testées avec des températures comprises entre 23 et 70 °C environ, le maximum de la fonction de répartition spectrale relative diminue avec l'augmentation de la température, et s'accompagne parfois d'un décalage en longueur d'onde (fig. 2.16).

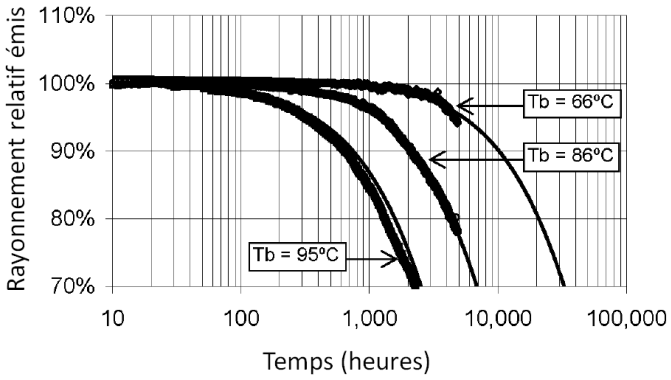


Fig. 2.15. - Evolution du rayonnement émis en fonction du temps pour différentes température thermodynamique d'un groupe de LED de même type [NAR 07].

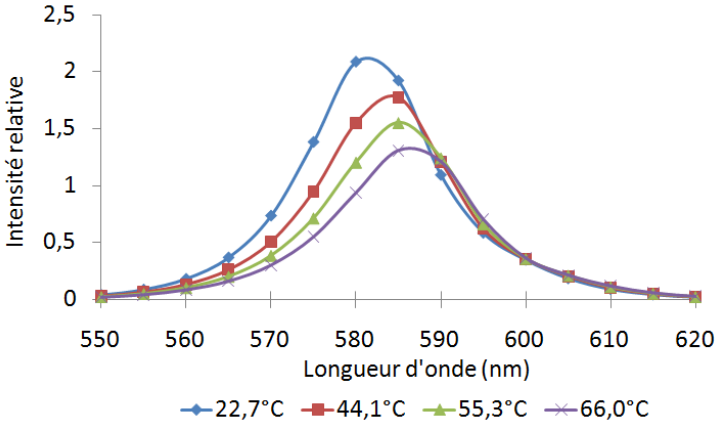


Fig. 2.16. - Dépendance en température de la distribution spectrale relative d'une LED verte Gilway E903 [SCH 01].

Tel que l'explique E. Fred Schubert [SCHU 07], la dépendance entre le « flux » émis, noté F_T, et la température de la jonction T_j, est liée à la technologie des semi-conducteurs. Cependant ce phénomène est décrit, à partir d'observations expérimentales et d'un modèle de régression, par l'équation suivante :

$$F_T = F_{300K} . \exp\left(- \frac{T_j - 300}{T_1} \right) \qquad (2.1)$$

où T_1 correspond à la température caractéristique (indicateur de la stabilité de la tension de seuil de la jonction en fonction de sa température thermodynamique) de la jonction *pn* de la LED.

D'après des mesures de la société Toyoda Gosei reprises par E. F. Schubert [SCHU 07], une LED bleue (InGaN/GaN) ayant une température caractéristique élevée, de l'ordre de 1600 K, a une dépendance en température quasi nulle, alors qu'une LED rouge (AlGaInP/GaAs) ayant une température caractéristique faible, de l'ordre de 95 K, aura une dépendance en température élevée. Ceci concorde avec les mesures effectuées par J. Schanda [SCH 01].

Dans les données constructeur, il est intéressant de remarquer que les informations techniques sont, très souvent, données pour une température de jonction T_j de la LED de 25 °C. Dans une utilisation normale de la LED, avec un radiateur thermique, cette température n'est pas égale à la température ambiante T_a. En réalité $T_j > T_a$ et est comprise, selon les données constructeur, entre 110 et 150 °C

environ. Afin d'augmenter les performances de leurs produits, les fabricants diminuent la température de jonction de la LED, par des systèmes de refroidissement élaborés et coûteux, et peuvent ainsi présenter de meilleurs caractéristiques techniques, que l'utilisateur ne retrouvera pas dans une utilisation normale du composant.

La mesure directe de la température d'une jonction *pn* d'une LED n'est pas simple puisque celle-ci est encapsulée dans un dôme de protection. Cependant il est possible d'avoir accès à cette température par l'intermédiaire de sa caractéristique courant-tension qui est donnée de façon théorique par l'expression suivante :

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{e.V}{n.k.T} \right) - 1 \right] \tag{2.2}$$

avec :

- I_0, le courant de saturation ;
- e, la charge élémentaire égale à 1,602 176 487 x 10^{-19} C [COD 06] ;
- V, la tension aux bornes de la jonction *pn* ;
- n, une constante entre 1 et 2 ;
- k, la constante de Boltzmann égale à 1,380 650 4 x 10^{-23} J.K^{-1} [COD 06] ;
- T, la température de la jonction.

2.4.4. Caractéristiques énergétiques

L'**efficacité énergétique** η_e d'une LED, traduit la proportion d'énergie électrique transformée en rayonnement électromagnétique. Elle est la résultante de plusieurs composantes [ZIS 04] :

$$\eta_e = \eta_f \ . \ \eta_{externe} \tag{2.3}$$

avec :

- η_f, le rapport de l'énergie moyenne du photon produit ($\overline{h\nu}$) sur l'énergie nécessaire pour la création d'une paire électron-trou dans le matériau considéré (en eV) ;
- $\eta_{externe}$, l'efficacité quantique externe, qui est le rapport du nombre de photons émis par la LED par seconde, sur le nombre d'électrons injectés dans la LED par seconde [SCHU 07]. Elle correspond à la composition de deux termes telle que :

$$\eta_{externe} = \eta_{interne} . \eta_{extraction} \tag{2.4}$$

avec :

- $\eta_{interne}$, est l'efficacité quantique interne. Elle correspond au nombre de photons émis par seconde par la région active du semiconducteur de la LED par rapport au nombre d'électrons injectés dans la LED par seconde. Cette efficacité ne peut être améliorée que par un choix judicieux des matériaux de dopage utilisés. Elle est égale à :

$$\eta_{interne} = \frac{F_{\text{int}} / (h.\nu)}{I / e} \tag{2.5}$$

avec :

- F_{int}, le flux émis par la région active du semiconducteur ;
- h, la constante de Planck égale à 6,626 068 96 x 10^{-34} J.s [COD 06] ;
- ν, la fréquence de l'onde électromagnétique d'un photon ;

- *I*, le courant d'alimentation ;
- *e*, la charge élémentaire égale à 1,602 176 487 x 10^{-19} C [COD 06].

- $\eta_{extraction}$ est l'efficacité d'extraction. Elle correspond au nombre de photons émis par la LED par seconde par rapport au nombre de photons émis par la région active du semiconducteur. Cela traduit le nombre de photons piégés dans la LED.

$$\eta_{extraction} = \frac{F/(h.\nu)}{F_{int}/(h.\nu)} \tag{2.6}$$

avec :

- *F*, le flux émis par la LED.

L'efficacité d'extraction est limitée essentiellement par les indices de réfraction élevés des semi-conducteurs (exemple avec l'indice de réfraction complexe du GaP : $\tilde{n}_{GaP}$ (λ=0,5 µm) = $n + ik \approx 3{,}5 + i.0$ où n est l'indice de réfraction réel et k le coefficient d'extinction) qui engendrent un piégeage des rayons lumineux dans la puce semi-conductrice. Le piégeage se fait également entre la puce et la lentille de la LED. Ces deux aspects peuvent être optimisés en modifiant la géométrie de la puce semi-conductrice et/ou l'optique de la LED afin d'améliorer les angles d'incidence et de réflexion.
Le rayonnement piégé dans la LED, ainsi que le manque d'efficacité interne du semi-conducteur, a pour effet de créer un échauffement thermique qui se traduit par l'émission de rayonnement dans l'infrarouge.

La figure 2.17 donne une vue schématique de l'efficacité quantique externe qui, au final, s'exprime par :

$$\eta_{externe} = \frac{F/(h.\nu)}{I/e} \tag{2.7}$$

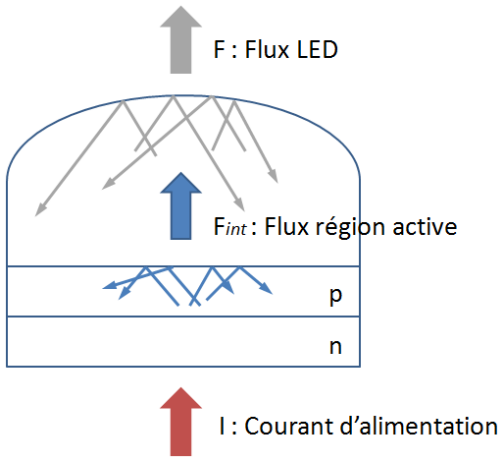


Fig. 2.17. - Représentation schématique de l'efficacité quantique externe d'une LED.

L'**efficacité lumineuse** ajoute à l'efficacité énergétique la notion d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain *V(λ)*. A titre indicatif, et d'après l'expression (1.8), 1 W de flux énergétique correspond à un flux lumineux de 2,80 lm à la longueur d'onde de 700 nm alors qu'il correspond à 683 lm à 555 nm et 0,27 lm à 400 nm. De cette façon, en fonction de sa répartition spectrale, une LED peut avoir une meilleure efficacité énergétique qu'une autre, mais une efficacité lumineuse plus faible.

2.4.5. Caractéristiques mécaniques

Les LED ont des dimensions nettement plus petites que les sources d'éclairage artificielles classiques à incandescence ou à fluorescence. Elles peuvent donc être intégrées dans des systèmes où l'encombrement est très réduit (téléphones et ordinateurs portables, lecteur mp3,…).

Dans les LED il n'y a aucun élément mobile. La puce semi-conductrice, composant principal d'une LED, est entièrement intégrée dans un matériau transparent, généralement une résine en époxy. Cette architecture confère à ces sources une solidité et une résistance au choc beaucoup plus importante que les lampes usuelles.

2.4.6. Durée de vie

Pour pouvoir comparer convenablement les données fournies par les fabricants (lorsqu'elles sont disponibles), il est nécessaire qu'ils utilisent tous la même définition de la durée de vie. Or, ce n'est absolument pas le cas. Aucune norme internationalement reconnue ne permet, actuellement, de répondre à cette problématique.

Dans l'objectif de résoudre ce problème, l'organisme « Alliance for Solid State Illumination System and Technologies » (ASSIST) et le « Lighting Research Center » (LRC) de l'école polytechnique de Rensselaer aux Etats-Unis, ont proposé dans la recommandation « LED Life for General Lighting : Recommendations for the Definition and Specification of Useful Life for Light Emitting Diode Light Sources » [ASS 06], de définir la durée de vie des LED en fonction de leur application.

Pour des applications d'éclairage général, il a été montré que les observateurs percevaient un changement de l'éclairage à partir d'une diminution d'environ 20-30% du niveau d'éclairement global [ASS 06]. De par les quatre études citées dans la recommandation [ASS 06], il est proposé de définir un critère de durée de vie des LED à 70% du flux initial (L_{70}) pour des applications d'éclairage général, dans des lieux publics par exemple. Pour des applications d'éclairage plus spécifiques, cette durée de vie peut être définie à 80% du flux initial. Pour des applications décoratives, il est proposé de définir la durée de vie à 50% du flux initial (L_{50}).

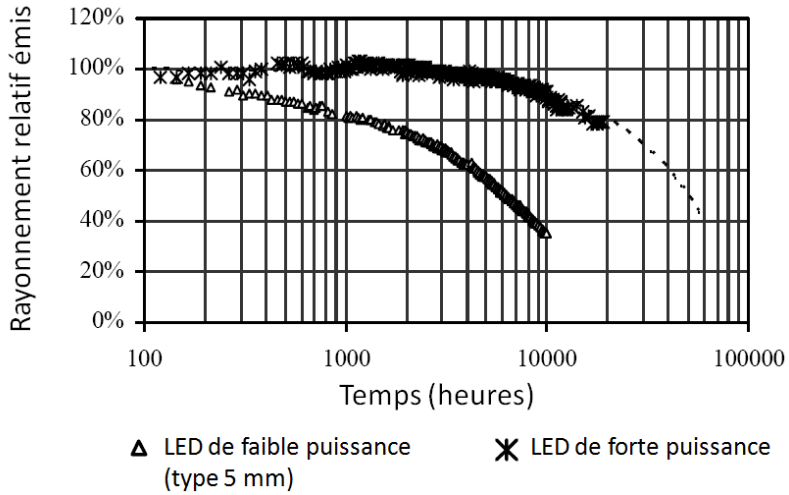


Fig. 2.18. - Evolution du « flux » relatif d'une LED blanche de faible puissance (type 5 mm) et d'une LED de forte puissance, en fonction du temps [NAR 04].

A partir de la fin 2001, N. Narendran a effectué une étude sur la durée de vie de LED de faible et forte puissance [NAR 02a] [NAR 04]. Celle-ci a permis de montrer que les LED de faible puissance, de type

5 mm, et les LED de forte puissance avaient leur flux qui chutait de 30 % après, respectivement, 3000 et 30 000 heures de fonctionnement environ, dans un environnement contrôlé (la température ambiante autour des LED ainsi que le courant d'alimentation des LED étaient maintenus à des valeurs constantes) (fig. 2.18).

2.4.7. Température de couleur proximale

Au début des années 2000, toutes les LED émettant de la lumière blanche avaient des températures de couleur proximale proches de 6000 - 6500 K et émettaient un blanc froid. La figure 2.19 (à gauche) présente un exemple de répartition spectrale de LED de type blanc froid.
A cette époque, les LED avaient un mauvais indice de rendu des couleurs. Pour résoudre ce problème les fabricants de LED ont développé des techniques permettant de diminuer la température de couleur proximale, pour ainsi, augmenter l'indice de rendu des couleurs. Ces techniques s'articulent autour de l'utilisation de différents types de luminophores afin de moduler la répartition spectrale de la lumière émise.

Ainsi, depuis 2004, les fabricants ont mis sur le marché des LED blanches ayant des températures de couleur proximale proches de 3000 K et émettant un blanc chaud (fig. 2.19 à droite).

Pour compléter leur gamme de LED disponible, ces fabricants proposent depuis 2007, des LED émettant un blanc neutre, avec des températures de couleur proximale proches de 4000 K.

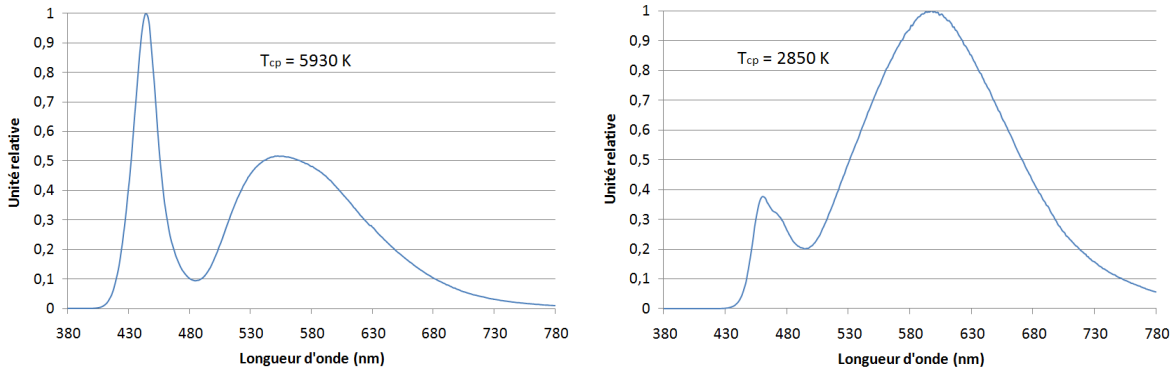


Fig. 2.19. - Exemples de répartitions spectrales de LED émettant un blanc froid (à gauche) et un blanc chaud (à droite).

Le processus de fabrication des LED a subi des améliorations notables ces dernières années notamment en ce qui concerne l'optimisation de la température de couleur proximale. Les fabricants ont constaté que cette température pouvait varier de plusieurs centaines de kelvins en fonction de l'angle d'observation d'une LED [LUM 04]. De plus, il était également très difficile d'obtenir la même température de couleur proximale dans un lot de fabrication. Cette dispersion provenait de la méthode de déposition du luminophore sur la puce semi-conductrice. La figure 2.20 présente, à gauche, la méthode obsolète de déposition, où la répartition du luminophore était inhomogène. La nouvelle méthode illustrée à droite, sur cette même figure, montre que le luminophore est déposé de manière contrôlée, et donc plus uniforme.



Fig. 2.20. - Méthodes de déposition du luminophore sur le semi-conducteur.
A gauche : méthode obsolète. A droite : nouvelle méthode [LUM 04].

L'amélioration du procédé de déposition du luminophore permet de générer des photons de manière homogène sur toute la surface émissive du semi-conducteur. Cette technique a permis de réduire les écarts de température de couleur proximale en fonction de l'angle d'observation de plusieurs centaines de kelvins à moins de 100 K [LUM 04].

2.5. Dimensionnement d'applications

Dans les applications d'éclairage à base de LED, il est indispensable de prendre en compte, au minimum, trois paramètres :

- ✓ la température de couleur proximale ;
- ✓ la puissance électrique ;
- ✓ le type d'alimentation.

En fonction de l'éclairage désiré, il est possible de choisir des températures de couleur parmi le blanc froid, le blanc neutre ou le blanc chaud.

La puissance électrique consommée des LED conditionne le système retenu pour la dissipation thermique de la chaleur produite (ventilateurs, radiateurs thermique et graisse thermique). La durée de vie des LED est très fortement liée à leur température (§ 2.4.3. Caractéristiques thermiques). Par conséquent, il est primordial de soigner la qualité du système de dissipation retenu, afin d'optimiser la durée de vie.

L'élément essentiel d'une LED est son semi-conducteur qui possède une dépendance courant-tension qui n'est pas linéaire, mais exponentielle (fig. 2.24). Ainsi, une petite variation de tension engendre une grande variation de courant, et inversement une petite variation de courant engendre une petite variation de tension. La puissance du rayonnement émis étant quasi proportionnelle au courant (fig. 2.23), il est préférable d'utiliser une alimentation en courant plutôt qu'en tension pour obtenir un flux stable.

De manière générale, il est possible d'alimenter des LED en courant de deux manières différentes. La première, qui est également la plus simple et la moins coûteuse, est une alimentation en courant continu. La deuxième est une alimentation en courant pulsé, autrement nommée PWM (Pulse Width Modulation). Ce courant pulsé est constitué de créneaux d'amplitude fixe dont on fait varier le rapport cyclique R_c exprimé par :

$$R_c = \frac{\tau}{T} \tag{2.8}$$

avec :

- τ, la durée du pulse généré ;
- T, la période du signal.

Ceci offre un moyen de faire varier le flux émis en fonction du rapport cyclique. On parle alors de « dimming ».

Les conséquences du choix du mode d'alimentation sont détaillées dans le chapitre III (§ 2.1. Alimentation électrique).
A noter qu'en 2009, il est assez difficile de se procurer des alimentations en courant pulsé auprès des distributeurs. Les alimentations à courant constant sont beaucoup plus facilement accessibles sur le marché.

2.6. Etude métrologique d'une LED blanche

2.6.1. LED et module d'asservissement en température

La LED blanche sur laquelle a porté notre étude, de marque Agilent Technologies, est référencée HLMP CW11 XY000. Cette LED de diamètre 5 mm, avec un dôme transparent, repose sur une jonction de type InGaN. Elle émet dans le bleu et la couche de luminophore jaune qui la recouvre permet d'obtenir une émission de lumière de type blanc froid. Les données constructeur concernant cette LED indiquent que la valeur nominale du courant d'alimentation direct continu I_F, est de 20 mA pour une valeur nominale de la tension d'alimentation directe V_F, de 3,2 V. L'intensité lumineuse I_v, dans l'axe mécanique de la LED pour un courant de 20 mA est comprise entre 7200 et 12 000 mcd (cette plage de valeur est un exemple révélateur de la difficulté de fabriquer des LED ayant des caractéristiques techniques proches).

Dans le cadre de cette étude métrologique nous avons décidé de réguler la LED en température afin d'améliorer la stabilité de l'intensité qu'elle émet. Pour ce faire, la LED a été montée dans un support permettant d'effectuer un asservissement en température (fig. 2.21).

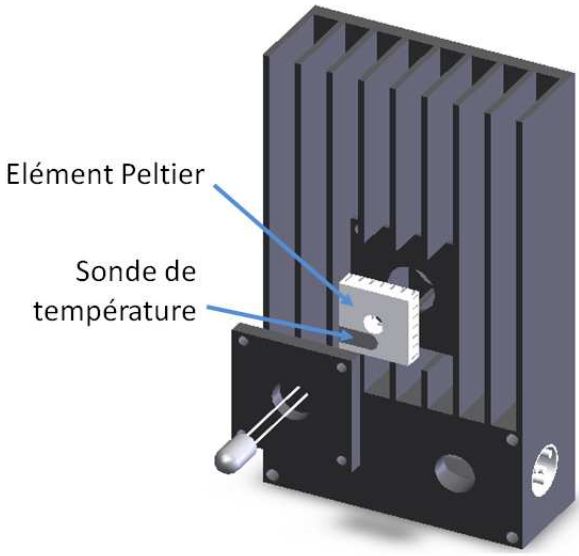


Fig. 2.21. - Vue éclatée du support de LED et
du module d'asservissement en température.

La régulation en température se fait par l'intermédiaire d'un module thermoélectrique (élément Peltier de marque MELCOR référencé SH0,8-28-05L) placé à l'arrière de la LED et directement en contact avec la partie inférieure du dôme de la LED. Une sonde de température (référencée AD590), elle aussi, directement en contact avec le dôme de la LED permet d'en mesurer la température. L'ensemble des contacts thermiques entre la sonde, l'élément Peltier et la LED est assuré par une graisse thermique de marque Arctic Silver (modèle 5 à base d'argent polysynthétique). La température donnée par la sonde est comparée à une température de consigne. En fonction de l'écart de température mesuré, un courant est envoyé dans l'élément Peltier, qui, suivant sa polarité, augmente ou diminue la température au niveau de la LED. Un contrôleur de marque ILX Lightwave (modèle 5910B) permet d'assurer ce type d'asservissement en température.

Un générateur de marque Agilent, référencé E3615A, permet d'alimenter la LED en courant dans une gamme de 0 à 3 A. Sa stabilité en courant est de 2×10^{-5} sur cinq minutes et de 1×10^{-4} sur trente minutes.

2.6.2. Caractérisation intrinsèque

Nous avons mis en place à l'INM un banc de mesure afin de déterminer les caractéristiques courant-tension et éclairement-courant de LED. Ces caractéristiques nous fournissent des indications sur leur fonctionnement intrinsèque.

2.6.2.1. Montage expérimental

La figure 2.22 présente le principe de ce banc de mesure.

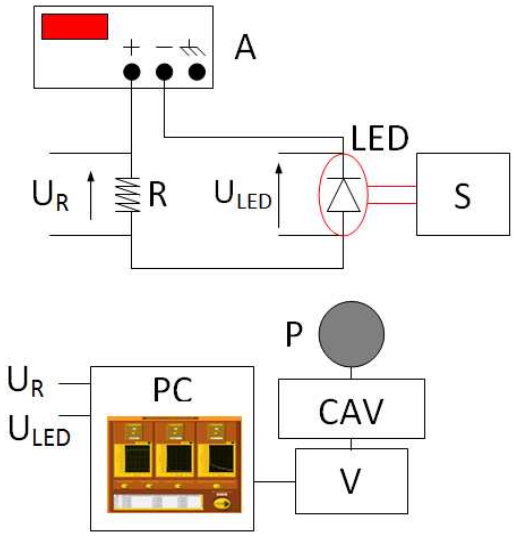


Fig. 2.22. - Schéma de principe du banc de caractérisation intrinsèque de LED.
A : alimentation stabilisée en courant, R : résistance étalon, S : support de LED et module d'asservissement en température, P : photodiode, CAV : convertisseur courant-tension, V : voltmètre.

La LED était positionnée à une distance de 10 cm d'une photodiode au silicium de type Hamamatsu 1337. Cette dernière permettait de mesurer l'éclairement énergétique reçu. Elle était reliée à un convertisseur courant-tension dont la tension de sortie était mesurée à l'aide d'un voltmètre Keithley 2010.

La température de fonctionnement de la LED était de 20 °C. Son courant d'alimentation était déterminé à partir d'une mesure de tension aux bornes d'une résistance étalon quatre fils de 100 Ω. Une mesure de tension aux bornes de cette LED était également effectuée. Les acquisitions de données étaient faites par l'intermédiaire d'un programme développé sous le logiciel labVIEW.

Les études ont porté sur les variations de l'éclairement énergétique relatif sur la photodiode en fonction du courant d'alimentation de cette LED ainsi que des variations de courant en fonction de la tension aux bornes de cette même LED.

2.6.2.2. Résultats expérimentaux

Les figures 2.23 et 2.24 présentent les caractéristiques éclairement-courant et courant-tension de cette LED blanche.

La caractéristique de la figure 2.23 permet de voir que l'éclairement du rayonnement émis évolue quasi linéairement en fonction du courant d'alimentation (compris dans une gamme de valeurs usuelles de fonctionnement).

La caractéristique courant-tension (fig. 2.24) apporte des informations sur le meilleur mode d'alimentation des LED. Comme le montre cette courbe, les LED possèdent une dépendance courant-tension qui n'est pas linéaire mais exponentielle. De ce fait, comme nous l'avons expliqué précédemment, il est préférable d'utiliser une alimentation en courant plutôt qu'en tension pour obtenir une meilleure stabilité des paramètres physiques d'une LED.

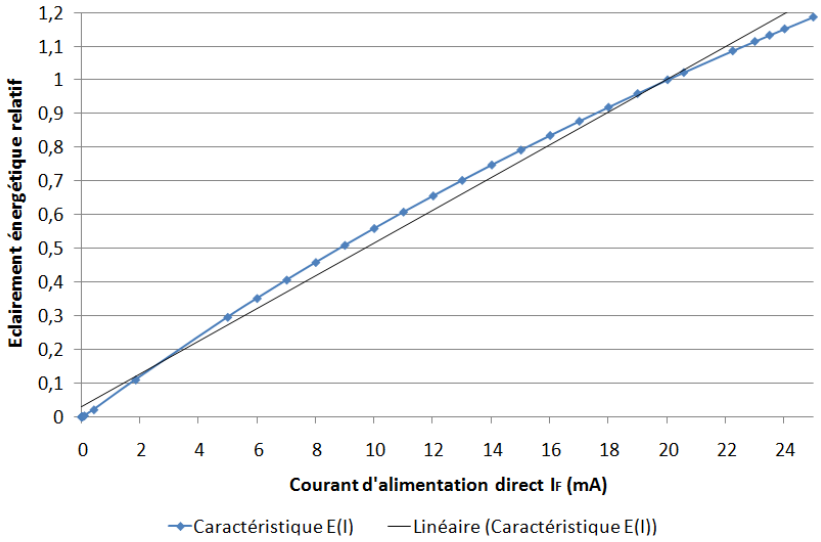


Fig. 2.23. - Caractéristique éclairement énergétique relatif - courant d'alimentation pour la LED blanche.

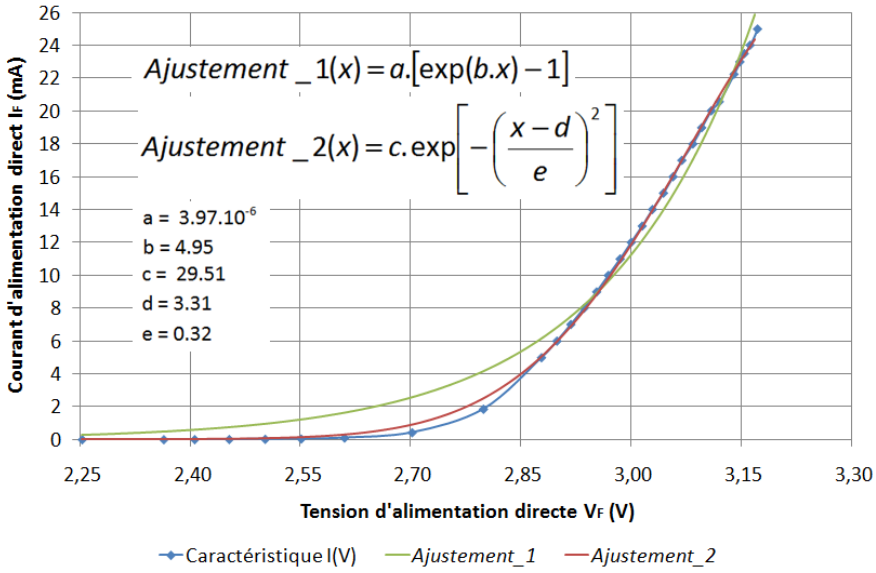


Fig. 2.24. - Caractéristique courant-tension aux bornes de la LED blanche. *Ajustement_1* correspond au modèle théorique de l'expression 2.2. *Ajustement_2* correspond à un ajustement qui colle mieux aux données expérimentales, mais qui n'a pas de signification physique connue.

2.6.3. Mesure d'intensité lumineuse

A l'issue des études sur les caractéristiques intrinsèques de la LED blanche, nous avons effectué une mesure d'intensité lumineuse. Celle-ci a été réalisée à l'aide d'une tête photométrique étalon référencée PH-04-A, matérialisant la candela, et raccordée au radiomètre à substitution électrique cryogénique [GON 05].

2.6.3.1. Principe et considérations pour les LED

Lorsqu'une source est ponctuelle, ou lorsqu'elle est suffisamment petite par rapport à la distance au point d'observation, la grandeur qui la caractérise le mieux, est le flux émis dans une direction donnée, autrement dit, l'intensité.

Expérimentalement, la mesure de l'intensité est réalisée par l'intermédiaire d'une mesure d'éclairement. La relation entre l'intensité *I* et l'éclairement *E*, est explicitée par la loi de Bouguer (ou autrement nommée loi de l'inverse carré de la distance) obtenue à partir des relations (1.2), (1.4), et (1.5) et, est schématisée par la figure 2.25 :

$$E = \frac{I.\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}A} = \frac{I.\cos\theta}{d^2} \qquad (2.9)$$

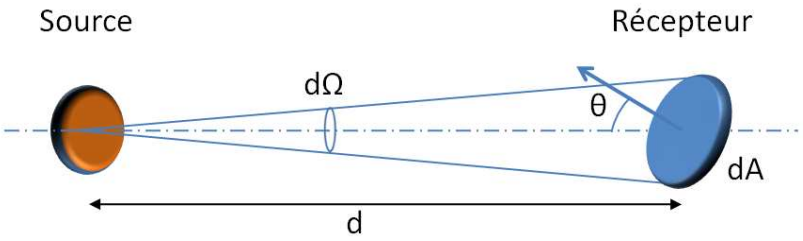


Fig. 2.25. - Représentation schématique de la relation entre éclairement et intensité.

La partie émettrice d'une LED (de type 5 mm) est très petite, de l'ordre de quelques dizaines de micromètres, correspondant aux dimensions d'une source quasi-ponctuelle. Malheureusement, l'extraction de la lumière produite, nécessite l'intégration d'une optique devant la partie émettrice ce qui modifie profondément la direction de sortie des faisceaux. Vue de l'extérieur, une LED semble avoir une surface d'émission, et dans ces conditions, ne peut pas être considérée comme une source ponctuelle.

De plus, l'indicatrice d'intensité d'une LED (de type 5 mm) est très difficilement identifiable. Elle n'est pas uniforme, est restreinte angulairement (fig. 2.14 à droite), et peut, par conséquent, présenter des variations très fortes en fonction de l'angle d'observation.

De par ces aspects, la loi de Bouguer s'applique difficilement aux LED.

Pour pallier ce problème, et dans l'objectif de pouvoir effectuer des comparaisons de mesures d'intensité lumineuse sur les LED, la CIE a émis en 2007, une recommandation pour ces mesures [CIE 07a]. La notion d'intensité moyennée d'une LED a ainsi été définie et correspond à des mesures effectuées dans des conditions géométriques précises.

Deux conditions standard de mesure ont été proposées. Une première condition, notée *A*, qui correspond à une distance d_A entre la LED et le détecteur égale à 316 mm, et une seconde condition, notée *B*, correspondant à une distance d_B égale à 100 mm. Ces deux conditions nécessitent l'utilisation d'un détecteur ayant une pupille d'entrée circulaire d'aire égale à 100 mm^2 (diamètre de 11,3 mm). Ceci correspond, respectivement dans le cas de la condition *A* et de la condition *B*, à des angles solides de 0,001 et 0,01 sr.

D'un point de vue géométrique, la LED doit être positionnée face au détecteur et son axe mécanique doit être en coïncidence avec l'axe optique du détecteur. L'extrémité du dôme de la LED a été choisie comme point de référence pour la mesure de distance *d* (fig. 2.26).

Les valeurs issues de ces mesures permettent ainsi de comparer les performances des LED entre elles mais ne sont pas utilisables pour des applications pratiques, en particulier dans le domaine de l'éclairage, car la mesure effectuée ne correspond pas à la définition exacte de l'intensité lumineuse.

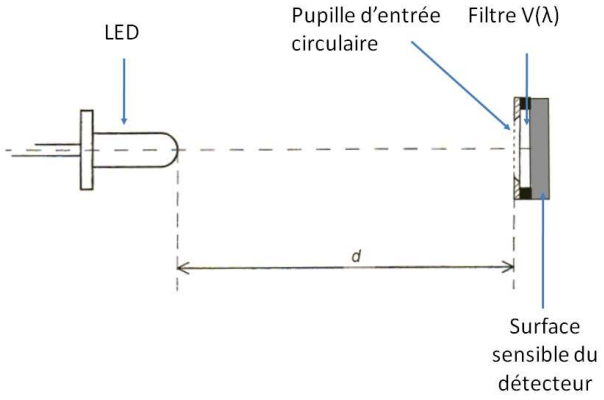


Fig. 2.26. - Représentation schématique des conditions de mesures d'intensité lumineuse moyennée de LED définies par la CIE [CIE 07a].

Dans le cadre de notre étude nous n'avons pas rigoureusement respecté les recommandations de la CIE car nous n'avions pas à disposition immédiate un diaphragme de diamètre égal à 11,3 mm, étalonné, et adaptable sur la tête photométrique.

2.6.3.2. Banc photométrique

Le banc photométrique de l'INM [BAS 99] a été adapté pour effectuer des mesures d'intensité lumineuse moyennée sur la LED blanche de type 5 mm. Ce banc offre une souplesse, d'une part, dans le choix de la distance entre la source et le détecteur (cependant limitée à environ 4 m), et d'autre part, dans le choix de la surface du détecteur. Le choix de la surface du détecteur est limité par le nombre de diaphragmes étalonnés que nous avons à disposition à l'INM, à un instant donné.

Le dispositif mis en œuvre est illustré par les figures 2.27 et 2.28.

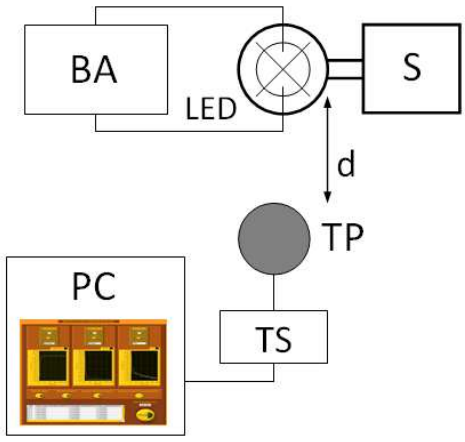


Fig. 2.27. - Schéma de principe du banc de mesure en intensité lumineuse de LED.
BA : boîtier d'alimentation (alimentation stabilisée en courant et résistance étalon de 100 Ω), S : support de LED et module d'asservissement en température, TP : tête photométrique, d : distance entre la LED et la pupille d'entrée de la tête photométrique, TS : chaîne de traitement du signal (convertisseur courant-tension et voltmètre), PC : ordinateur.

La LED blanche, associée à son alimentation en courant et à son asservissement en température, décrit précédemment, est placée à une distance *d* de 297,73 mm par rapport à la pupille d'entrée de la tête photométrique. Le rayon de la pupille d'entrée est égal à 5,312 mm. La valeur de la distance *d* entre la pupille d'entrée et la LED a été calculée pour obtenir un angle solide de 0,0010 sr.

La tête photométrique utilisée est composée essentiellement de trois photodiodes au silicium montées en piège, et d'un filtre *V(λ)*. Elle génère un courant *i* en fonction de l'éclairement *E* qu'elle reçoit. Ce courant est converti en tension *T*, de l'ordre de 3,5 V, à l'aide d'un convertisseur courant-tension de marque Vinculum, référencé SP043 (CAV-RM-17), de coefficient de conversion C_{CAV} égal à 0,999 91 x 10^{-6} A/V. Cette tension est ensuite mesurée à l'aide d'un multimètre de marque Agilent référencé HP3458A.

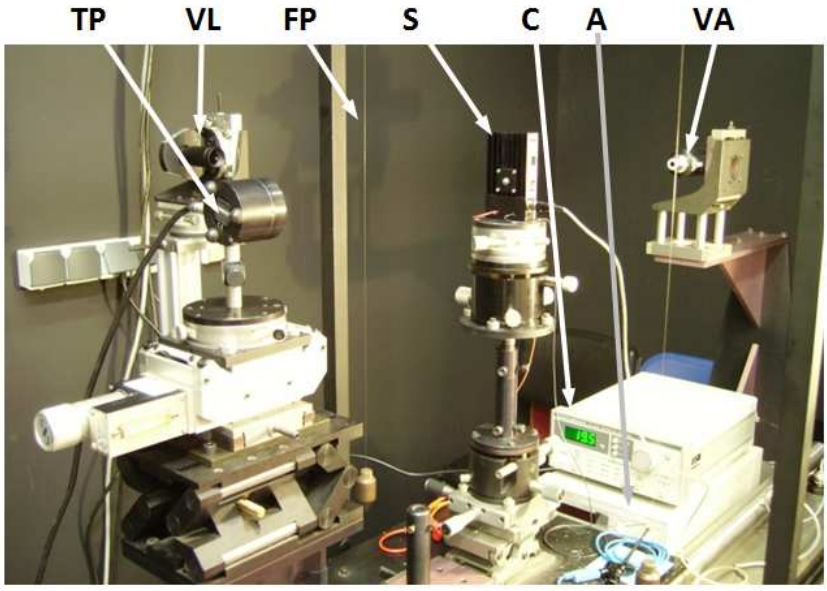


Fig. 2.28. - Banc de mesure en intensité lumineuse de LED.
TP : tête photométrique, VL : viseur latéral, FP : fils à plomb, S : support de LED et module d'asservissement en température, C : contrôleur de température, A : alimentation stabilisée en courant, VA : viseur axial.

Les tensions sont communiquées à un ordinateur grâce à une interface GPIB (autrement nommée IEEE 488.2). Un programme développé sous labVIEW permet l'enregistrement des tensions et le calcul de l'intensité lumineuse moyennée résultante de la LED, exprimée par :

$$I_v = E_v.d^2 = \frac{i}{S_{phot}}.d^2 = \frac{T.C_{CAV}}{S_{phot}}.d^2 \qquad (2.10)$$

où S_{phot} est la sensibilité lumineuse de la tête photométrique (en A.lx^{-1}) corrigée du facteur d'adaptation spectrale (FAS) (Chapitre I *§* 1.7. Facteur d'adaptation spectral), telle que :

$$S_{phot} = \frac{i}{E} = \frac{S(\lambda = 555)}{K_m}.\frac{A}{FAS} \qquad (2.11)$$

avec :

- *S(λ = 555 nm)*, la sensibilité spectrale absolue de la tête photométrique à 555 nm (en A.W^{-1}) ;
- K_m, l'efficacité lumineuse maximale en vision photopique (en lm.W^{-1}) ;
- *A*, la surface de la pupille d'entrée de la tête photométrique.

S_{phot} est égale à 2,500 x 10^{-8} A.lx^{-1}.

2.6.3.3. Procédure d'alignement du banc

Le banc photométrique dispose de plusieurs éléments nécessaires à l'alignement des composants du montage tels que la tête photométrique et la LED. Des fils à plombs soigneusement positionnés matérialisent un plan perpendiculaire à l'axe optique du banc (fig. 2.28), lui-même parallèle à l'axe mécanique du banc. Ce plan est utilisé comme plan de référence pour les mesures de distances. Un viseur latéral dont l'axe vertical du réticule est positionné en coïncidence avec les fils à plombs permet d'affiner les réglages des divers éléments du montage. Un viseur axial permet l'alignement de la tête photométrique et de la LED par rapport à l'axe optique du banc. Ce dernier étant matérialisé par le faisceau d'un laser He-Ne.

La tête photométrique est d'abord alignée par rapport à l'axe optique du banc. Puis, le support de LED est aligné de façon à ce que l'axe mécanique de la LED soit en coïncidence avec l'axe optique du banc.
Le positionnement, sur le banc photométrique, de la LED et de la pupille d'entrée de la tête photométrique, séparés d'une distance *d*, se fait de la façon suivante (fig. 2.29) : le dôme de la LED est à une position d_0 lue sur une règle graduée. La face-avant de tête photométrique est positionnée sur la règle à une valeur d_1 telle que :

$$d_1 = d_0 - d + e \qquad (2.12)$$

où *e* est la distance entre la face-avant de la tête photométrique et la pupille d'entrée de celle-ci. Elle est égale à 3,98 mm.

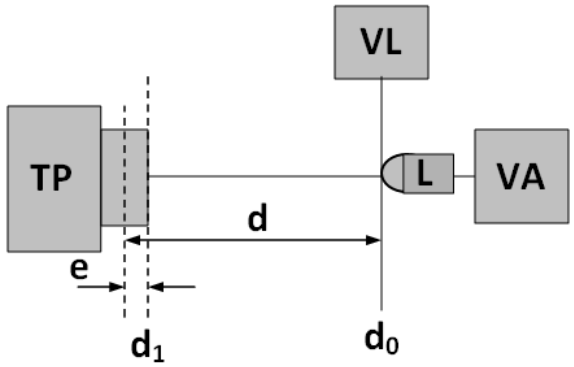


Fig. 2.29. - Représentation schématique du positionnement de la tête photométrique et de la LED.
TP : tête photométrique, L : LED, VL : viseur latéral, VA : viseur axial.

Le réglage de ces positions se fait à partir des fils à plomb associés au viseur latéral (fig. 2.30).

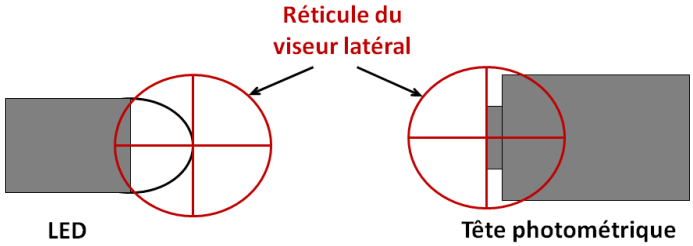


Fig. 2.30. - Représentation schématique de la tête photométrique
et de la LED alignées avec le trait vertical du réticule du viseur latéral.

Un réglage angulaire de la position du support de la LED par rapport à l'axe optique du banc est effectué en même temps à l'aide du viseur latéral (fig. 2.31).

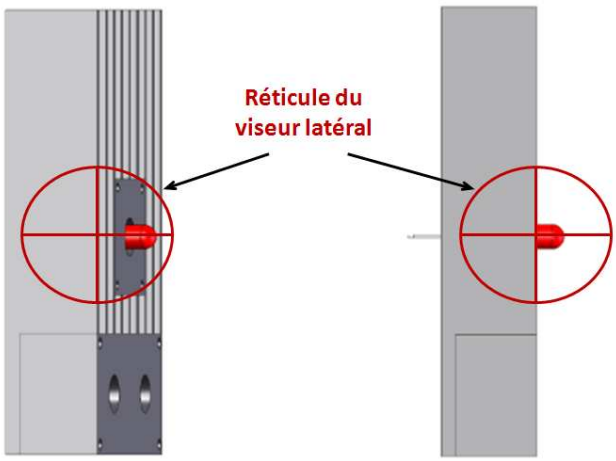


Fig. 2.31. - Représentation schématique de l'alignement de la LED et de son support.
A gauche : alignement faussé. A droite : alignement correct.

2.6.3.4. Résultats et budget d'incertitude

L'intensité lumineuse de la LED blanche référencée HLMP CW11 XY000 est donnée pour un courant de 20 mA, une température autour de la LED de 20 °C, et pour les conditions géométriques définies précédemment. Les mesures ont été effectuées après stabilisation de l'émission de la LED, sept à dix minutes après l'allumage.

Des séries de mesures d'intensité lumineuse moyennée, dans des conditions de reproductibilité avec et sans asservissement en température, ont été effectuées. Les résultats obtenus ont montré que l'asservissement en température permet de réduire d'un facteur égal à deux l'écart-type de dispersion des valeurs d'intensité.

Les incertitudes-types relatives sur cette mesure sont listées ci-dessous :

Répétabilité
A partir des résultats obtenus sur une dizaine de séries de mesures d'intensité effectuées dans des conditions de répétabilité, l'incertitude-type relative liée à cette cause d'incertitude est estimée à 0,02%.

Alignement

Centrage et orientation de la LED
A partir de résultats obtenus sur cinq séries de mesures effectuées dans des conditions de reproductibilité (support de LED et LED démontés et remontés) sur une journée, l'écart-type relatif de dispersion a été calculé comme étant égal à 0,4%.

Distance
Dans les documents qualité concernant le banc photométrique de l'INM [PROC 08], l'incertitude-type relative donnée sur la mesure d'une distance de 3 m est de 0,025%. Donc pour 297,73 mm, l'incertitude-type relative est de 0,25%.

Photomètre

Convertisseur courant-tension
L'étalonnage périodique des convertisseurs courant-tension selon la procédure interne de l'INM [PROC 07], nous permet de donner une incertitude-type relative sur le coefficient de conversion du convertisseur CAV-RM-17 égale à 0,012%.

Multimètre HP3458A

A l'aide d'un générateur de tension Fluke 5440 B étalonné au LNE, nous vérifions que les résultats de mesure du multimètre sont contenus dans les spécifications constructeur.
Or, d'après ces spécifications, l'exactitude de mesure pour une tension de l'ordre de 3,5 V est égale à ± 2,9 x 10^{-5} V. En considérant une loi de distribution uniforme, l'incertitude-type associée au multimètre est égale à 1,6 x 10^{-5} V ((2,9 x 10^{-5})/√3), ce qui donne en relatif une incertitude-type de 0,0005%.

Sensibilité photomètre

D'après Gaël Obein [OBE 07], l'incertitude-type relative sur la sensibilité lumineuse comporte :
- l'incertitude-type relative sur la sensibilité spectrale absolue du détecteur piège estimée à 0,073% ;
- l'incertitude-type relative sur la linéarité du détecteur égale à 0,033% ;
- l'incertitude-type relative sur la transmission du filtre égale à 0,11% ;
- l'incertitude-type relative sur le calcul de la surface de la pupille d'entrée estimée à 0,012% ;
- l'incertitude-type relative sur le facteur d'adaptation spectrale (FAS).

Cette dernière source d'incertitude intervient de manière spécifique dans notre cas car la répartition spectrale de la LED est différente de celles des sources à incandescence (proches de l'illuminant A) utilisées habituellement avec cette tête photométrique.

L'incertitude-type relative sur le FAS a été estimée à partir de simulations numériques réalisées dans différentes configurations : avec un spectre mesuré de la LED, puis avec ce même spectre décalé en longueur d'onde de 1 nm, puis dilaté de 1 nm.
L'écart maximum calculé sur les FAS obtenus est de 0,3%. Cette valeur a été prise comme incertitude-type relative sur le facteur d'adaptation spectrale.

Au final, l'incertitude-type relative sur la sensibilité du photomètre S_{phot} est égale à 0,33%.

LED

Résistance étalon

La valeur de la résistance étalon est déterminée en réalisant un montage électrique où cette résistance est branchée en série avec une résistance étalon de référence (TINSLEY 1682 de valeur nominale égale à 0,1 Ω) de valeur connue. Ces deux résistances sont alimentées par une source de courant *i* dont la stabilité relative est de l'ordre de 10^{-5}. De cette façon, nous avons la relation :

$$i = \frac{U_x}{R_x} = \frac{U_{ref}}{R_{ref}} \tag{2.13}$$

avec :
- R_x, la valeur de la résistance à étalonner ;
- U_x, la tension aux bornes de la résistance à étalonner ;
- R_{ref}, la valeur de la résistance étalon de référence ;
- U_{ref}, la tension aux bornes de la résistance étalon de référence.

La valeur de la résistance à étalonner est alors obtenue par :

$$R_x = \frac{U_x . R_{ref}}{U_{ref}} \tag{2.14}$$

L'incertitude sur la valeur de la résistance à étalonner $u_c(R_x)$ est déterminée en prenant en compte, d'une part, les incertitudes sur les deux mesures de tension (qui sont corrélées), et d'autre part, l'incertitude sur la valeur de la résistance étalon de référence [GUM 95] telle que :

$$u_c(R_x) = \left[\left(\frac{\partial R_x}{\partial U_x}.u(U_x) \right)^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial U_{ref}}.u(U_{ref}) \right)^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial R_{ref}}.u(R_{ref}) \right)^2 + 2.\frac{\partial R_x}{\partial U_{ref}}.\frac{\partial R_x}{\partial U_x}.u(U_{ref},U_x) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

avec :

- $\frac{\partial R_x}{\partial U_x} = \frac{R_{ref}}{U_{ref}}$
- $\frac{\partial R_x}{\partial U_{ref}} = -\frac{U_x.R_{ref}}{U_{ref}^2}$
- $\frac{\partial R_x}{\partial R_{ref}} = \frac{U_x}{U_{ref}}$
- $u(U_{ref},U_x)$, est la covariance associée à U_{ref} et U_x qui est égale à $r(U_{ref},U_x).u(U_{ref}).u(U_x)$ avec $r(U_{ref},U_x)$, le coefficient de corrélation. Dans notre cas, $r(U_{ref},U_x)=1$ donc $u(U_{ref},U_x)=u(U_{ref}).u(U_x)$.

La valeur de la résistance étalon est estimée avec une incertitude-type relative de 0,03%.

Multimètre Keithley 2010

A l'aide d'un générateur de tension Fluke 5440 B étalonné au LNE, nous vérifions que les résultats de mesure du multimètre sont contenus dans les spécifications constructeur.
Or, d'après ces spécifications, l'exactitude sur la mesure de tension (de l'ordre de 2 V) aux bornes de la résistance étalon est égale à ± 8,8 x 10^{-5} V. En considérant une loi de distribution uniforme, on estime que l'incertitude-type associée au multimètre est égale à 5,1 x 10^{-5} V ((8,8 x 10^{-5})/√3). Ceci amène à une incertitude-type relative de 0,0025%.

Asservissement en température

D'après la thèse de Jeanne-Marie Coutin [COU 92], qui utilisait le même type d'asservissement en température pour des diodes lasers, l'incertitude-type relative donnée sur celui-ci est inférieure à 0,06%.

Le tableau 2.2 présente le budget d'incertitude associé au résultat de mesure de l'intensité lumineuse. D'après ce tableau, les incertitudes prépondérantes concernent le centrage et l'orientation de la LED ainsi que l'incertitude sur le facteur d'adaptation spectral. Concernant la première source d'incertitude celle-ci peut être diminuée en améliorant le système mécanique d'orientation de la LED. En ce qui concerne l'incertitude sur le facteur d'adaptation spectral celle-ci peut être optimisée par une diminution des incertitudes de mesure du spectre de la LED et de la sensibilité de la tête photométrique.

La valeur de l'intensité lumineuse moyennée I_v de la LED blanche HLMP CW11 (dans les conditions géométriques spécifiées) est égale à 12,55 cd avec une incertitude-type égale à 0,07 cd.

Si l'on s'intéresse aux capacités d'étalonnage en intensité lumineuse de LED des laboratoires de métrologie étrangers, seul le NIST a fourni des indications visibles dans la base de données « Calibration and Measurement Capabilities » (CMCs) du Bureau international des poids et mesures (BIPM) [BIP]. Le NIST donne une incertitude-type relative de mesure de l'intensité lumineuse comprise entre 0,5 et 1% selon le type de LED et le niveau d'intensité qui doit être compris entre 0,01 et 1000 cd.

Causes d'erreurs	Incertitude-type relative
Répétabilité	0,02 %
Alignement	
Centrage et orientation de la LED	0,4 %
Distance (297,73 mm)	0,25 %
Tête photométrique	
Convertisseur courant-tension	0,012 %
Multimètre	0,0005 %
Sensibilité du photomètre	
Sensibilité spectrale absolue du détecteur piège	0,073 %
Linéarité	0,033 %
Transmission du filtre	0,11 %
Surface du diaphragme	0,012 %
Facteur d'adaptation spectrale	0,3 %
LED	
Résistance étalon	0,03 %
Multimètre	0,0025 %
Asservissement en température	0,06 %
Incertitude-type composée relative	**0,6 %**

Tab. 2.2. - Budget d'incertitude associé à la mesure d'intensité lumineuse moyennée sur le banc photométrique de l'INM.

2.6.4. Conclusion sur l'étude métrologique

Un banc de caractérisation et un banc de mesure d'intensité lumineuse moyennée de LED, de type 5 mm, on été mis en place à l'INM. Ce travail a fait l'objet d'une communication au 13ème Congrès international de métrologie en 2007 (Annexe E).

Les études effectuées ont permis d'évaluer les différents paramètres à contrôler afin d'obtenir un rayonnement lumineux stable. Ces paramètres sont, entre autres, le courant d'alimentation et la température de la LED.

Les résultats ont été repris par les membres de l'équipe « Rayonnements optiques » basés sur le site du LNE à Trappes, pour développer un goniophotomètre pour des LED de faible puissance. Ce banc a été utilisé pour la réalisation de mesures d'intensité lumineuse moyennée (*a*), de flux lumineux (*b*) et de paramètres colorimétriques (*c*) dans le cadre de la comparaison internationale *APMP.PR-S3.a,b,c* initiée par l' « Asia Pacific Metrology Programme » et pilotée par le laboratoire de métrologie Coréen, le « Korea Research Institute of Standards and Science » (KRISS).

3 Conclusion

Compte tenu du fait que les lampes à faible efficacité lumineuse utilisées dans des applications d'éclairage grand public sont amenées progressivement à disparaître, l'utilisation de sources plus efficaces est nécessaire. Les LED de forte puissance sont des candidats sérieux pour s'imposer. Par conséquent, dans la suite de ce document, les études porteront sur ce type de LED.

Pour pouvoir implémenter ces nouvelles sources dans des applications d'éclairages, il est nécessaire de connaître leurs caractéristiques colorimétriques et notamment leur indice de rendu des couleurs.

Chapitre III

L'indice de rendu des couleurs traçable au Système international d'unités

"Qui ne doute pas, acquiert peu"

[Léonard de Vinci, artiste italien, 1452-1519]

La qualité du rendu des couleurs des sources de lumière est actuellement déterminée à partir de l'indice de rendu des couleurs (IRC) explicité dans le chapitre I (§ 2.5. Indice de rendu des couleurs). Comme nous l'avons vu, le calcul de cet indice est basé sur une mesure de la répartition spectrale d'une source, et s'appuie sur des données normalisées issues d'expériences psychophysiques effectuées sur des observateurs. L'objectif donné à cet indice est d'évaluer, par une mesure physique, le rendu des couleurs des sources en accord avec la perception visuelle des humains.

Afin de pouvoir juger de la pertinence de ce type d'indice nous avons conçu à l'INM, une expérience permettant de comparer des résultats issus de mesures physiques (fig. 3.1. gauche), à des résultats issus de mesures visuelles menées avec des observateurs (fig. 3.1. droite). C'est pourquoi notre montage expérimental s'articule autour d'une cabine à lumière.

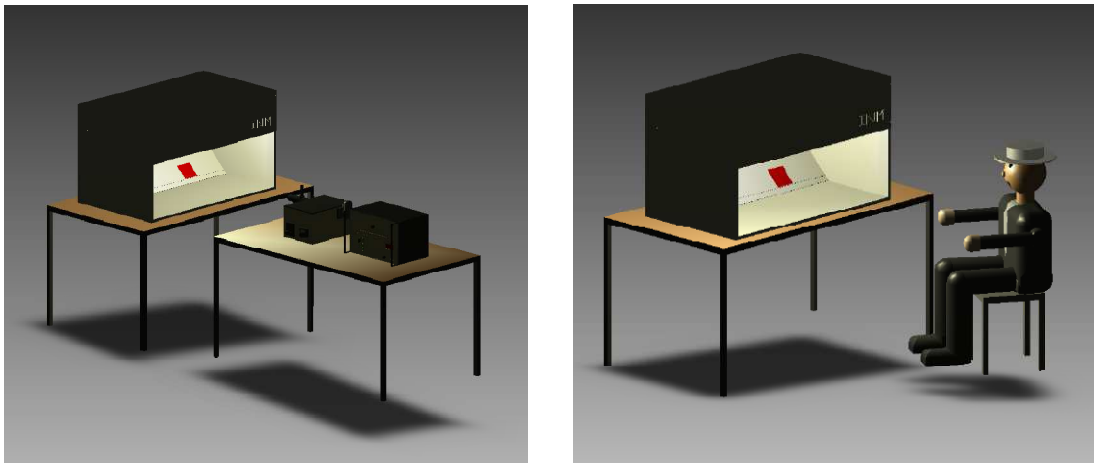


Fig. 3.1. - Schéma de principe de l'expérience mise en place à l'INM.
A gauche : configuration pour des mesures physiques.
A droite : configuration pour des mesures visuelles.

Dans ce chapitre nous traitons la question du raccordement des valeurs d'IRC au Système international d'unités par l'intermédiaire de mesures spectrales relatives. Cet aspect est primordial pour pouvoir donner des valeurs fiables et reconnues auxquelles ont été associées des valeurs d'incertitude. Les variations de l'IRC en fonction de plusieurs paramètres d'influence sont également abordées de manière quantitative.

1 Mesures spectrales de sources à LED, calculs colorimétriques et incertitudes

1.1. Montage expérimental

Le montage de référence, de caractérisation de LED de puissance, développé à l'INM (fig. 3.2) est composé principalement d'une cabine à lumière contenant des éclairages à LED et d'un spectroradiomètre à réseau, positionné à 1,2 m de la cabine environ, et permettant d'effectuer des mesures spectrales relatives.

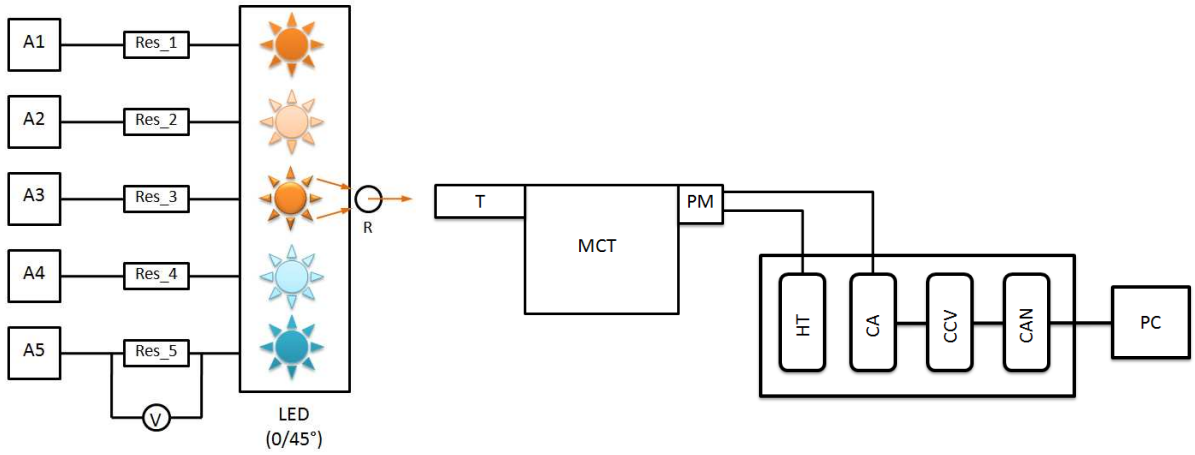


Fig. 3.2. - Description schématique du montage de référence de l'INM permettant d'effectuer des mesures spectrales relatives sur des systèmes d'éclairage à LED.

A*i* : alimentations stabilisées en courant, Res_*i* : résistances étalon, R : étalon blanc de réflexion diffuse illuminé par un des éclairage à LED, T : téléobjectif du spectroradiomètre, MCT : monochromateur de type Czerny-Turner, PM : photomultiplicateur, HT : haute tension, CA : amplificateur de courant, CCV : convertisseur courant-tension, CAN : convertisseur analogique numérique.

Les éléments composant ce montage sont détaillés dans les paragraphes suivants.

1.1.1. Cabine à lumière et éclairages à LED

Une cabine à lumière sert généralement à effectuer des comparaisons visuelles sur des objets colorés, éclairés par différents types de sources lumineuses artificielles. La cabine à lumière conçue pour cette expérience fait 1 m de long pour 60 cm de profondeur et de hauteur (fig. 3.3).



Fig. 3.3. - Cabine à lumière de l'INM.

Elle contient cinq éclairages à LED positionnés dans la partie supérieure de la cabine qui est recouverte d'une peinture blanche ayant un facteur de réflexion élevé, de l'ordre de 90%. Deux de ces éclairages sont de type blanc froid (noté 1 et 2) et proviennent de deux fabricants distincts (respectivement Philips Lumileds et Seoul Semiconducteur) et les trois autres éclairages sont de type blanc chaud (noté 3, 4, et 5) et proviennent également de trois fabricants différents (respectivement Philips Lumileds, Seoul Semiconducteur, et Cree). Chaque éclairage est composé de dix LED de 1 W branchées en série et montées sur un dissipateur thermique en aluminium anodisé (fig. 3.4). Le dissipateur thermique est un système passif qui permet de réguler la température de la LED en évacuant la chaleur produite. Le choix de l'aluminium pour ce dissipateur repose sur sa bonne conductivité thermique et son faible prix.



Fig. 3.4. - LED montées sur un dissipateur thermique
et mises en place à l'intérieur de la cabine.

Les éclairages sont chacun alimentés par une source de courant continu, de marque Agilent (modèle E3616A), dont la stabilité relative est de l'ordre de quelques 10^{-5} sur plusieurs heures. Le courant d'alimentation moyen pour chacune des sources d'éclairage est de 350 mA. La mesure du courant d'alimentation des LED est obtenue grâce à la mesure de la tension - à l'aide d'un multimètre Keithley 2002 - aux bornes de résistances étalons - de marque CROPICO - de 10 mΩ branchées en série dans chacun des circuits (fig. 3.2 et 3.5).

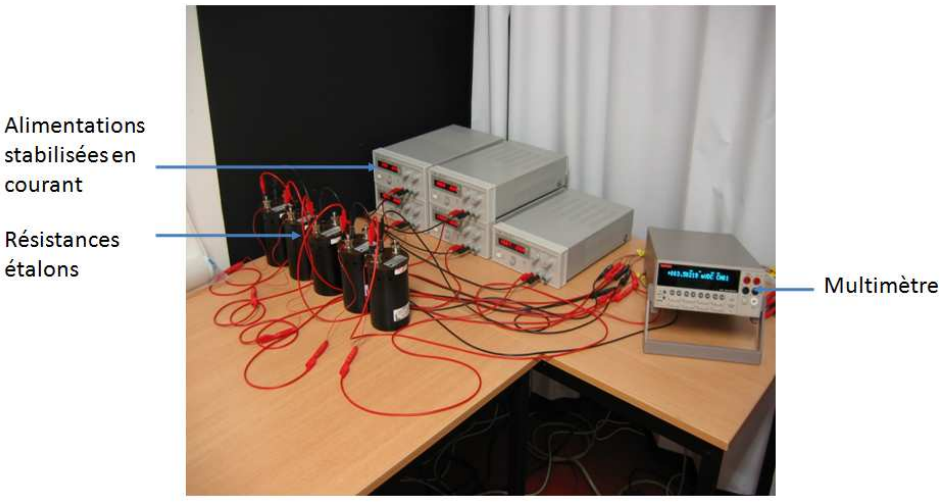


Fig. 3.5. - Montage d'alimentation en courant continu des éclairages à LED.

Un diffuseur LEE n° 252 est placé sous les éclairages à LED à une distance de 15 cm afin d'obtenir un éclairage uniforme dans la partie inférieure de la cabine à lumière. Des mesures d'éclairement lumineux à l'aide d'un luxmètre (de marque Hagner, modèle E2) à l'intérieur de la cabine, ont montré que les valeurs étaient comprises entre 130 et 220 lux en fonction de la source d'éclairage à LED et que cet éclairement était homogène à $\pm$ 7% sur une surface de 40 par 20 cm située au centre de la cabine. L'intérieur de cette cabine est recouverte d'une peinture de couleur gris clair, de type Munsell N7. Cette dernière est utilisée comme revêtement de référence lors de la mise en place de mesures visuelles dans ce type de cabine car elle est considérée comme neutre [ASTM] [BSI].

1.1.2. Spectroradiomètre

Le spectroradiomètre à réseau utilisé (fig. 3.6) - de marque Bentham - est composé d'un monochromateur simple - référencé M300 - de type Czerny-Turner ayant une distance focale de 300 mm.

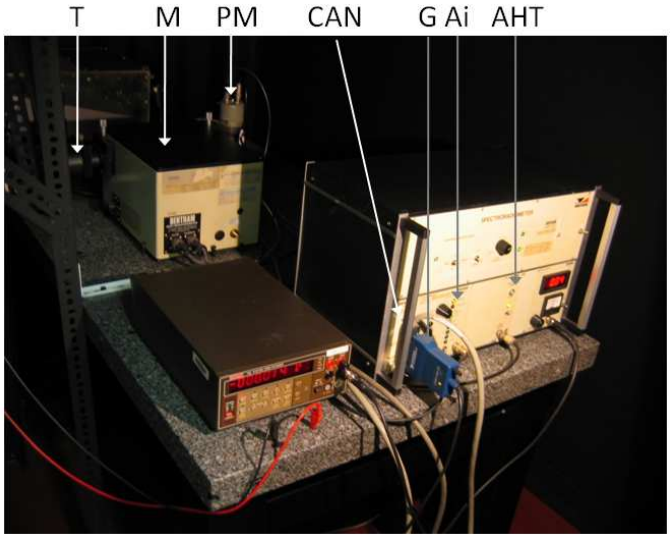


Fig. 3.6. - Spectroradiomètre Bentham.

T : téléobjectif, M : monochromateur M300, PM : photomultiplicateur, CAN : convertisseur analogique numérique, G : interface GPIB/USB, Ai : amplificateur de courant, AHT : alimentation haute tension du PM.

Le réseau de diffraction holographique carré, de 69 mm de coté, comprend 1200 traits par millimètre, et permet de mesurer des radiations électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 200 nm et 1,4 µm. Pour notre utilisation nous nous limiterons au domaine des longueurs d'onde visibles, couramment défini entre 380 et 780 nm.

Le téléobjectif monté en amont du monochromateur forme l'image de l'objet à observer sur un diaphragme de champ de diamètre 1,17 mm. Ce diaphragme définit sur l'objet une surface de 1 cm^2 environ. Le signal au niveau de la fente de sortie du monochromateur est détecté par un tube photomultiplicateur (PMT), référencé R928 de Hamamatsu (contenu dans un boitier ORIEL 70680), dont la sensibilité est représentée sur la figure 3.7. Ce PMT est alimenté par une haute tension constante de 900 V.

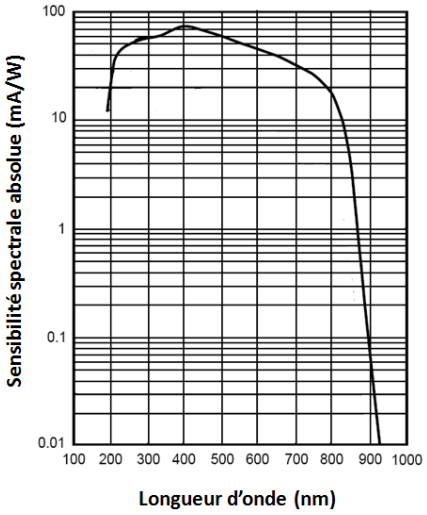


Fig. 3.7. - Sensibilité spectrale absolue du tube photomultiplicateur R928 de Hamamatsu [HAM].

Le courant généré par le PMT est ensuite amplifié, converti en tension. La grandeur de sortie est exprimée comme un courant I_λ, sachant que les mesures ont toutes été effectuées avec le même gain du convertisseur courant-tension de 100 nA/V. Le courant délivré par le PMT est au maximum égal à 80 nA. Un convertisseur analogique numérique permet l'acquisition de données par logiciel informatique grâce à une interface GPIB/USB de National Instruments.

Les fentes d'entrée et de sortie ont une hauteur fixe de 20 mm et leur largeur est réglable de 10 µm à 8 mm. Dans le cadre de nos mesures, la largeur des fentes d'entrée et de sortie est fixée à 0,4 mm de façon à obtenir une largeur de bande de la fonction de transfert de 1 nm. Le choix de cette largeur de bande répond à un compromis entre la résolution du monochromateur et le niveau de signal détectable avec un gain du convertisseur courant-tension linéaire.

La résolution du moteur pas à pas assurant la rotation du réseau permet des déplacements en longueur d'onde d'une valeur minimum de 0,075 nm.

1.1.3. Etalonnage du spectroradiomètre

Afin de raccorder au Système international d'unités les mesures spectrales relatives effectuées sur les éclairages à LED, le spectroradiomètre a été étalonné, dans un premier temps en longueur d'onde, puis dans un second temps en sensibilité spectrale relative par l'intermédiaire de mesures de luminance.

1.1.3.1. Etalonnage en longueur d'onde

Le spectroradiomètre a été étalonné en longueur d'onde à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure basse pression ORIEL, placée à l'intérieur de la cabine (fig. 3.8), pour les raies d'émission à 365,02 nm, 404,66 nm, 435,83 nm, 546,07 nm, 576,96 nm et 579,07 nm [REA 96]. Le positionnement de la lampe dans la cabine permet d'effectuer un étalonnage dans les conditions de mesure sur les éclairages à LED.

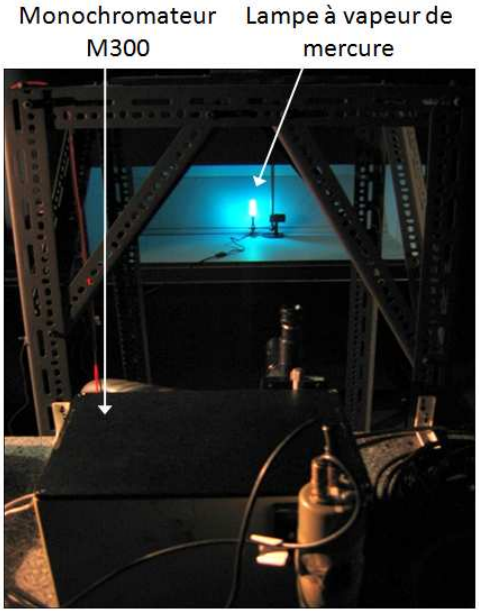


Fig. 3.8. - Etalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre Bentham.

La fonction de transfert du spectroradiomètre a été tracée pour chacune des raies de la lampe. La longueur d'onde mesurée est celle donnée par le spectroradiomètre qui correspond au centre de cette fonction de transfert. Dans notre cas, ce centre est considéré comme étant la projection de

l'intersection des deux droites ajustées sur les flancs de la fonction de transfert (fig. 3.9). Ensuite pour chacune des raies cette valeur mesurée est comparée à la valeur théorique.

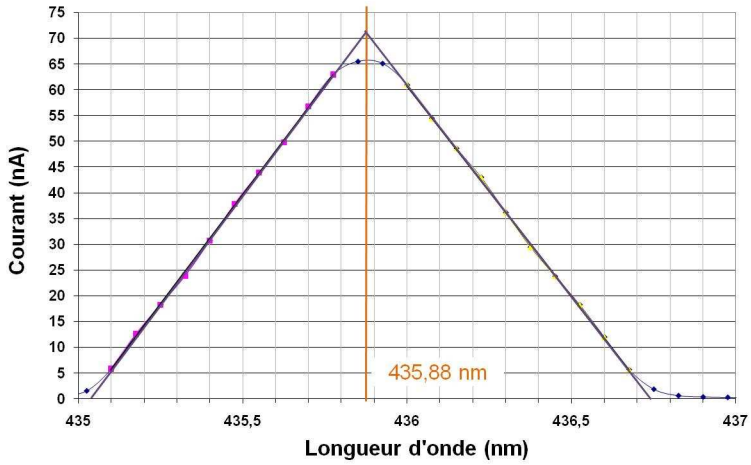


Fig. 3.9. - Exemple de fonction de transfert tracée avec la lampe à vapeur de mercure pour la raie théorique à 435,83 nm.

1.1.3.2. Etalonnage en sensibilité spectrale

La sensibilité spectrale du spectroradiomètre S_λ est déterminée comme étant le rapport entre le courant de sortie du photomultiplicateur et la luminance énergétique spectrique reçue par le spectroradiomètre. Cette luminance est celle renvoyée par un étalon blanc de réflexion diffuse éclairé par une lampe tungstène halogène de référence étalonnée à l'INM [ROU 06] en éclairement énergétique spectrique relatif, normé à 1 pour la longueur d'onde de 550 nm.

La lampe de référence utilisée est une lampe 24 V - 10 A, de marque USHIO (type JC24V - 250W EHJ), dont l'éclairement est stable dans le temps (de l'ordre de 10^{-3} en relatif sur une journée), très homogène sur la surface mesurée, et de valeur comparable à celle mesurée pour les éclairages à LED. Cette lampe est montée dans une lanterne conçue spécifiquement afin de pouvoir maîtriser l'orientation du flux émis tout en permettant une dissipation appropriée de la chaleur produite (fig. 3.10).



Fig. 3.10. - A gauche : vue de l'intérieur de la lanterne contenant la lampe tungstène halogène de référence. A droite : lampe en fonctionnement sur son support.

La figure 3.11 présente le résultat de l'étalonnage en éclairement énergétique relatif de la lampe de référence, montée dans sa lanterne.

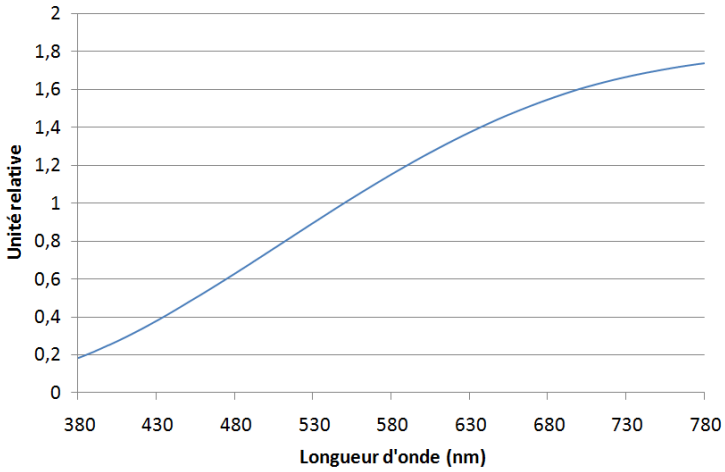


Fig. 3.11. - Résultat de l'étalonnage de la lampe tungstène halogène en éclairement énergétique spectrique relatif [ROU 08].

Cette lampe est alimentée par une source de courant continu stabilisée, de marque DRUSCH (référencée 4218 N667), de 60 V - 20 A qui est refroidie par air. Après stabilisation thermique de l'alimentation, soit 1h30 après sa mise en route, la stabilité relative du courant électrique délivré a été mesurée sur une période de trois heures pour un courant moyen de 10 A. Cette stabilité est égale à quelques 10^{-6}.

L'étalon blanc de réflexion diffuse est positionné en incidence normale par rapport au plan d'éclairage de la lampe et à 45° par rapport au plan du spectroradiomètre, symbolisé par le plan perpendiculaire à l'axe optique du téléobjectif (fig. 3.12). Nous avons choisi d'incliner la cabine à 45° plutôt que le spectroradiomètre pour des raisons de commodité. Le choix de ces conditions géométriques de mesure suit les recommandations de la CIE [CIE 04a] et permet notamment de s'affranchir de la réflexion spéculaire relatif au brillant de l'échantillon.

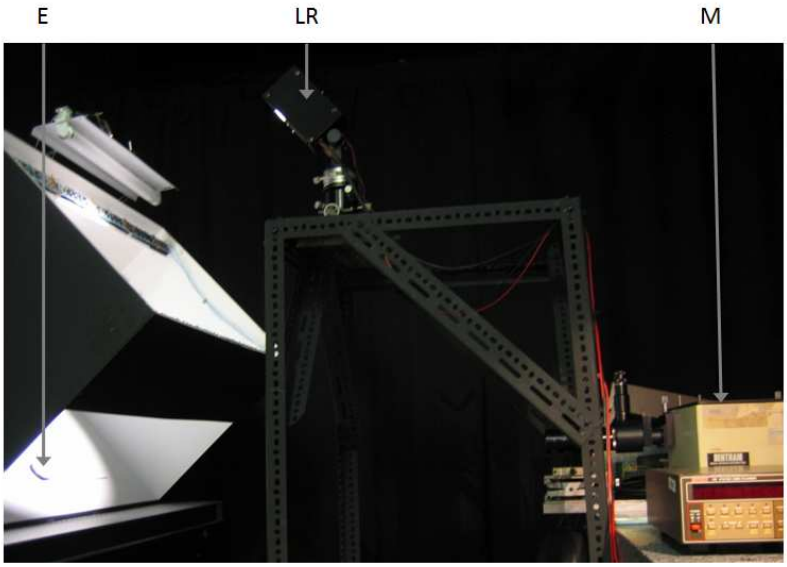


Fig. 3.12. - Etalonnage en sensibilité spectrale relative du spectroradiomètre.
E : étalon blanc de réflexion diffuse, LR : lampe tungstène halogène de référence, M : monochromateur M300.

Cet étalon réfléchit la lumière incidente avec un facteur de réflexion ρ_λ. Le facteur de réflexion moyen, sur le domaine spectral 380-780 nm est de 0,988 avec des variations comprises entre 0,987 et 0,989.

La luminance énergétique spectrique réfléchie par l'étalon L_λ^S est mesurée par le PMT, par pas de 1 nm, dans le domaine spectral 380-780 nm. Cette luminance convertie par le spectroradiomètre, de sensibilité spectrale S_λ, en courant I_λ^S (représenté sur la figure 3.13), est donnée par l'expression suivante :

$$L_\lambda^S = \frac{I_\lambda^S}{S_\lambda} \tag{3.1}$$

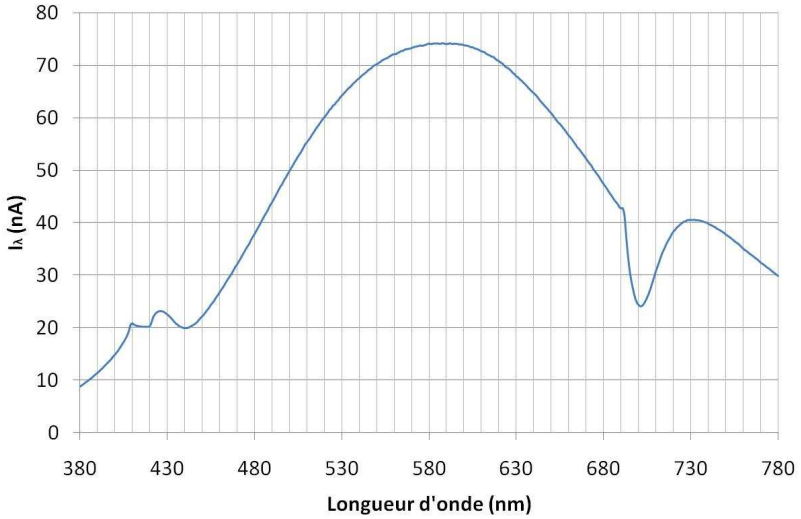


Fig. 3.13. - Courant I_λ^S mesuré par le PMT lors de l'étalonnage en sensibilité spectrale relative du spectroradiomètre.

Les zones de la figure 3.13 comprises entre 410 et 450 nm, et entre 690 et 750 nm, sont des variations spectrales brutales qui sont liées aux changements de sensibilité du réseau de diffraction en fonction de la polarisation du rayonnement incident [PAL 02]. Ce phénomène avait déjà été observé par Stéphane Pefferkorn et Françoise Viénot du Muséum national d'histoire naturelle, l'ancien propriétaire du spectroradiomètre Bentham [PEF 93].
La décroissance visible à partir de 600 nm environ, est due à une diminution de la sensibilité du photomultiplicateur (fig. 3.7) beaucoup plus importante que l'augmentation naturelle du spectre de la lampe tungstène halogène qui est très proche de celui de l'illuminant A (fig. 3.11).

L'offset I_{off}, généré par le courant d'obscurité du PMT et par l'amplificateur de courant du spectroradiomètre, est constant sur le domaine spectral 380-780 nm, de l'ordre de 2 nA, avec une incertitude-type de 2 pA pour le calibre de 100 nA/V. Ce courant d'offset est ensuite soustrait, pour chaque longueur d'onde, aux valeurs de courant I_λ^S. L'expression de la luminance devient :

$$L_\lambda^S = \frac{I_\lambda^S - I_{off}}{S_\lambda} \tag{3.2}$$

Considérons l'élément *A* comme étant la surface délimitée, par le spectroradiomètre, sur l'étalon blanc de réflexion diffuse. L'exitance de cette surface est égale à l'éclairement émis par la lampe de

référence E_λ, multiplié par le facteur de réflexion ρ_λ de l'étalon de blanc. Si l'on considère que l'étalon a une distribution lambertienne (luminance uniforme dans le demi espace (fig. 2.14)), alors la luminance énergétique réfléchie par l'étalon est donnée par :

$$L_\lambda^S = \frac{E_\lambda . \rho_\lambda}{\pi} = \frac{I_\lambda^S - I_{off}}{S_\lambda} \tag{3.3}$$

L'expression de la sensibilité spectrale du monochromateur est ensuite déduite à partir de la relation précédente :

$$S_\lambda = \frac{\left(I_\lambda^S - I_{off}\right).\pi}{E_\lambda . \rho_\lambda} \tag{3.4}$$

L'analyse des spectres des éclairages à LED à étudier étant faite en relatif, la sensibilité spectrale relative a été déterminée en utilisant l'éclairement spectrique relatif de la lampe de référence $E_{rel,\lambda}$, normé à 1 pour la longueur d'onde de 550 nm. La sensibilité spectrale relative s'écrit alors par :

$$S_{rel,\lambda} = \frac{S_\lambda}{S_{550}} = \frac{\left(I_\lambda^S - I_{off}\right).\pi}{E_\lambda . \rho_\lambda} \frac{E_{550} . \rho_{550}}{\left(I_{550}^S - I_{off}\right).\pi} = \frac{1}{E_{rel,\lambda}} . \left(\frac{I_\lambda^S - I_{off}}{I_{550}^S - I_{off}} \right) . \frac{\rho_{550}}{\rho_\lambda} \tag{3.5}$$

1.2. Mesures spectrales sur les LED : résultats et incertitudes

Pour effectuer des mesures spectrales sur les éclairages à LED, une des cinq sources d'éclairage, montée dans la cabine à lumière, est alimentée avec un courant continu de 350 mA. L'éclairage produit, illumine l'étalon blanc de facteur de réflexion ρ_λ, positionné en incidence normale par rapport au plan d'éclairage des sources, et à 45° par rapport à l'axe optique du spectroradiomètre. La luminance énergétique spectrique réfléchie par l'étalon L'_λ, est mesurée par le PMT, par pas de 1 nm, dans la zone spectrale 380-780 nm. La mesure du courant électrique I_λ^{LED}, généré par le PMT, auquel est soustrait, pour chaque longueur d'onde, le courant d'offset I_{off}, est ensuite effectuée pour obtenir l'expression :

$$L'_\lambda = \frac{\left(I_\lambda^{LED} - I_{off}\right)}{S_\lambda} \tag{3.6}$$

Une normalisation à 550 nm de l'expression (3.6) est réalisée :

$$L'_{rel,\lambda} = \left(\frac{I_\lambda^{LED} - I_{off}}{I_{550}^{LED} - I_{off}} \right) . \frac{1}{S_{rel,\lambda}} \tag{3.7}$$

En remplaçant l'expression (3.5) dans la (3.7) il en résulte :

$$L'_{rel,\lambda} = \left(\frac{I_\lambda^{LED} - I_{off}}{I_{550}^{LED} - I_{off}} \right) . \frac{E_{rel,\lambda}}{\left(\frac{I_\lambda^S - I_{off}}{I_{550}^S - I_{off}} \right)} . \frac{\rho_\lambda}{\rho_{550}} \tag{3.8}$$

Le rapport entre ρ_λ et ρ_{550} se simplifie dans l'équation (3.8) car nous faisons l'hypothèse que ce facteur de réflexion est constant et égal à 1 sur l'ensemble du domaine visible.

Afin d'obtenir une luminance énergétique spectrique $L^{LED}_{rel,\lambda}$, normée à 1 à la longueur d'onde associée à la valeur maximale de luminance $L'_{rel,\lambda}$, une dernière normalisation est effectuée :

$$L^{LED}_{rel,\lambda} = \frac{L'_{rel,\lambda}}{\left(L'_{rel,\lambda}\right)_{max}} \tag{3.9}$$

1.2.1. Spectres de LED

A partir des mesures de luminance effectuées avec le spectroradiomètre Bentham, nous obtenons les répartitions spectrales des éclairages à LED 1 et 2, qui sont représentées sur la figure 3.14, et celles des sources 3, 4 et 5 sur la figure 3.15. Les températures de couleur proximale moyennes sont respectivement pour les deux éclairages 1 et 2 de type blanc froid, de 5930 K et 6100 K, et pour les trois éclairages 3, 4 et 5 de type blanc chaud, elles sont de 3500 K, 2850 K et 3030 K.

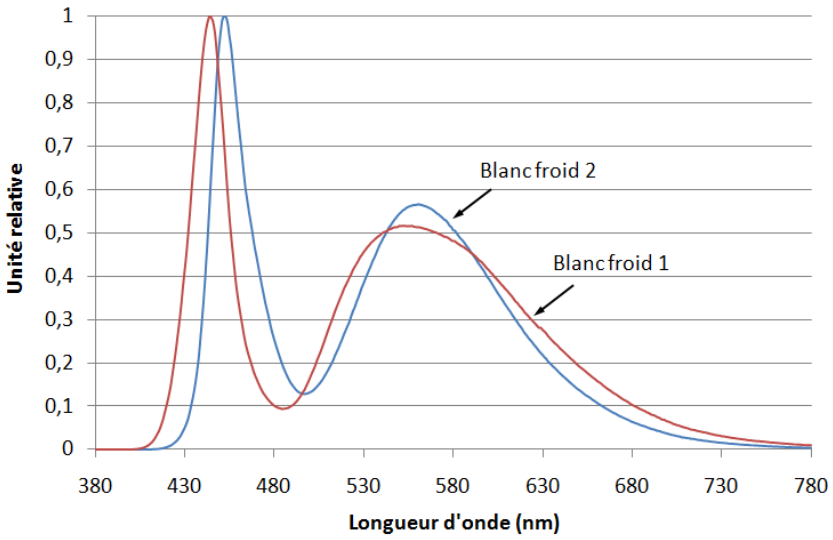


Fig. 3.14. - Spectres des éclairages à LED de type blanc froid, montés dans la partie supérieure de la cabine à lumière de l'INM.

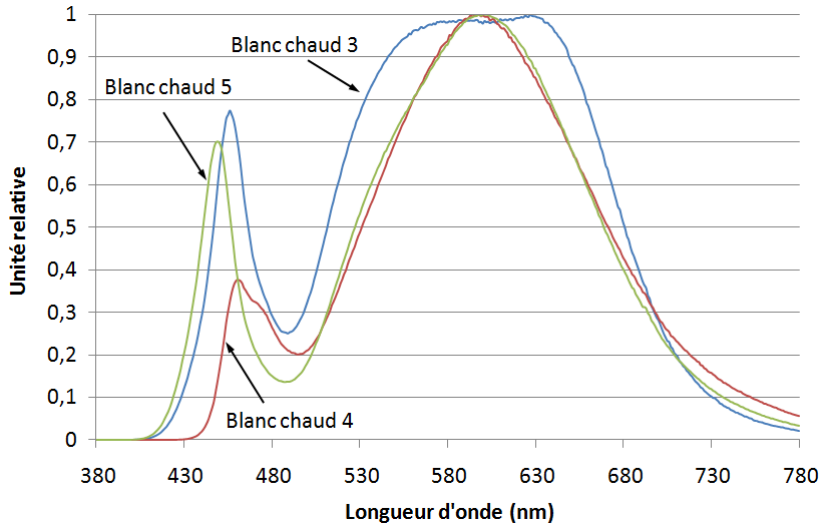


Fig. 3.15. - Spectres des éclairages à LED de type blanc chaud, montés dans la partie supérieure de la cabine à lumière de l'INM.

1.2.3. Analyse des incertitudes : méthode Monte Carlo

Dans le processus d'évaluation des incertitudes de mesures, l'incertitude-type de chacune des composantes intervenant dans l'incertitude-type composée finale doit être estimée, de façon la plus fine et exhaustive possible.

Actuellement, il existe trois méthodes pour le calcul de l'incertitude. La première, qui est la plus répandue, est celle qui utilise la loi de propagation de l'incertitude [GUM 95]. La seconde, repose sur des mesures de reproductibilité lorsqu'il n'est pas possible de déterminer une expression analytique entre le mesurande et les grandeurs d'entrée [ISO 94]. Enfin, la troisième repose sur une méthode de type Monte Carlo qui consiste à obtenir la distribution de la grandeur de sortie à partir de la propagation des distributions des grandeurs d'entrée [GUM 08].

1.2.3.1. Principe de la méthode

La méthode de Monte Carlo est une technique de simulation numérique permettant de trouver des solutions à des problèmes mathématiques par la génération de variables aléatoires respectant diverses lois de distribution.

Cette méthode a été formalisée par Nicholas Métropolis (1915-1999) et Stanislaw Ulam (1909-1984), en 1949 [MET 49]. Son nom a été donné en référence aux jeux de hasard que l'on pouvait pratiquer dans les casinos à cette époque, à Monte Carlo dans la principauté de Monaco.

Pour la mise en pratique de cette technique, les recommandations du supplément 1 « Propagation of distributions using a Monte Carlo method » du Guide pour l'expression des incertitudes de mesures [GUM 08], qui introduit l'utilisation de la méthode Monte Carlo appliquée aux calculs d'incertitudes en complément de la loi de propagation des incertitudes de mesures [GUM 95], ont été suivies.

Cette méthode nécessite que le mesurande soit décrit par un modèle mathématique reliant une grandeur de sortie à diverses grandeurs d'entrée. Pour chacune de ces grandeurs d'entrée, une loi de distribution sera choisie et le résultat final donnera la distribution de la grandeur de sortie accompagnée de sa valeur moyenne et de son écart-type.

1.2.3.2. Causes d'erreurs et incertitudes

Les causes d'erreurs liées aux mesures spectrales relatives sont listées ci-dessous. Pour chacune de ces causes d'erreur est associée une grandeur *C*, dont l'incertitude est *u(C)*. La valeur de *C* est nulle en valeur moyenne (car les corrections ont été effectuées au préalable) et sans unité (car c'est une grandeur relative).

- Erreur due à l'étalonnage de la lampe tungstène halogène de référence : $C_{\lambda}^{E_{\text{rel},\lambda}}$, $u\left(C_{\lambda}^{E_{\text{rel},\lambda}}\right)$;
- Erreur due à l'étalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre : $C_{\lambda}^{\text{lambda}}$, $u\left(C_{\lambda}^{\text{lambda}}\right)$;
- Erreur due à la largeur de bande spectrale du monochromateur : $C_{\lambda}^{\Delta\lambda}$, $u\left(C_{\lambda}^{\Delta\lambda}\right)$;
- Erreur due au phénomène de diffusion dans le monochromateur : $C_{\lambda}^{\text{diff}}$, $u\left(C_{\lambda}^{\text{diff}}\right)$;
- Erreur due à la non linéarité du photomultiplicateur : C_{λ}^{PMT} , $u\left(C_{\lambda}^{\text{PMT}}\right)$;
- Erreur de répétabilité et de reproductibilité des mesures sur les éclairages à LED et la lampe de référence (incluant l'erreur sur le positionnement de la lampe de référence, l'erreur due à la stabilité de l'alimentation du photomultiplicateur et l'erreur due à la stabilité, à court terme, du montage expérimental) : C_{λ}^{rep} , $u\left(C_{\lambda}^{\text{rep}}\right)$;

- Erreur sur la mesure du courant d'offset I_{off} du spectroradiomètre, qui est considérée comme négligeable : $C^{I_{off}}$, $u\left(C^{I_{off}}\right)$.

Dans le calcul des incertitudes des paramètres colorimétriques, les termes de covariances entre les erreurs *C*, associées à différentes longueurs d'onde λ_1, λ_2, λ_3,… sont égaux à :

$$\begin{aligned} u(C_{\lambda_1},C_{\lambda_2}) &= \rho^C_{\lambda_1,\lambda_2}.u(C_{\lambda_1}).u(C_{\lambda_2}) \\ u(C_{\lambda_2},C_{\lambda_3}) &= \rho^C_{\lambda_2,\lambda_3}.u(C_{\lambda_2}).u(C_{\lambda_3}) \\ u(C_{\lambda_1},C_{\lambda_3}) &= \rho^C_{\lambda_1,\lambda_3}.u(C_{\lambda_1}).u(C_{\lambda_3}) \\ &\ldots \end{aligned} \qquad (3.10)$$

avec :

- ρ^C , le coefficient de corrélation.

Dans le cas où on ne connait pas l'effet du paramètre corrélant, on ne peut pas calculer ces corrélations mais on peut envisager d'évaluer l'impact maximal sur l'incertitude des paramètres colorimétriques en faisant varier la valeur de ρ^C entre -1 et +1 pour chaque paire de longueurs d'onde.

Dans d'autres cas, les coefficients ρ^C sont, soit calculés d'après un modèle physique, soit mesurés. Lors de l'analyse des composantes d'erreur, présentée dans les paragraphes suivants, l'effet de cette corrélation a pu être mis en évidence grâce à des simulations basées sur la connaissance des phénomènes physiques.

1.2.3.3. Expression analytique entre grandeurs

La relation fonctionnelle entre la luminance relative $L'_{rel,\lambda}$, et les différentes grandeurs d'entrée est obtenue à partir de la relation (3.8), et s'exprime par :

$$L'_{rel,\lambda} = \left[\begin{array}{l} \left(\left(\frac{I_\lambda^{LED} - I_{off}}{I_{550}^{LED} - I_{off}} \right) + C_\lambda^{LED,rep} + C_\lambda^{LED,lambda} + C_\lambda^{LED,\Delta E} + C_\lambda^{LED,PMT} + C_\lambda^{LED,diff} \right) * \ldots \\ \ldots * \left[\frac{E_{rel,\lambda} + C_\lambda^{E_{rel,\lambda}}}{\left(\left(\frac{I_\lambda^S - I_{off}}{I_{550}^S - I_{off}} \right) + C_\lambda^{S,rep} + C_\lambda^{S,lambda} + C_\lambda^{S,\Delta,} + C_\lambda^{S,PMT} + C_\lambda^{S,diff} \right)} \right] \end{array} \right] \qquad (3.11)$$

Pour pouvoir effectuer la simulation Monte Carlo à partir de l'expression mathématique (3.11), des lois de distribution doivent être assignées à chacune des causes d'erreur.

1.2.3.4. Attribution d'une fonction de densité de probabilité à chaque cause d'erreur

Ce paragraphe décrit les méthodes d'évaluation des incertitudes liées aux différentes sources d'erreur listées précédemment. A chacune d'entre elles, est associée une loi de distribution en accord avec l'interprétation physique des phénomènes observés. Les effets des corrélations, d'une part, entre longueurs d'onde et, d'autre part, entre les mesures de luminance effectuées sur les éclairages à LED et la lampe tungstène halogène de référence, sont abordés.

Erreur de répétabilité et de reproductibilité des mesures spectrales

Pour l'étalonnage en sensibilité spectrale relative du spectroradiomètre, des mesures sur la lampe halogène de référence, dans des conditions de reproductibilité, ont été effectuées.
La dispersion de reproductibilité, pour chaque longueur d'onde, a été estimée pour la lampe de référence en éclairement, à partir de deux mesures de spectre, m_1 et m_2, réalisées à plusieurs mois d'intervalles. Pour chaque longueur d'onde, l'écart entre les deux rapports $\left(\frac{I_\lambda^S - I_{off}}{I_{550}^S - I_{off}}\right)$ effectués sur les deux spectres a été calculé : $\left|\left(\frac{I_\lambda^S - I_{off}}{I_{550}^S - I_{off}}\right)(m_1) - \left(\frac{I_\lambda^S - I_{off}}{I_{550}^S - I_{off}}\right)(m_2)\right|$. L'écart-type expérimental associé à cette dispersion est égal à la différence entre les deux mesures, m_1 et m_2, divisé par √2.
Une distribution gaussienne avec un écart-type égal à un donne un niveau de confiance de 68%. Dans le but d'estimer l'incertitude-type de mesure avec le même niveau de confiance, l'écart-type expérimental est multiplié par un facteur d'élargissement égal à 1,84. Ce facteur est obtenu à partir d'une loi de Student pour un degré de liberté égal à un.
Ceci conduit à avoir une incertitude-type égale à 1,27 (1,84/√2) fois la différence entre les deux mesures m_1 et m_2, pour chaque longueur d'onde. Pour information, l'écart moyen, sur l'ensemble des longueurs d'onde, est égal à 0,0029.

Pour les éclairages à LED, la répétabilité des mesures dépend essentiellement du type de source étudié. En général, pour des spectres de sources étroits ou pour des sources qui ont des spectres évoluant en longueur d'onde avec de fortes pentes, la répétabilité sera dégradée par rapport à une source dont le spectre a des pentes moins fortes. La répétabilité est donc fonction de la longueur d'onde pour un spectre de source donné. Cette incertitude a été choisie égale aux écarts calculés, à chaque longueur d'onde, entre deux spectres relatifs mesurés en début (à l'instant t_1) et en fin de journée (à l'instant t_2) pour chacune des sources d'éclairage à LED : $\left|\left(\frac{I_\lambda^{LED} - I_{off}}{I_{550}^{LED} - I_{off}}\right)(t_1) - \left(\frac{I_\lambda^{LED} - I_{off}}{I_{550}^{LED} - I_{off}}\right)(t_2)\right|$.
Pour information, les moyennes de ces écarts mesurés pour les cinq éclairages, sur l'ensemble des longueurs d'onde, sont comprises entre 0,0010 et 0,0021. Les histogrammes des écarts calculés permettent d'associer aux grandeurs d'entrée $C_\lambda^{S,rep}$ et $C_\lambda^{LED,rep}$ une loi de distribution gaussienne. La figure 3.16 donne un exemple d'histogramme obtenu.

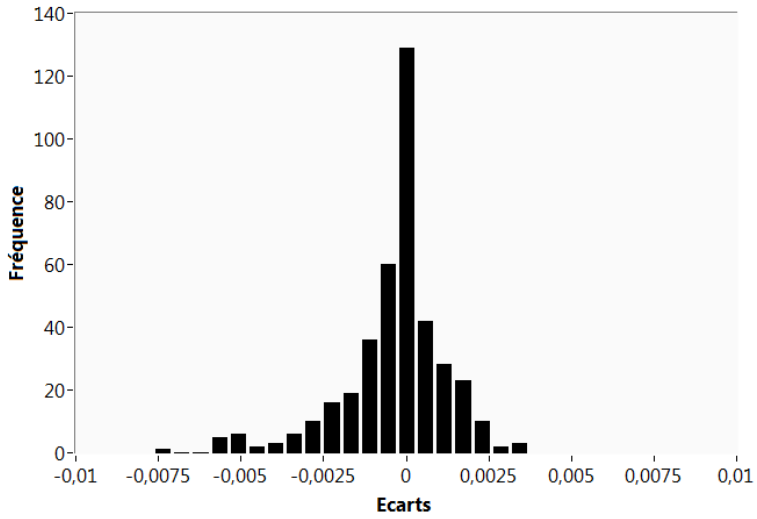


Fig. 3.16. - Histogramme des écarts de répétabilité calculés pour l'éclairage à LED blanc chaud 3.

Erreur sur la mesure du courant d'offset I_{off} du spectroradiomètre

L'offset I_{off}, comprend le courant d'obscurité du PMT ainsi que l'offset de l'amplificateur de courant, qui dépend du gain. Dans le cadre des mesures effectuées, un gain unique de l'amplificateur est utilisé. Il a été choisi pour être bien adapté à l'ensemble de nos sources d'éclairement. L'incertitude-type estimée sur la mesure de I_{off} est de 2 pA et correspond à la reproductibilité à long terme sur plusieurs jours. La valeur moyenne de I_λ est de 40 nA (valeur maximale de 80 nA) avec une incertitude-type relative maximale de mesure de 1,4%, soit 0,56 nA. L'incertitude de I_{off} sur le rapport $\left(\frac{I_\lambda^S - I_{off}}{I_{550}^S - I_{off}}\right)$ est donc négligeable.

Erreur sur l'étalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre

L'étalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre a été réalisé sur six raies d'émission d'une lampe à vapeur de mercure basse pression. D'après les mesures effectuées, le plus grand écart entre la longueur d'onde théorique d'une raie de la lampe à vapeur de mercure, et celle affichée par le spectroradiomètre, est de 0,25 nm (tab. 3.1). Des mesures de répétabilité ont montré que l'écart-type de dispersion des écarts est égal à 0,07 nm. L'erreur maximale est donc égale à 0,32 nm.

Longueur d'onde théorique (en nm)	**Longueur d'onde mesurée (en nm)**	**Ecart (en nm)**
365,02	364,90	- 0,12
404,66	*404,41*	*- 0,25*
435,83	435,72	- 0,11
546,07	546,03	- 0,04
576,96	577,02	+ 0,06
579,07	579,01	- 0,06

Tab. 3.1. - Ecarts entre les longueurs d'onde théoriques de raies d'émission d'une lampe à vapeur de mercure et les longueurs d'onde mesurées.

Une loi de distribution rectangulaire a été choisie en faisant l'hypothèse que l'erreur a la même probabilité d'être comprise dans l'intervalle [- *a* ; + *a*] où *a* est la demi-étendue qui est égale à 0,32 nm. L'incertitude-type associée est donc égale à 0,18 nm (0,32/√3).
Pour estimer l'influence sur les valeurs spectrales d'un décalage en longueur d'onde de 0,18 nm, un spectre décalé de 0,18 nm a été calculé par interpolation linéaire pour chaque type de source à LED, ainsi que pour la lampe tungstène halogène de référence. L'incertitude a été choisie égale aux écarts calculés entre les spectres avant et après le décalage de 0,18 nm, pour chaque longueur d'onde : $\left|\left(\frac{I_\lambda - I_{off}}{I_{550} - I_{off}}\right)(\lambda) - \left(\frac{I_\lambda - I_{off}}{I_{550} - I_{off}}\right)(\lambda + 0{,}18\ \text{nm})\right|$.
Pour information, l'écart moyen pour la lampe de référence, sur l'ensemble des longueurs d'onde, est de 0,0010. Pour les éclairages à LED, les écarts moyens, sur l'ensemble des longueurs d'onde, sont compris entre 0,0010 et 0,0015.
Une loi de distribution rectangulaire est associée aux grandeurs d'entrée $C_\lambda^{S,lambda}$ et $C_\lambda^{LED,lambda}$.

L'observation des erreurs, liées à l'étalonnage en longueurs d'onde du spectroradiomètre, montre qu'elles sont, pour une large part, aléatoires. Par conséquent, l'estimation de l'incertitude sans corrélation inter longueur d'onde est justifiée, de même qu'il n'apparaît pas de corrélation entre les mesures effectuées sur les éclairages à LED et la lampe halogène. L'incertitude attribuée à cette composante est celle évaluée précédemment.

Cependant, afin d'évaluer l'effet d'éventuelles corrélations entre longueurs d'onde, les paramètres colorimétriques ont été calculés d'après des simulations sur les spectres, avec et sans prise en compte des erreurs sur l'étalonnage en longueur d'onde. Quatre modèles ont été utilisés pour représenter ces erreurs. Le premier correspond à une erreur constante, le second à une régression de type polynomiale basée sur les erreurs mesurées sur six raies de la lampe à vapeur de mercure, le troisième et le quatrième correspondent respectivement à une variation linéaire et sinusoïdale des erreurs. Pour chacun de ces modèles, l'amplitude maximale de l'erreur est d'environ 0,18 nm (fig. 3.17).

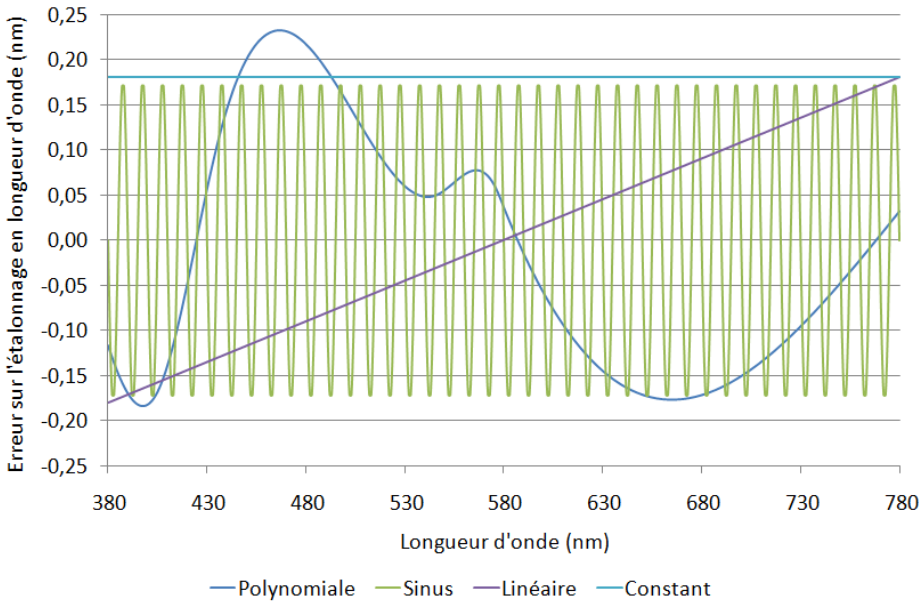


Fig. 3.17. - Modélisations de l'erreur sur l'étalonnage en longueur d'onde du monochromateur.

Les écarts observés sur les paramètres colorimétriques, qui prennent en compte les corrélations, sont très variables suivant le modèle mis en œuvre. Comparé à l'incertitude spécifique, c'est-à-dire, celle calculée par simulation Monte Carlo en annulant l'incertitude sur toutes les autres composantes d'erreur, les écarts sont, soit nuls (modèle sinusoïdal), soit exacerbés (régression de type polynomiale). De ce fait, l'estimation des incertitudes sans connaissance précise du modèle des corrélations conduit, bien évidemment, soit à une surestimation, soit à une sous-estimation, des incertitudes.

Erreur liée à la largeur de bande du monochromateur

Le courant mesuré I_λ, est proportionnel au résultat d'un produit de convolution entre la valeur vraie du spectre de la source étudiée et la fonction de transfert du monochromateur.

Afin de quantifier au mieux l'incertitude sur l'effet de la largeur à mi hauteur de la fonction de transfert, des comparaisons entre des simulations et des mesures de spectres ont été effectuées. Notre monochromateur ayant deux fentes de largeur égale, une fonction de transfert triangulaire et symétrique semble être un bon modèle d'approximation. Ceci a été vérifié en effectuant des mesures de plusieurs raies spectrales de la lampe à vapeur de mercure. La forme triangulaire a été confirmée pour des largeurs de bande de 1 à 14 nm. Pour une largeur de bande de valeur nominale égale à 1 nm, une variation de 1,07 à 1,22 nm, entre 365 et 580 nm, a été observée. Notre modèle utilise, quant à lui, une largeur de bande constante. Cependant, la comparaison du modèle avec les mesures spectrales montre une bonne adéquation tant que la largeur de bande ne dépasse pas 8 nm

(§ 2.2. Fonction de transfert du monochromateur). Nous utiliserons donc ce modèle pour nos simulations de convolution.
Afin de quantifier l'incertitude, les écarts entre les spectres avant et après convolution avec une fonction de transfert de largeur à mi hauteur de 1 nm ont été calculés, à chaque longueur d'onde :

$$\left|\left(\frac{I_\lambda - I_{off}}{I_{550} - I_{off}}\right)(\Delta\lambda = 1\ \text{nm}) - \left(\frac{I_\lambda - I_{off}}{I_{550} - I_{off}}\right)\right|.$$

Pour information, l'écart moyen pour la lampe de référence, sur l'ensemble des longueurs d'onde, est de 0,0001. Pour les éclairages à LED, les écarts moyens, sur l'ensemble des longueurs d'onde, sont compris entre 0,0002 et 0,0006.
Nous n'appliquons pas de corrections à l'effet de convolution mais nous considérons ces écarts comme étant l'incertitude.
Les histogrammes des écarts calculés permettent d'associer aux grandeurs d'entrée $C_\lambda^{S,\Delta\lambda}$ et $C_\lambda^{LED,\Delta\lambda}$ une loi de distribution gaussienne. La figure 3.18 donne un exemple d'histogramme obtenu.

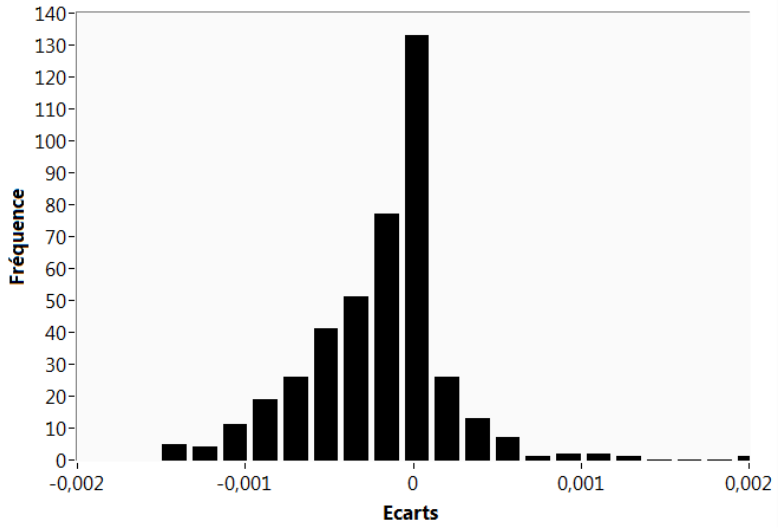


Fig. 3.18. - Histogramme des écarts dus à la largeur de bande, calculés pour l'éclairage à LED blanc chaud 5.

Afin d'évaluer l'effet des corrélations entre longueurs d'onde, qui n'a pas été pris en compte précédemment, les paramètres colorimétriques ont été calculés à partir des spectres des éclairages à LED avant et après une simulation de convolution avec une fonction de transfert de largeur de bande de 2 nm. Ceci dans le but d'amplifier les effets des corrélations qui sont trop faibles pour être observés avec une largeur de bande de 1 nm.
Pour les éclairages blancs chauds, les variations - qui prennent en compte les corrélations - des coordonnées chromatiques, de la température de couleur proximale et des indices de rendu des couleurs sont inférieures respectivement à 2 x 10^{-5}, 0,3 K et à 0,03. Pour les blancs froids, les variations sont un peu supérieures. En comparaison, les incertitudes spécifiques, c'est-à-dire, celles calculées par simulation Monte Carlo en annulant l'incertitude sur toutes les autres causes d'erreur, sont supérieures aux variations sur les paramètres colorimétriques. Par conséquent, les effets de corrélation sont significatifs et leur prise en compte permettrait de diminuer l'incertitude associée à ce paramètre.

Les variations spectrales relatives dues à la largeur de bande pour les mesures sur la lampe halogène de référence sont inférieures d'un facteur 10 environ à celles pour les mesures sur les éclairages à LED. Par conséquent, leur effet est négligé et nous considérons que les corrélations entre les mesures sur la lampe halogène et les éclairages à LED sont nulles.

Erreur liée à la non linéarité du tube photomultiplicateur

L'étalonnage en linéarité du PMT est réalisé à l'INM sur un banc dont le principe repose sur une méthode d'addition de flux [LEC 96]. Ce banc a récemment été complété avec l'utilisation de sources à base de LED permettant ainsi, d'atteindre de très bas niveaux de flux [GED 09]. Pour des courants de sortie du photomultiplicateur compris entre 8 et 95 nA, il est considéré comme linéaire avec une incertitude-type relative associée de 1% (fig. 3.19).

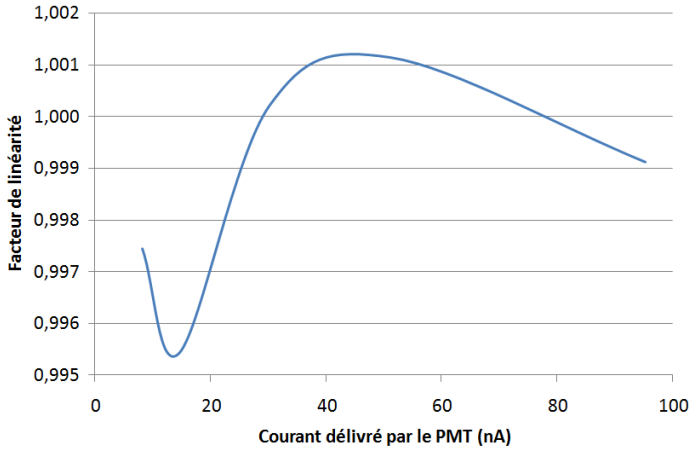


Fig. 3.19. - Facteur de linéarité en fonction du courant délivré par le PMT R928. [GED 08].

Afin d'estimer l'impact de cette non linéarité du détecteur sur les mesures spectrales, les écarts entre les spectres avant et après multiplication par un facteur de linéarité F_{I_λ} égal à 1,01, ont été calculés, pour chaque longueur d'onde : $\left|\left(\frac{I_\lambda - I_{off}}{I_{550} - I_{off}}\right).F_{I_\lambda} - \left(\frac{I_\lambda - I_{off}}{I_{550} - I_{off}}\right)\right|$.

Pour information, l'écart moyen pour la lampe de référence, sur l'ensemble des longueurs d'onde, est de 0,0012. Pour les éclairages à LED, les écarts moyens, sur l'ensemble des longueurs d'onde, sont compris entre 0,0029 et 0,0041.

Les histogrammes des écarts calculés permettent d'associer aux grandeurs d'entrée $C_\lambda^{S,PMT}$ et $C_\lambda^{LED,PMT}$ une loi de distribution rectangulaire. La figure 3.20 donne un exemple d'histogramme obtenu.

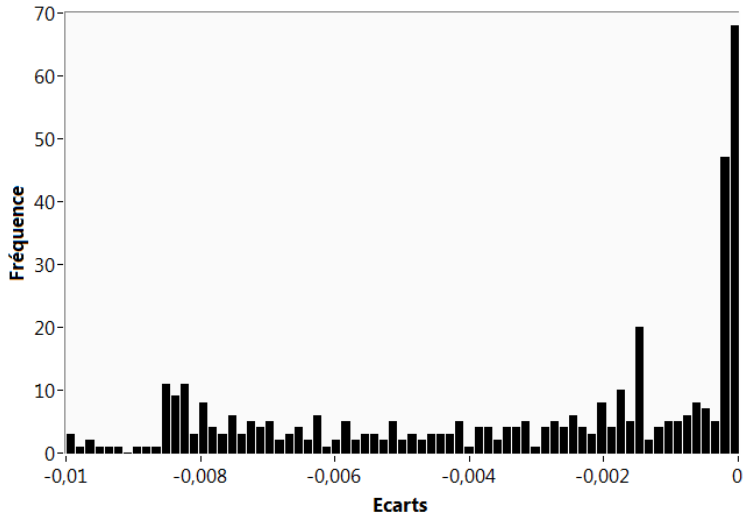


Fig. 3.20. - Histogramme des écarts dus à la non linéarité calculés pour l'éclairage à LED blanc froid 1.

La non linéarité introduit une corrélation entre les mesures de luminance sur les éclairages à LED et la lampe de référence. D'autre part, la non linéarité introduit une corrélation entre les mesures de même niveaux de luminance. La luminance étant variable en fonction de la longueur d'onde, une corrélation entre niveaux de luminance induit une corrélation entre longueurs d'onde. Or, la mesure de la non linéarité du photomultiplicateur ne montre aucune tendance quel que soit le niveau de luminance. Il n'y a donc pas de corrélations entre les mesures à différentes longueurs d'onde. Suivant cette même constatation il n'y a pas de corrélation entre les mesures effectuées sur la lampe halogène de référence et celles effectuées sur les éclairages à LED.

Cependant, afin d'évaluer l'effet d'éventuelles corrélations entre longueurs d'onde, les paramètres colorimétriques ont été calculés d'après des simulations sur les spectres, avec et sans prise en compte d'un facteur de linéarité. Comme pour l'analyse de l'erreur sur l'étalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre, plusieurs modèles ont été utilisés pour représenter ces erreurs. Les écarts observés sur les paramètres colorimétriques, qui prennent en compte les corrélations, sont très variables suivant le modèle mis en œuvre. Comparé à l'incertitude spécifique, c'est-à-dire, celle calculée par simulation Monte Carlo en annulant l'incertitude sur toutes les autres composantes d'erreur, les écarts sont, soit inférieurs, soit supérieurs, selon le modèle. De ce fait, l'estimation des incertitudes sans quantification précise des corrélations conduit, bien évidemment, soit à une surestimation, soit à une sous-estimation, des incertitudes selon les paramètres colorimétriques considérés.

Erreur liée au phénomène de diffusion du monochromateur

Le phénomène de diffusion regroupe l'ensemble de la lumière atteignant le détecteur qui n'est pas en rapport direct avec la luminance émise à la longueur d'onde d'intérêt.
Ce phénomène, particulièrement présent dans les monochromateurs simples, est en général dû aux imperfections de rugosité du réseau de diffraction du monochromateur. Dans notre cas, il a été évalué en traçant le spectre d'une source parfaitement monochromatique sur l'ensemble du domaine visible de longueurs d'onde. Nous faisons l'approximation que cette fonction de transfert, tracée à une longueur d'onde, reste semblable pour les autres longueurs d'onde du domaine visible. Le spectre d'émission d'un laser He-Ne d'une puissance moyenne de 2 mW, émettant à 633 nm, a donc été tracé selon le montage décrit par la figure 3.21.

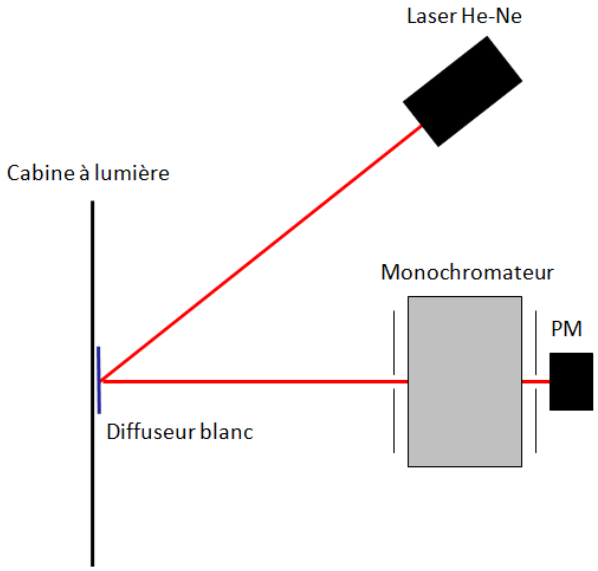


Fig. 3.21. - Montage permettant de tracer la fonction de transfert du monochromateur à l'aide d'une source monochromatique.

La fonction de transfert a été mesurée, dans la gamme de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm en la normalisant à 1 pour la valeur maximum à 633 nm. Afin de réaliser la mesure la plus fine possible nous avons effectué cinq mesures intermédiaires, pour deux gains de l'amplificateur de courant, telles que :

A(λ) Calibre 1 µA/V : mesure autour de 633 nm pour quelques longueurs d'onde, laser allumé ; (permet de déterminer l'amplitude maximale du signal une première fois)
B(λ) Calibre 10 nA/V : mesure sur le domaine 380-780 nm, laser allumé ; (saturation du signal à 633 nm)
C(λ) Calibre 10 nA/V : mesure autour de 633 nm pour quelques longueurs d'onde, laser éteint ; (permet de déterminer le bruit autour de 633 nm)
D(λ) Calibre 1 µA/V : mesure autour de 633 nm pour quelques longueurs d'onde, laser éteint ; (permet de déterminer le bruit autour de 633 nm)
E(λ) Calibre 1 µA/V : mesure autour de 633 nm pour quelques longueurs d'onde, laser allumé. (permet de déterminer l'amplitude maximale du signal une seconde fois)

A partir de ces mesures nous calculons la fonction de transfert $T_{\text{He-Ne}}(\lambda)$, comme suit :

$$T_{\text{He-Ne}}(\lambda) = \frac{B(\lambda) - \text{moy}(C(\lambda))}{\left(\left(\frac{\max(A(\lambda)) + \max(E(\lambda))}{2}\right) - \text{moy}(D(\lambda))\right)} \cdot \frac{1}{100} \qquad (3.12)$$

avec :

- moy(*C*(λ)) et moy(*D*(λ)) qui correspondent à la moyenne du signal mesuré sur toutes les valeurs, dans les deux cas.
- max(*A*(λ)) et max(*E*(λ)) correspondent à la valeur maximale du signal mesuré, dans les deux cas.

La multiplication par 1/100 permet de compenser le rapport des calibres entre celui de 1 µA/V et celui de 10 nA/V. En effet, le calibre de 10 nA/V donne des valeurs cent fois plus grandes que le calibre de 1 µA/V.

Cette mesure a permis de montrer que le phénomène de diffusion décroit rapidement à un niveau inférieur à 1 x 10^{-6} (fig. 3.22).

L'estimation de l'influence de ce niveau de diffusion sur les spectres des sources a été effectuée en calculant, par intervalle de 10 nm, les écarts entre les deux valeurs $I^{sd}_{\lambda_0}$ et $I^{ad}_{\lambda_0}$, exprimées par :

$$I^{sd}_{\lambda_0} = \int_{\lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2}} I^{S}_{\lambda} . T_{\lambda}(\lambda - \lambda_0) . d\lambda \qquad (3.13)$$

$$I^{ad}_{\lambda_0} = \int_{380}^{780} I^{S}_{\lambda} . T_{\lambda}(\lambda - \lambda_0) . d\lambda \qquad (3.14)$$

avec :

- $I^{sd}_{\lambda_0}$, valeur théorique limitée strictement à Δλ sans prise en compte du phénomène de diffusion ;

- $I_{\lambda_0}^{ad}$, valeur théorique calculée sur l'ensemble du domaine spectral considéré, avec prise en compte du phénomène de diffusion ;
- $T_\lambda(\lambda - \lambda_0)$, la fonction de transfert mesurée sur le domaine 380-780 nm du monochromateur pour la raie d'émission du laser He-Ne. A chaque longueur d'onde λ_0 nous centrons cette fonction sur cette valeur ;
- I_λ^S , la densité spectrale de courant correspondant au produit entre la sensibilité du spectroradiomètre et la densité spectrale de luminance de la source ;
- $\Delta\lambda$, la largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert ;
- λ_0, est la longueur d'onde considérée prise tous les 10 nm.

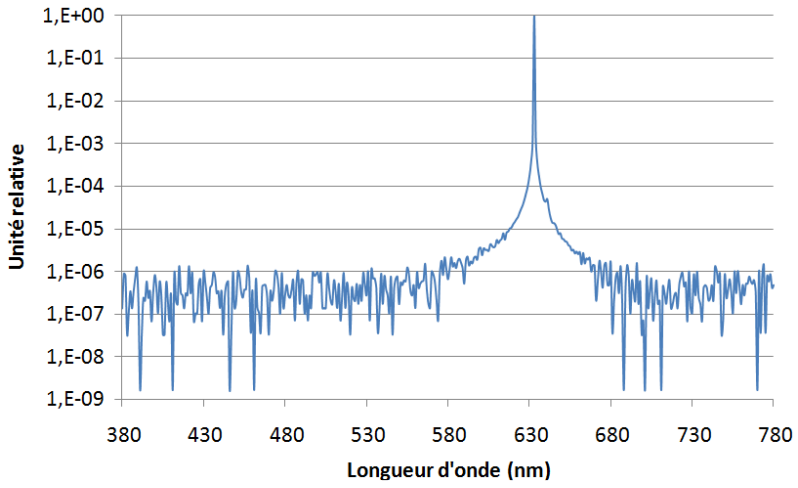


Fig. 3.22. - Fonction de transfert du monochromateur
tracée avec la raie à 633 nm d'un laser He-Ne.

Pour information, l'écart moyen pour la lampe de référence, sur l'ensemble des longueurs d'onde, entre $I_{\lambda_0}^{ad}$ et $I_{\lambda_0}^{sd}$ est de 0,0020. Selon l'éclairage à LED, l'écart moyen, sur l'ensemble des longueurs d'onde, est compris entre 0,0009 et 0,0013.

Pour obtenir l'incertitude due au phénomène de diffusion tous les 1 nm, une interpolation linéaire entre les points obtenus tous les 10 nm a été mise en œuvre. Les histogrammes des écarts calculés permettent d'associer aux grandeurs d'entrée $C_\lambda^{S,diff}$ et $C_\lambda^{LED,diff}$ une loi de distribution rectangulaire. La figure 3.23 donne un exemple d'histogramme obtenu.

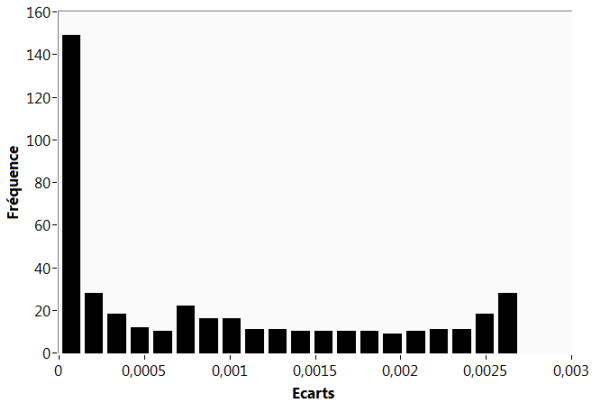


Fig. 3.23. - Histogramme des écarts dus à la diffusion calculés pour l'éclairage à LED blanc froid 2.

Afin d'évaluer l'effet des corrélations entre longueurs d'onde, les paramètres colorimétriques ont été calculés sur le spectre des éclairages à LED avant et après prise en compte de la diffusion. Les écarts calculés, qui prennent en compte les corrélations, sont très faibles. Ce résultat était attendu compte tenu du fait que les incertitudes associées à ce paramètre ajoutent aux spectres des éclairages à LED et du spectre de la lampe de référence, une composante quasi proportionnelle, et de valeur similaire dans les deux cas. Le signal mesuré sur ces deux types de source est, en valeur relative, affecté de la même erreur. La luminance calculée pour les éclairages à LED, d'après l'expression (3.11), ne sera donc pas affectée par cette erreur. Les calculs menés avec les valeurs des variations liées à la lumière diffuse montrent qu'il y a une erreur résiduelle pour les coordonnées chromatiques et la température de couleur proximale. Cette erreur est de l'ordre de grandeur de l'incertitude spécifique, c'est-à-dire, celle calculée par simulation Monte Carlo en annulant l'incertitude sur toutes les autres causes d'erreur. Par conséquent, nous conservons les incertitudes calculées précédemment pour cette composante d'erreur.

Erreur due à l'étalonnage de la lampe tungstène halogène de référence

L'éclairement énergétique spectrique relatif de la lampe halogène de référence a été déterminé à partir d'une lampe de référence en luminance et en utilisant le banc de mesure de l'INM [ROU 06]. L'incertitude-type relative sur cette mesure est de 1,26% sur la plage 380-399 nm et de 1,00% sur le domaine 400-780 nm. L'incertitude sur l'éclairement relatif, normé à la longueur d'onde de 550 nm, a été calculée, pour chaque longueur d'onde. La dispersion moyenne de ces incertitudes est égale à 0,0104.

Une loi de distribution gaussienne a été associée, pour chaque longueur d'onde, à la grandeur $C_{\lambda}^{E_{rel,\lambda}}$.

Le choix de cette loi de distribution repose sur l'application du théorème central limite qui stipule que la somme de variables aléatoires indépendantes, et qui suivent des lois de distributions - qui peuvent être différentes - tend vers une variable aléatoire qui suit une loi de distribution gaussienne.

Le tableau 3.2 présente le budget d'incertitude final pour les mesures de luminance spectrale relative sur les éclairages à LED. Ce budget d'incertitude ne tient pas compte des effets de corrélation analysés précédemment pour chaque cause d'erreur, compte tenu de leur caractère non significatif.

1.2.3.5. Résultats d'analyse

La simulation numérique de type Monte Carlo a été effectuée par un programme développé sous le logiciel Matlab (Annexe C). Celui-ci permet d'estimer les incertitudes sur les mesures spectrales relatives effectuées sur les éclairages à LED. Il se décompose en plusieurs étapes :

- L'initialisation permet de spécifier, dans un premier temps, le pas d'échantillonnage Δλ, de la fonction de répartition spectrale de luminance qui a été choisie pour les mesures spectrales (1 nm dans la configuration du montage). Ensuite, le nombre de tirage *N* de la simulation Monte Carlo, qui, compte tenu de la quantité d'informations et de la capacité de nos ordinateurs, a été fixé à 10^4. Plusieurs simulations ont été effectuées pour ce nombre de tirage. Les résultats ont montré que l'écart maximum, entre ces simulations, était pour les coordonnées chromatiques égal à 1×10^{-5}, pour la température de couleur proximale égal à 0,2, et pour les indices de rendu des couleurs égal à 0,03. Ceci a permis de mettre en évidence que ces variations étaient négligeables par rapport aux incertitudes obtenues. De ce fait, nous considérons ce nombre de tirages suffisant pour nos besoins.

- Les valeurs des variables aléatoires qui suivent les lois de distribution des différentes sources d'erreurs sont générées à partir des estimations des incertitudes résumées dans le tableau 3.2.

- Une distribution de la luminance énergétique spectrique relative $L_{\text{rel},\lambda}^{\text{LED}}$, est ensuite obtenue à partir des expressions analytiques (3.11) et (3.9), pour chaque point du spectre, dans le domaine de longueur d'onde 380-780 nm. Ceci permet de quantifier l'incertitude-type sur les mesures spectrales $u(L_{\text{rel},\lambda}^{\text{LED}})$.

La figure 3.24 représente une évolution caractéristique de l'incertitude-type en fonction de la longueur d'onde pour un des éclairages à LED. Les tableaux 3.3 et 3.4 donnent, pour les différents éclairages à LED, la valeur moyenne de la luminance relative et l'incertitude-type associée, à quelques longueurs d'onde.

Composante d'incertitude	Description	Distribution	Expressions	Ecart moyen*	Unité
$u(C_{\lambda}^{E_{\text{rel},\lambda}})$	Etalonnage de la lampe de référence	Gaussienne	/	0,0104	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{S,lambda}})$	Etalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre	Rectangulaire	$\left\lvert \left(\frac{I_{\lambda}^{S}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{S}-I_{\text{off}}}\right)(\lambda)-\left(\frac{I_{\lambda}^{S}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{S}-I_{\text{off}}}\right)(\lambda+0{,}18\ \text{nm})\right\rvert$	0,0010	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{S},\Delta\lambda})$	Largeur de bande du monochromateur	Gaussienne	$\left\lvert \left(\frac{I_{\lambda}^{S}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{S}-I_{\text{off}}}\right)(\Delta\lambda=1\ \text{nm})-\left(\frac{I_{\lambda}^{S}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{S}-I_{\text{off}}}\right)\right\rvert$	0,0001	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{S,diff}})$	Diffusion du monochromateur	Rectangulaire	$\left\lvert I_{\lambda_0}^{\text{S,ad}}-I_{\lambda_0}^{\text{S,sd}}\right\rvert$	0,0020	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{S,PMT}})$	Non linéarité du PMT	Rectangulaire	$\left\lvert \left(\frac{I_{\lambda}^{S}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{S}-I_{\text{off}}}\right).F_{I_{\lambda}}-\left(\frac{I_{\lambda}^{S}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{S}-I_{\text{off}}}\right)\right\rvert$	0,0012	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{S,rep}})$	Reproductibilité des mesures spectrales sur la lampe tungstène halogène	Gaussienne	$\left\lvert \left(\frac{I_{\lambda}^{S}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{S}-I_{\text{off}}}\right)(m_1)-\left(\frac{I_{\lambda}^{S}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{S}-I_{\text{off}}}\right)(m_2)\right\rvert$	0,0029	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{LED,lambda}})$	Etalonnage en longueur d'onde du monochromateur	Rectangulaire	$\left\lvert \left(\frac{I_{\lambda}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}\right)(\lambda)-\left(\frac{I_{\lambda}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}\right)(\lambda+0{,}18\ \text{nm})\right\rvert$	0,0010 à 0,0015	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{LED},\Delta\lambda})$	Largeur de bande du monochromateur	Gaussienne	$\left\lvert \left(\frac{I_{\lambda}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}\right)(\Delta\lambda=1\ \text{nm})-\left(\frac{I_{\lambda}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}\right)\right\rvert$	0,0002 à 0,0006	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{LED,diff}})$	Diffusion du monochromateur	Rectangulaire	$\left\lvert I_{\lambda_0}^{\text{LED,ad}}-I_{\lambda_0}^{\text{LED,sd}}\right\rvert$	0,0009 à 0,0013	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{LED,PMT}})$	Non linéarité du PMT	Rectangulaire	$\left\lvert \left(\frac{I_{\lambda}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}\right).F_{I_{\lambda}}-\left(\frac{I_{\lambda}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}\right)\right\rvert$	0,0029 à 0,0041	Sans unité
$u(C_{\lambda}^{\text{LED,rep}})$	Répétabilité des mesures spectrales sur les LED	Gaussienne	$\left\lvert \left(\frac{I_{\lambda}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}\right)(t_1)-\left(\frac{I_{\lambda}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}}-I_{\text{off}}}\right)(t_2)\right\rvert$	0,0010 à 0,0021	Sans unité

* Ecart moyen donné à titre indicatif. Pour les calculs de simulation Monte Carlo nous utilisons les écarts calculés à chaque longueur d'onde.

Tab. 3.2. - Budget d'incertitude sur les mesures spectrales relatives effectuées sur les éclairages à LED.

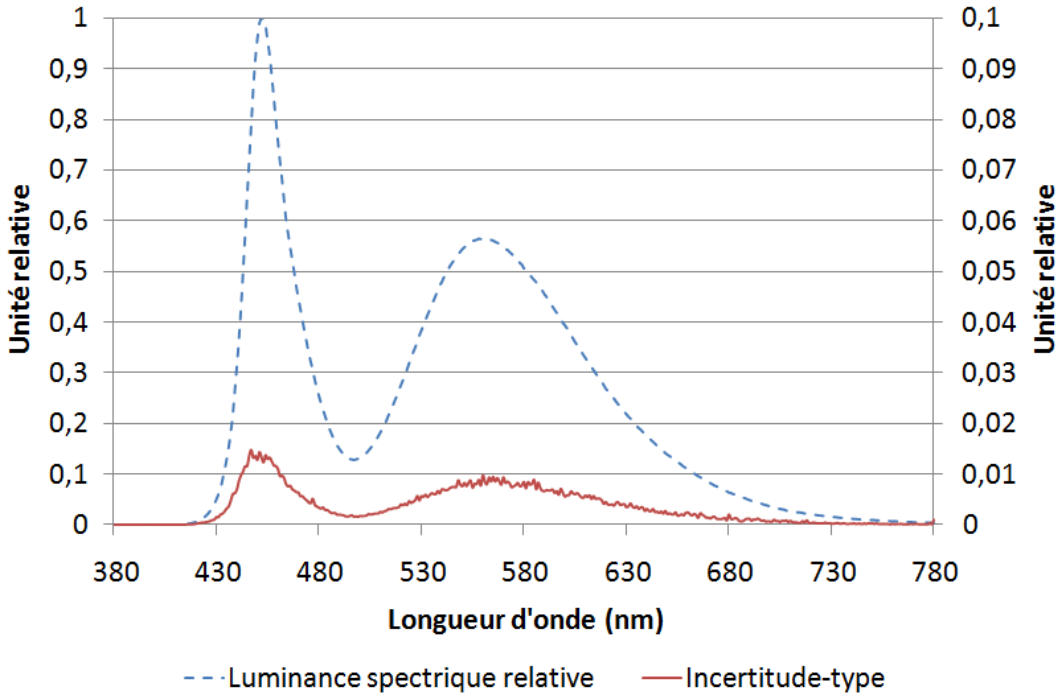


Fig. 3.24. - Incertitude-type sur la mesure de la luminance spectrique relative de l'éclairage à LED blanc froid 2.

Longueur d'onde (nm)	Blanc froid 1		Blanc froid 2	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
380	0,0006	0,0002	0,0002	0,0001
400	0,0011	0,0001	0,0003	0,0001
420	0,1042	0,0033	0,0060	0,0002
440	0,9042	0,0136	0,3131	0,0070
460	0,3428	0,0054	0,7578	0,0111
480	0,1020	0,0014	0,2550	0,0034
500	0,1656	0,0025	0,1322	0,0018
520	0,3793	0,0058	0,2756	0,0041
540	0,4980	0,0070	0,4800	0,0070
560	0,5132	0,0070	0,5656	0,0098
580	0,4812	0,0069	0,5068	0,0085
600	0,4144	0,0057	0,3941	0,0056
620	0,3170	0,0054	0,2689	0,0045
640	0,2328	0,0042	0,1753	0,0032
660	0,1605	0,0028	0,1094	0,0025
680	0,1042	0,0019	0,0642	0,0021
700	0,0656	0,0011	0,0368	0,0007
720	0,0405	0,0010	0,0209	0,0004
740	0,0255	0,0007	0,0124	0,0002
760	0,0164	0,0004	0,0073	0,0002
780	0,0105	0,0026	0,0042	0,0010

Tab. 3.3. - Valeur moyenne et incertitude-type sur les mesures de luminance spectrique relative des éclairages à LED de type blanc froid, pour quelques longueurs d'onde du domaine 380-780 nm.

Longueur d'onde (nm)	Blanc chaud 3		Blanc chaud 4		Blanc chaud 5	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
380	0,0004	0,0003	0,0001	0,0001	0,0004	0,0001
400	0,0006	0,0001	0,0001	0,0002	0,0009	0,0001
420	0,0316	0,0011	0,0002	0,0001	0,0594	0,0028
440	0,2917	0,0062	0,0198	0,0010	0,4737	0,0085
460	0,7092	0,0104	0,3761	0,0092	0,3903	0,0092
480	0,2926	0,0037	0,2646	0,0046	0,1506	0,0040
500	0,3231	0,0052	0,2104	0,0041	0,1808	0,0028
520	0,6411	0,0084	0,3776	0,0061	0,4114	0,0071
540	0,8595	0,0103	0,5947	0,0096	0,6374	0,0078
560	0,9599	0,0112	0,7962	0,0104	0,7990	0,0094
580	0,9816	0,0124	0,9379	0,0120	0,9293	0,0118
600	0,9784	0,0115	0,9981	0,0115	1,0000	0,0117
620	0,9915	0,0134	0,9174	0,0125	0,9370	0,0124
640	0,9666	0,0128	0,7697	0,0110	0,7818	0,0115
660	0,7846	0,0100	0,5979	0,0089	0,5893	0,0075
680	0,5096	0,0087	0,4276	0,0064	0,4014	0,0061
700	0,2814	0,0043	0,2864	0,0047	0,2528	0,0042
720	0,1434	0,0023	0,1922	0,0035	0,1530	0,0024
740	0,0752	0,0016	0,1287	0,0021	0,0933	0,0023
760	0,0397	0,0015	0,0854	0,0020	0,0573	0,0012
780	0,0215	0,0054	0,0565	0,0138	0,0338	0,0083

Tab. 3.4. - Valeur moyenne et incertitude-type sur les mesures de luminance spectrique relative des éclairages à LED de type blanc chaud, pour quelques longueurs d'onde du domaine 380-780 nm.

1.3. Paramètres colorimétriques des LED : résultats et incertitudes

Les paramètres colorimétriques vont être calculés à partir des mesures spectrales des éclairages à LED réalisées précédemment. Les incertitudes associées à ces paramètres vont être déterminées à partir des incertitudes calculées sur les mesures spectrales.

Les données indispensables aux calculs des paramètres colorimétriques (les facteurs spectraux de luminance des échantillons de couleur test, la répartition spectrale de l'illuminant de référence et les fonctions colorimétriques) sont importées, dans le programme Matlab, à partir de fichiers au format tableur.

1.3.1. Coordonnées chromatiques

Les distributions associées aux coordonnées chromatiques *x* et *y* des éclairages à LED sont calculées à partir des distributions, obtenues pour chaque longueur d'onde, des valeurs de luminance $L_{\mathrm{rel},\lambda}^{\mathrm{LED}}$, calculées précédemment.
Les coordonnées chromatiques *x* et *y* s'expriment à partir des composantes trichromatiques *X*, *Y*, *Z* et sont données par les expressions (1.30) et (1.32).

Du fait que les composantes trichromatiques dépendent des mêmes informations spectrales elles sont corrélées entre elles. La matrice de la loi de distribution gaussienne à multiples variables U_{XYZ}, utilisée pour exprimer les variances $u^2(X)$, $u^2(Y)$ et $u^2(Z)$ et les covariances $u(X,Y), u(X,Z), u(Y,Z)$ des composantes trichromatiques *X*, *Y* et *Z* a été déterminée tel que décrit dans le supplément 1 au GUM [GUM 08] :

$$U_{XYZ} = \begin{bmatrix} u^2(X) & u(X,Y) & u(X,Z) \\ u(Y,X) & u^2(Y) & u(Y,Z) \\ u(Z,X) & u(Z,Y) & u^2(Z) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

avec :

$$\begin{aligned} u(X,Y) &= u(Y,X) = r_{XY}.u(X).u(Y) \\ u(X,Z) &= u(Z,X) = r_{XZ}.u(X).u(Z) \\ u(Y,Z) &= u(Z,Y) = r_{YZ}.u(Y).u(Z) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Les coefficients de corrélation appelés r_{XY}, r_{XZ}, r_{YZ}, associés aux composantes trichromatiques, ont été calculés en utilisant la loi de propagation des incertitudes [GUM 95] [GAR 99] [GAR 00a]. Ceux-ci s'expriment par :

$$r_{XY} = \frac{\sum_{\lambda} u^2(L_\lambda)\bar{x}_\lambda \bar{y}_\lambda}{\sqrt{\sum_{\lambda} u^2(L_\lambda)\bar{x}_\lambda^2 \sum_{\lambda} u^2(L_\lambda)\bar{y}_\lambda^2}} \quad (3.17)$$

Les expressions sont similaires pour r_{XZ} et r_{YZ} .

A partir de la fréquence des résultats pour chaque classe de valeurs de l'histogramme tracé (fig. 3.25), nous obtenons les distributions associées aux coordonnées chromatiques. La figure 3.25 présente un exemple de distributions de coordonnées chromatiques *x* et *y* obtenues à l'issu des calculs. Ces distributions, correspondant à celles de l'éclairage blanc froid 1, suivent des lois gaussiennes. Il en est de même pour les autres éclairages à LED.

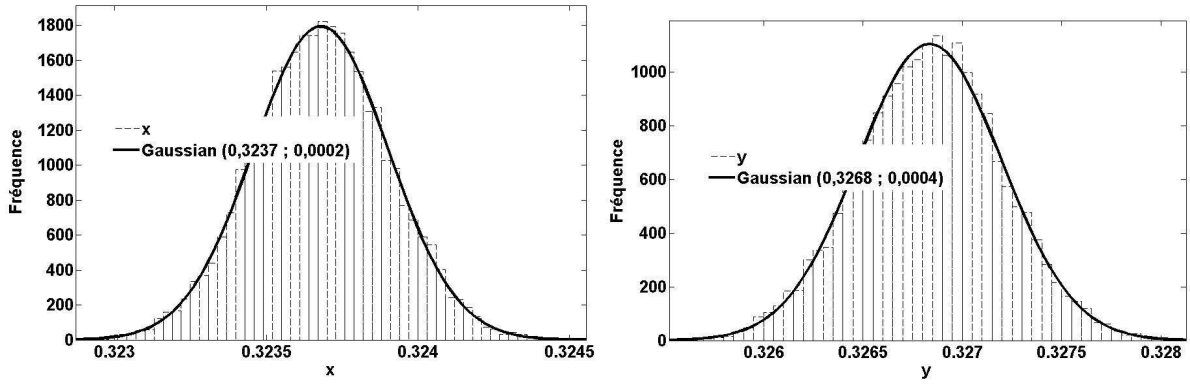


Fig. 3.25. - Distributions associées aux coordonnées chromatiques
x et *y* pour le système d'éclairage à LED blanc froid 1.

A partir de ces distributions il est possible d'obtenir les valeurs moyennes et les incertitudes-types des coordonnées chromatiques *x* et *y* pour les différents éclairages à LED (tab. 3.5 et tab. 3.6).

Coordonnées chromatiques	Blanc froid 1		Blanc froid 2	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude -type
x	0,3237	0,0002	0,3201	0,0002
y	0,3268	0,0004	0,3325	0,0004

Tab. 3.5. - Valeur moyenne et incertitude-type des coordonnées chromatiques *x* et *y*
pour les éclairages à LED de type blanc froid de la cabine à lumière.

Coordonnées chromatiques	Blanc chaud 3		Blanc chaud 4		Blanc chaud 5	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
x	0,4100	0,0002	0,4604	0,0002	0,4268	0,0002
y	0,4026	0,0003	0,4318	0,0002	0,3857	0,0003

Tab. 3.6. - Valeur moyenne et incertitude-type des coordonnées chromatiques *x* et *y* pour les éclairages à LED de type blanc chaud de la cabine à lumière.

Huit simulations ont été effectuées pour un nombre de tirages de variables aléatoires *N* égal à 10^4. Ceci a permis de mettre en évidence que les variations maximales entre les résultats obtenus à partir de ces simulations sont de 1 x 10^{-5}. Etant donné qu'elles sont inférieures aux incertitudes elles sont considérées comme négligeables.

1.3.2. Température de couleur proximale

Après avoir déterminé les incertitudes sur les coordonnées chromatiques, l'incertitude sur la température de couleur proximale est calculée en prenant en compte la corrélation entre *x* et *y*. Les expressions (1.37) et (1.38) donnent la relation entre la température de couleur proximale et les coordonnées *x* et *y*.

Le coefficient de corrélation r_{xy}, sur les coordonnées *x* et *y* calculées à partir des composantes trichromatiques *X*, *Y* et *Z,* a été déterminé à partir des expressions (1.30) et (3.17) pour obtenir la relation :

$$r_{xy} = \frac{\sum_{\lambda} \frac{\partial x}{\partial L_\lambda} . \frac{\partial y}{\partial L_\lambda} . u^2(L_\lambda)}{\sqrt{\sum_{\lambda} u^2(L_\lambda) . \left(\frac{\partial x}{\partial L_\lambda} \right)^2 . \sum_{\lambda} u^2(L_\lambda) . \left(\frac{\partial y}{\partial L_\lambda} \right)^2}} \tag{3.18}$$

avec les dérivés partielles égales à :

$$\frac{\partial x}{\partial L_\lambda} = \frac{\bar{x}_\lambda - x . \bar{t}_{xy_\lambda}}{\sum_{\lambda} L_\lambda . \bar{t}_{xy_\lambda}} \tag{3.19}$$

et

$$\frac{\partial y}{\partial L_\lambda} = \frac{\bar{y}_\lambda - y . \bar{t}_{xy_\lambda}}{\sum_{\lambda} L_\lambda . \bar{t}_{xy_\lambda}} \tag{3.20}$$

où :

$$\bar{t}_{xy_\lambda} = \bar{x}_\lambda + \bar{y}_\lambda + \bar{z}_\lambda \tag{3.21}$$

La matrice de la loi de distribution gaussienne à multiples variables U_{xy}, traduit la corrélation entre les coordonnées chromatiques *x* et *y*, et s'exprime par :

$$U_{xy} = \begin{bmatrix} u^2(x) & u(x,y) \\ u(y,x) & u^2(y) \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

avec :

$$u(x,y) = u(y,x) = r_{xy} . u(x) . u(y) \tag{3.23}$$

La figure 3.26 présente un exemple de distribution de température de couleur proximale obtenu à l'issu des calculs. Cette distribution, correspondant à celle de l'éclairage blanc froid 1, suit une loi gaussienne. Il en est de même pour les autres éclairages à LED.

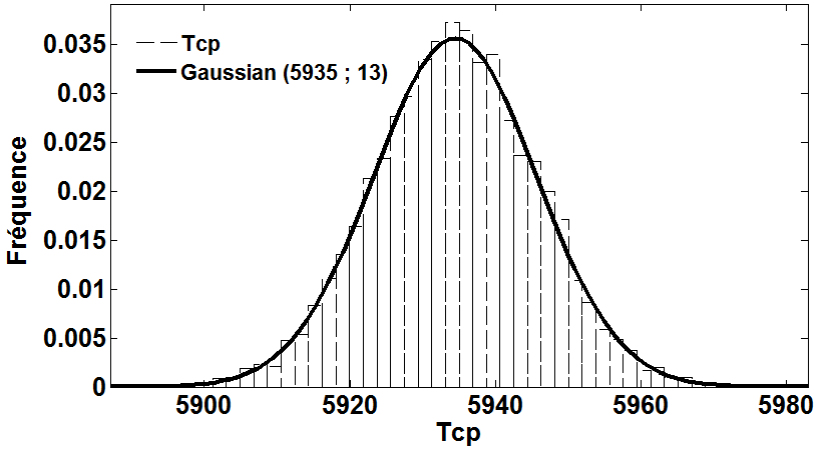


Fig. 3.26. - Distribution associée à la température de couleur proximale T_{cp} de l'éclairage à LED blanc froid 1.

A partir des distributions obtenues, il est possible de calculer les valeurs moyennes et les incertitudes-types de la température de couleur proximale pour les différents éclairages à LED (tab. 3.7 et tab. 3.8).

Température de couleur proximale	Blanc froid 1		Blanc froid 2	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
T_{cp}	5935	13	6097	11

Tab. 3.7. - Valeur moyenne et incertitude-type de la température de couleur proximale pour chacun des éclairages à LED de type blanc froid de la cabine à lumière.

Température de couleur proximale	Blanc chaud 3		Blanc chaud 4		Blanc chaud 5	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
T_{cp}	3501	4	2855	3	3029	3

Tab. 3.8. - Valeur moyenne et incertitude-type de la température de couleur proximale pour chacun des éclairages à LED de type blanc chaud de la cabine à lumière.

Huit simulations ont été effectuées pour un nombre de tirage de variables aléatoires N égal à 10^4. Ceci a permis de mettre en évidence que les variations maximales entre les résultats obtenus à partir de ces simulations sont de 0,2. Etant donné qu'elles sont inférieures aux incertitudes elles sont considérées comme négligeables.

1.3.3. Indice de rendu des couleurs

- **Calculs sur la source à mesurer**

Pour pouvoir obtenir les valeurs des indices de rendu des couleurs il est nécessaire de transformer les coordonnées chromatiques x et y des sources à LED dans d'autres espaces colorimétriques pour obtenir les coordonnées u, v et c, d (Chapitre I : § 2.5.3. Méthode actuelle de détermination de l'IRC).

De la même façon que pour les coordonnées *x* et *y*, les corrélations entre *X*, *Y* et *Z* sont prises en compte pour le calcul des coordonnées *u* et *v* qui sont exprimées par les expressions (1.33).

Pour le calcul des coordonnées *c* et *d* explicitées par les expressions (1.34), les corrélations entre *u* et *v* sont également prises en compte.
Les coefficients de corrélation sur les coordonnées *u* et *v* calculés à partir des composantes trichromatiques *X*, *Y* et *Z* ont été déterminés à partir des expressions (1.33) et (3.17) pour obtenir la relation [GAR 00b] :

$$r_{uv} = \frac{\sum_{\lambda} \frac{\partial u}{\partial L_\lambda} . \frac{\partial v}{\partial L_\lambda} . u^2(L_\lambda)}{\sqrt{\sum_{\lambda} u^2(L_\lambda) . \left(\frac{\partial u}{\partial L_\lambda} \right)^2 . \sum_{\lambda} u^2(L_\lambda) . \left(\frac{\partial v}{\partial L_\lambda} \right)^2}} \tag{3.24}$$

avec les dérivés partielles égales à :

$$\frac{\partial u}{\partial L_\lambda} = \frac{4.\bar{x}_\lambda - u.\bar{t}_{uv_\lambda}}{\sum_{\lambda} L_\lambda . \bar{t}_{uv_\lambda}} \tag{3.25}$$

et

$$\frac{\partial v}{\partial L_\lambda} = \frac{6.\bar{y}_\lambda - v.\bar{t}_{uv_\lambda}}{\sum_{\lambda} L_\lambda . \bar{t}_{uv_\lambda}} \tag{3.26}$$

où :

$$\bar{t}_{uv_\lambda} = \bar{x}_\lambda + 15.\bar{y}_\lambda + 3.\bar{z}_\lambda \tag{3.27}$$

La matrice de la loi de distribution gaussienne à multiples variables U_{uv}, traduit la corrélation entre les coordonnées chromatiques *u* et *v*, et s'exprime par :

$$U_{uv} = \begin{bmatrix} u^2(u) & u(u,v) \\ u(v,u) & u^2(v) \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

avec :

$$u(u,v) = u(v,u) = r_{uv} . u(u) . u(v) \tag{3.29}$$

- **Calculs colorimétriques sur l'illuminant de référence**

Le calcul des valeurs moyennes des températures de couleur proximales des éclairages à LED (§ 1.3.2. Température de couleur proximale) permet de choisir les illuminants de référence ayant les mêmes températures de couleur proximales. Nous avons vérifié que l'influence de l'incertitude associée à la température de couleur proximale des éclairages à LED, sur le choix de l'illuminant de référence, est négligeable. Nous n'associons donc pas d'incertitude à la valeur de la température de couleur proximale de l'illuminant de référence.

Les coordonnées chromatiques *x*, *y*, *u*, *v* et *c*, *d* des illuminants de référence choisis sont calculées sans incertitudes associées.

- **Calculs des indices de rendu des couleurs des éclairages à LED**

Dans un premier temps, les composantes trichromatiques exprimées par les relations (1.40), ont été déterminées pour les éclairages à LED avec chacun des échantillons colorés.

Les coefficients de corrélation intervenant dans les calculs des coordonnées chromatiques $u_{k,i}$, $v_{k,i}$ et $c_{k,i}$, $d_{k,i}$ suivent le même raisonnement que ceux abordés précédemment au facteur spectraux de luminance $R_{i,\lambda}$ près.

L'adaptation chromatique entre les éclairages à LED, notés indice *k*, et les illuminants de référence, notés indice *r,* a ensuite été prise en compte. Pour cela, les corrections explicitées dans les expressions (1.43) ont été appliquées. A partir du calcul des nouvelles coordonnées $c'_{k,i}$ et $d'_{k,i}$, les coordonnées $u'_{k,i}$ et $v'_{k,i}$, corrigées de l'adaptation chromatique, ont été calculées, pour chaque échantillon coloré, comme le montre les expressions (1.44).

La corrélation entre $c'_{k,i}$ et $d'_{k,i}$ a été prise en considération. Pour ce faire, le coefficient de corrélation, $r_{c'd'}$, a été déterminé en exprimant la relation (1.43) par :

$$c'_{k,i} = \frac{(4 - u_{k,i} - 10.v_{k,i})}{v_{k,i}}.\left(\frac{c_r}{c_k}\right) = 2.\frac{Z}{Y}.\left(\frac{c_r}{c_k}\right) = 2.\frac{\sum_\lambda L_\lambda R_{i,\lambda}.\bar{z}_\lambda}{\sum_\lambda L_\lambda R_{i,\lambda}.\bar{y}_\lambda}.\left(\frac{c_r}{c_k}\right)$$

$$d'_{k,i} = \frac{1{,}708.v_{k,i} + 0{,}404 - 1{,}481.u_{k,i}}{v_{k,i}}.\left(\frac{d_r}{d_k}\right) = \frac{16{,}308.Y - 5{,}52.X + 1{,}212.Z}{6.Y}.\left(\frac{d_r}{d_k}\right) = \ldots \quad (3.30)$$

$$\ldots = \frac{16{,}308\sum_\lambda L_\lambda R_{i,\lambda}.\bar{y}_\lambda - 5{,}52\sum_\lambda L_\lambda R_{i,\lambda}.\bar{x}_\lambda + 1{,}212\sum_\lambda L_\lambda R_{i,\lambda}.\bar{z}_\lambda}{6\sum_\lambda L_\lambda R_{i,\lambda}.\bar{y}_\lambda}.\left(\frac{d_r}{d_k}\right)$$

Ce qui permet de calculer le coefficient de corrélation $r_{c'd'}$:

$$r_{c'd'} = \frac{\sum_\lambda \frac{\partial c'_{k,i}}{\partial L_\lambda}\frac{\partial d'_{k,i}}{\partial L_\lambda}u^2(L_\lambda)}{\sqrt{\sum_\lambda u^2(L_\lambda)\left(\frac{\partial c'_{k,i}}{\partial L_\lambda}\right)^2 \sum_\lambda u^2(L_\lambda)\left(\frac{\partial d'_{k,i}}{\partial L_\lambda}\right)^2}} \quad (3.31)$$

avec :

$$\frac{\partial c'_{k,i}}{\partial L_\lambda} = \frac{2.\left(\frac{c_r}{c_k}\right).R_{i,\lambda}\bar{z}_\lambda - c'_{k,i}R_{i,\lambda}\bar{y}_\lambda}{\sum_\lambda L_\lambda R_{i,\lambda}\bar{y}_\lambda} \quad (3.32)$$

et

$$\frac{\partial d'_{k,i}}{\partial L_\lambda} = \frac{\left(\frac{d_r}{d_k}\right).R_{i,\lambda}(16{,}308.\bar{y}_\lambda - 5{,}52.\bar{x}_\lambda + 1{,}212.\bar{z}_\lambda) - d'_{k,i}R_{i,\lambda}\bar{y}_\lambda}{6\sum_\lambda L_\lambda R_{i,\lambda}\bar{y}_\lambda} \quad (3.33)$$

L'ensemble des étapes de calcul des corrélations, propres à la méthode de calcul de l'indice de rendu des couleurs est résumé par le schéma de la figure 3.27.

Enfin pour déterminer les différences de couleurs sur les échantillons colorés entre les éclairages à LED et les illuminants de référence, les coordonnées $U^*_{k,i}$, $V^*_{k,i}$, $W^*_{k,i}$ sont calculées grâce aux relations (1.45).

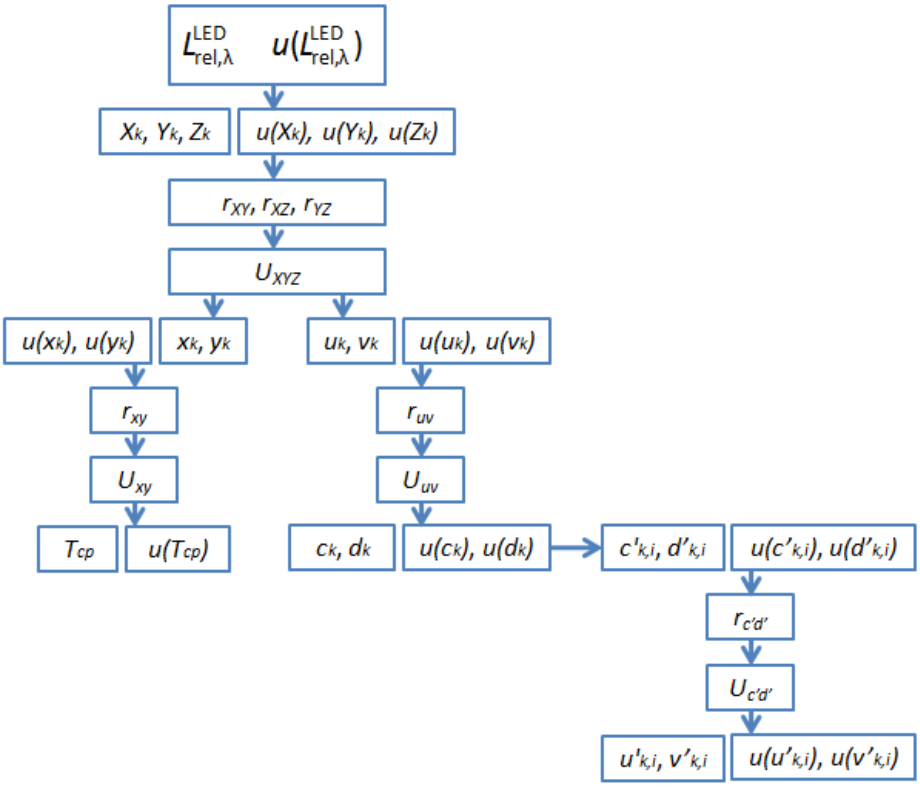


Fig. 3.27. - Schéma récapitulatif du processus de calcul des corrélations propre à la méthode de calcul de l'indice de rendu des couleurs d'après la recommandation de la CIE.

L'ensemble de ce processus de calcul est reproduit afin d'obtenir les coordonnées $U^*_{r,i}$, $V^*_{r,i}$, $W^*_{r,i}$ des illuminants de référence. Les différences de couleurs ΔE_i, entre les illuminants de référence et les éclairages à LED sont ensuite calculées pour chacun des échantillons colorés de l'atlas de Munsell selon le principe décrit dans le chapitre I (§ 2.3.4. Différences de couleur) et d'après la relation (1.46).

A partir de ces différences de couleur, les indices particuliers de rendu des couleurs sont déterminés par l'intermédiaire de l'expression (1.47) et les indices généraux R_a et R_{a_14}, par les expressions (1.48) et (1.49).

La figure 3.28 donne un exemple représentatif d'une distribution obtenue pour un indice général de rendu des couleurs R_a, et un indice particulier R_1. Ceci permet de montrer que ces paramètres suivent une loi de distribution gaussienne.

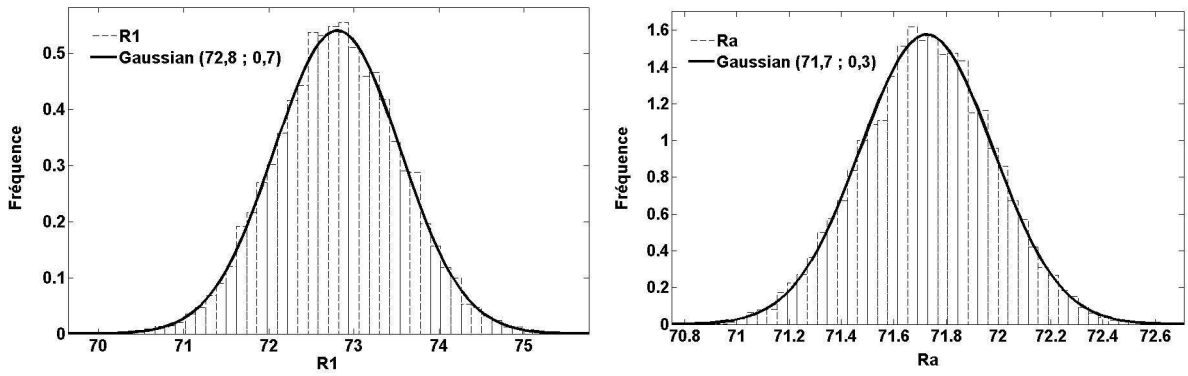


Fig. 3.28. - Distributions associées à la valeur de l'indice général de rendu des couleurs R_a, et à celle de l'indice particulier R_1, pour l'éclairage à LED blanc froid 1.

Les tableaux 3.9 et 3.10 résument les incertitudes de mesures sur les indices de rendu des couleurs des éclairages à LED, obtenues par simulation Monte Carlo, à partir des mesures spectrales relatives.

Huit simulations ont été effectuées pour un nombre de tirage de variables aléatoires N égal à 10^4. Ceci a permis de mettre en évidence que les variations maximales entre les résultats obtenus à partir de ces simulations sont de 0,03. Etant donné qu'elles sont inférieures aux incertitudes elles sont considérées comme négligeables.

Indices de rendu des couleurs	Blanc froid 1		Blanc froid 2	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
R_1	72,8	0,7	63,5	0,8
R_2	74,2	0,8	78,6	0,7
R_3	72,1	0,6	82,9	0,4
R_4	74,3	0,5	60,6	0,6
R_5	73,3	0,7	63,2	0,7
R_6	64,2	0,9	65,3	0,9
R_7	77,8	1,0	80,6	0,7
R_8	65,2	0,8	50,8	0,8
R_9	-9,7	0,6	-50,6	0,6
R_{10}	36,1	1,0	43,8	1,0
R_{11}	73,0	0,4	49,8	0,5
R_{12}	43,9	0,5	32,6	0,5
R_{13}	71,4	1,1	67,3	1,0
R_{14}	83,8	0,4	90,2	0,3
R_a	71,7	0,3	68,2	0,2
R_{a_14}	62,3	0,2	55,6	0,2

Tab. 3.9. - Valeur moyenne et incertitude-type des indices de rendu des couleurs pour les éclairages à LED de type blanc froid de la cabine à lumière.

Indices de rendu des couleurs	Blanc chaud 3		Blanc chaud 4		Blanc chaud 5	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
R_1	83,7	0,7	73,0	0,8	76,7	0,7
R_2	87,7	0,7	85,8	0,8	85,6	0,7
R_3	88,6	0,6	96,6	0,3	90,0	0,4
R_4	83,6	0,6	68,9	0,6	74,1	0,5
R_5	81,2	0,6	70,3	0,7	74,6	0,6
R_6	80,6	0,7	79,0	0,7	77,5	0,6
R_7	93,6	0,6	83,8	0,8	83,0	0,6
R_8	79,6	0,8	56,2	0,9	61,6	0,7
R_9	46,0	0,5	-0,5	0,5	11,3	0,5
R_{10}	68,4	1,0	65,6	1,1	63,5	0,9
R_{11}	78,8	0,5	61,1	0,6	67,7	0,5
R_{12}	53,9	0,4	48,0	0,5	55,9	0,3
R_{13}	84,0	1,0	75,2	1,1	78,2	1,0
R_{14}	92,8	0,4	97,6	0,3	93,6	0,3
R_a	84,8	0,2	76,7	0,2	77,9	0,2
R_{a_14}	78,8	0,2	68,6	0,2	71,0	0,2

Tab. 3.10. - Valeur moyenne et incertitude-type des indices de rendu des couleurs pour les éclairages à LED de type blanc chaud de la cabine à lumière.

1.3.4. Commentaires sur les résultats d'incertitudes

Afin de compléter les valeurs d'incertitudes obtenues précédemment, nous nous sommes intéressés aux incertitudes liées à la définition même de la méthode de calcul des paramètres colorimétriques et à sa mise en pratique. Pour mettre en valeur cet aspect, nous avons effectué des calculs de coordonnées chromatiques, de températures de couleur proximales et d'indices de rendu des couleurs pour différents spectres de LED, à l'aide de quatre programmes informatiques différents. Le premier correspond à celui fourni par la CIE en complément de la recommandation CIE 13.3 [CIE 95], le deuxième correspond à celui d'un fabricant de spectroradiomètre, Bentham, le troisième est un programme Excel développé par le NIST (« NIST CQS Simulation 7.4 » disponible auprès de Wendy Davis) et le quatrième est un programme Matlab développé à l'INM. Les écarts maximum de dispersion calculés sur les cinq sources d'éclairage à LED entre les quatre programmes sont explicités dans le tableau 3.11. Aucun écart systématique d'une méthode par rapport à une autre n'a pu être mis en évidence.

Ces écarts sont du même ordre de grandeur que les incertitudes calculées par simulation Monte Carlo.

Au vu de ces résultats, et bien que la méthode de calcul de l'indice de rendu des couleurs ait fait l'objet d'une recommandation de la CIE [CIE 95], celle-ci n'apporte visiblement pas suffisamment d'éléments de précision (tel que le choix, par exemple, de la méthode de calcul de la température de couleur proximale, le choix de l'illuminant de référence ou le pas d'échantillonnage de la fonction de répartition spectrale) permettant d'obtenir des résultats identiques en fonction des différentes mises en pratique que l'on peut rencontrer.

Ces écarts maximum ne sont pas intégrés dans le calcul d'incertitude utilisant la simulation Monte Carlo. Ils sont uniquement donnés au titre d'une comparaison avec les valeurs obtenues par simulation.

Paramètres colorimétriques	**Ecarts maximum**				
	Blanc froid 1	**Blanc froid 2**	**Blanc chaud 3**	**Blanc chaud 4**	**Blanc chaud 5**
x	0	0,0001	0	0,0001	0
y	0,0001	0	0,0001	0,0001	0
T_{cp}	3	4	7	3	6
R_1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
R_2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
R_3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3
R_4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
R_5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
R_6	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3
R_7	0,2	0,2	0,1	0,4	0,4
R_8	0,3	0,4	0,3	0,6	0,5
R_9	0,7	0,7	0,7	0,9	0,8
R_{10}	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
R_{11}	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
R_{12}	0,1	0	0,1	0,2	0,3
R_{13}	0,4	0,2	0,3	0,5	0,3
R_{14}	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
R_a et R_{a_14}	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2

Tab. 3.11. - Ecarts maximum calculés sur les paramètres colorimétriques des éclairages à LED à partir de quatre programmes informatiques différents.

1.3.5. Conclusion

Les sources à LED ont des caractéristiques colorimétriques différentes des sources à incandescence ou à fluorescence. Pour quantifier la variation des paramètres colorimétriques il est fondamental de pouvoir juger de la validité des mesures sur ces paramètres, en leur attribuant une incertitude.

En 2000, James L. Gardner a présenté une méthode analytique de calcul de l'incertitude sur les coordonnées chromatiques et la température de couleur proximale basée sur le GUM [GUM 95] [GAR 00a] [GAR 00b]. Cette méthode montre ses limites dans le calcul des dérivées partielles qui deviennent rapidement complexes si l'on souhaite estimer les incertitudes sur les indices de rendu des couleurs.

En 2001, Yoshi Ohno a proposé une méthode numérique pour calculer les coefficients de sensibilité liant les incertitudes sur les coordonnées chromatiques et la température de couleur à celle de l'indice de rendu des couleurs [OHN 01]. Cette méthode repose sur le même principe de base que la méthode Monte Carlo, mais est moins complète dans sa mise en pratique, notamment en ce qui concerne l'écart-type de dispersion des variables aléatoires et de la loi de distribution associée.

Pour pallier les problèmes des deux précédentes méthodes, nous avons choisi d'appliquer la méthode de Monte Carlo. Celle-ci permet de s'affranchir d'une grande partie du calcul des dérivés partielles, en particulier, lorsque les expressions analytiques sont complexes. De plus, elle permet d'associer des lois de distributions à chacune des grandeurs mesurées.

Les simulations de Monte Carlo réalisées, ont montré que les distributions des coordonnées chromatiques et des températures de couleur proximales sont gaussiennes. Une nouvelle application de la méthode a permis de déterminer les distributions liées aux indices de rendu des couleurs, permettant d'en extraire les valeurs moyennes et les incertitudes-types.

Les corrélations, d'une part, entre longueurs d'onde pour chacune des causes d'erreur et, d'autre part, entre les mesures de luminance effectuées sur la lampe tungstène halogène et les éclairages à LED, ont été abordées. La difficulté essentielle pour la prise en compte de ces corrélations provient de l'analyse physique des différentes causes d'erreur. Le programme développé ici ne prend pas en compte ces corrélations mais il est envisageable de les intégrer au calcul. La connaissance des lois physiques permettant de calculer ces coefficients de corrélation, ou leur évaluation par des mesures, reste la principale difficulté. Quoiqu'il en soit, le tableau 3.2 montre que la composante d'incertitude prédominante sur les mesures spectrales concerne l'étalonnage de la lampe de référence. Les études sur les corrélations pour certaines des autres composantes d'erreur ont montré qu'elles avaient un impact limité sur les valeurs d'incertitudes. Par conséquent, la prise en compte des corrélations ne changerait pas de manière significative les valeurs d'incertitudes finales.

2 Variations radiométriques et colorimétriques en fonction de paramètres d'influence

Dans ce paragraphe, nous nous attacherons à étudier l'impact sur les mesures spectrales - et par conséquent, sur les paramètres colorimétriques - de quelques paramètres d'influence. Ces paramètres d'influence ont été choisis à trois niveaux différents.

Le premier paramètre d'influence choisi, intervient directement sur la source et correspond au courant d'alimentation électrique des LED. Le second paramètre intervient sur l'instrument de mesure, à savoir le spectroradiomètre, et correspond à la fonction de transfert du monochromateur. Enfin, les derniers paramètres interviennent sur la méthode de calcul des paramètres colorimétriques et correspondent, d'une part, au choix de l'observateur colorimétrique de référence, et d'autre part, au pas en longueur d'onde de la fonction de répartition spectrale mesurée.

2.1. Alimentation électrique

Dans cette partie nous décrivons le travail qui a porté sur l'impact du courant d'alimentation des LED sur les mesures spectrales et les paramètres colorimétriques. Le premier paragraphe est consacré au courant continu et le deuxième au courant pulsé.

2.1.1. Etude en courant continu

2.1.1.1. Etude sur des alimentations en courant commerciales

Une étude a été réalisée sur le courant électrique continu délivré par trois alimentations commerciales dédiées à l'alimentation de LED, de puissances électriques comprises, entre 1 et 3 W. L'objectif de cette étude était l'examen, d'une part, de la stabilité du courant délivré par ce type d'alimentation en fonction du temps, et d'autre part, de l'exactitude des données constructeur (écarts de courant entre la valeur nominale donnée par les données constructeur et par les mesures réelles). Ces informations nous seront utiles par la suite, pour étudier les variations des mesures radiométriques et colorimétriques engendrées par différentes configurations d'alimentation en courant continu des LED.

2.1.1.1.1. Dispositif expérimental

Le schéma de la figure 3.29 représente le montage mis en place pour cette étude. Il est composé d'une alimentation en courant continu commerciale, alimentée sur une prise secteur 220 V.

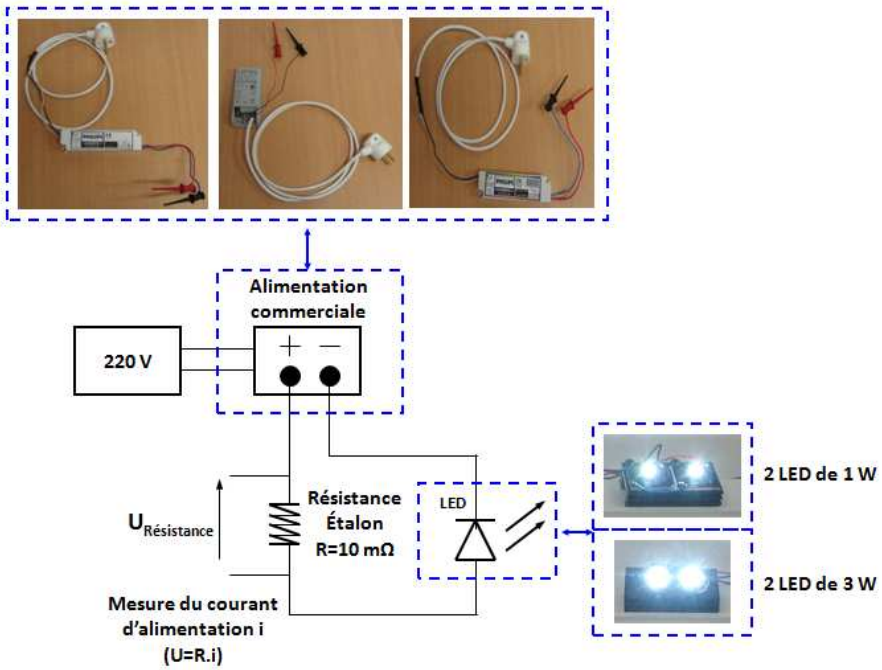


Fig. 3.29. - Schéma du banc permettant l'étude d'alimentations commerciales dédiées aux LED de puissance.

Trois type d'alimentations commerciales ont été successivement étudiées :

- LEDlight de Lumotech pour l'alimentation en série de une à huit LED de 1 W alimentées en 350 mA, ou de une à six LED de 3 W en 700 mA, ou bien encore de une à seize LED de 1 W en 700 mA branchées en parallèle ;

- Xitanium de Philips (12 W - 0,35 A) pour l'alimentation en série de une à huit LED de 1 W en 350 mA ;
- Xitanium de Philips (17 W - 0,70 A) pour l'alimentation en série ou en parallèle de une à douze LED de 1 W ou 3 W en 350 mA ou 700 mA.

Toutes les valeurs nominales de courant données pour ces alimentations sont des valeurs fixes préréglées.
Dans la configuration du banc, deux systèmes de deux LED blanches de 1 W ou 3 W, branchées en série, et montées sur un dissipateur thermique en aluminium anodisé, sont utilisés en fonction de l'alimentation étudiée. Le courant délivré par l'alimentation est déterminé par la mesure de la tension aux bornes d'une résistance étalon quatre fils de 10 mΩ, de marque CROPICO, branchée en série dans le circuit. L'incertitude-type relative sur la mesure du courant électrique a été estimée à 0,04%.

2.1.1.1.2. Résultats

Pour l'alimentation Lumotech, nous avons observé sur la mesure du courant des régimes transitoires de une heure et vingt cinq minutes pour un courant de 350 mA, et de une heure pour un courant de 700 mA (fig. 3.30). Après l'établissement d'un régime stationnaire, la stabilité relative à un écart-type du courant est de 0,015% sur une période de six heures pour les deux valeurs de courant. L'écart relatif de la valeur moyenne du courant mesuré, par rapport à la valeur nominale, est de - 0,6%, en 350 mA, et de -2,4% en 700 mA (les spécifications constructeurs disponibles ne donnent aucune information sur ce point précis).

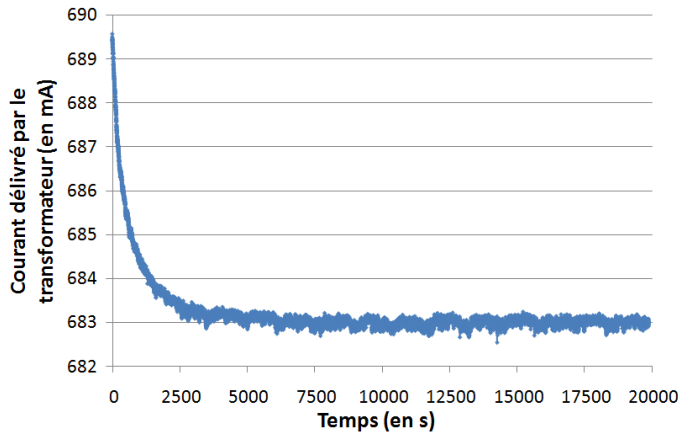


Fig. 3.30. - Régime transitoire de l'alimentation Lumotech (700 mA).

Pour l'alimentation Xitanium de Philips (12 W - 0,35 A), aucun régime transitoire n'a été observé. La stabilité relative à un écart-type du courant est de 0,14% sur une période de sept heures. L'écart relatif de la valeur moyenne du courant mesuré par rapport à la valeur nominale est de + 0,6% (données constructeur : ± 5%). Des mesures de répétabilité ont également été effectuées sur cette alimentation. Cinq séries de mesures de quinze minutes ont été effectuées. Entre chaque série il y avait un temps d'attente de quinze minutes. L'écart-type relatif de répétabilité sur la valeur moyenne de ces cinq mesures (notée de *a* à *e* sur la figure 3.31), étalées sur une durée totale de deux heures et quinze minutes, est de 0,03%.

Pour l'alimentation Xitanium de Philips (17 W - 0,70 A), un régime transitoire de vingt cinq minutes a été observé. Après l'établissement d'un régime stationnaire, la stabilité relative à un écart-type est de 0,04% sur une période de six heures. L'écart de la valeur moyenne du courant par rapport à la valeur nominale est de + 4,3% (données constructeur : ± 5%).

En guise de conclusion, les mesures ont montré que l'exactitude du courant est inférieure ou égale à ± 5% et que la stabilité relative du courant, en régime stationnaire, est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4}.

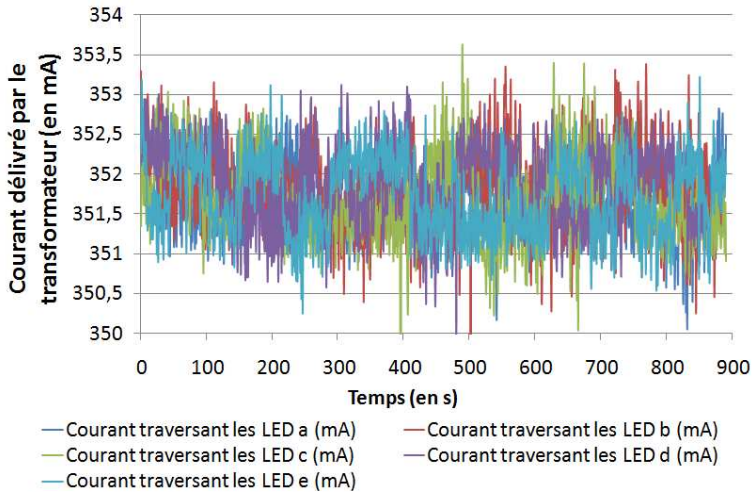


Fig. 3.31. - Mesures de répétabilité sur l'alimentation Xitanium (12 W - 0,35 A).

2.1.1.2. Variations autour du courant nominal

Une étude sur les variations des fonctions de répartition spectrale et sur les paramètres colorimétriques des éclairages à LED de la cabine à lumière a été effectuée, en fonction du courant continu d'alimentation dans une gamme de ± 5% et ± 15% autour du courant nominal de 350 mA.

2.1.1.2.1. Dispositif expérimental

Le schéma de la figure 3.32 présente le montage mis en œuvre pour l'alimentation en courant continu des éclairages à LED. Nous utilisons une alimentation stabilisée en courant, de marque Agilent (modèle E3616A), qui permet de délivrer un courant de 0 à 1,7 A dans une gamme de tensions comprises entre 0 et 35 V. Le courant d'alimentation est mesuré à partir de la tension aux bornes d'une résistance étalon quatre fils de 10 mΩ branchée en série dans le circuit électrique.

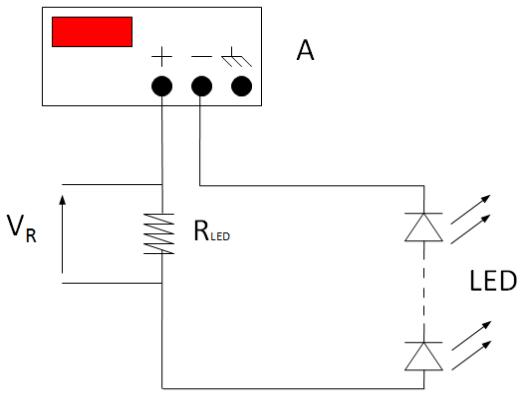


Fig. 3.32. - Montage d'alimentation en courant continu de LED.
A : alimentation stabilisée en courant, R_{LED} : résistance étalon de 10 mΩ.

La stabilité relative du courant d'alimentation des LED pour ce montage est typiquement de l'ordre de quelques 10^{-5}. L'incertitude-type relative sur la mesure du courant électrique a été estimée à 0,04%.

2.1.1.2.2. Résultats

Les figures 3.33 et 3.34 montrent qu'une augmentation (ou une diminution) du courant d'alimentation des LED de puissance engendre globalement une augmentation (ou une diminution) du flux émis, avec cependant, des nuances suivant la zone spectrale.
Des stabilités relatives du courant de 10^{-3} et 10^{-4} donnent respectivement, sur les coordonnées chromatiques, des variations inférieures à environ 10^{-6} et 10^{-5} et sur la température de couleur proximale des variations de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} K, et ceci, quel que soit le type d'éclairage à LED.

Des exactitudes de l'ordre de ± 5% et de ± 15% donnent des variations linéaires (fig. 3.35) sur les coordonnées chromatiques de l'ordre de quelques 10^{-4} dans le premier cas, et de quelques 10^{-4} à quelques 10^{-3} dans le second cas. Les variations sur la température de couleur proximale sont inférieures à la dizaine de kelvin dans le premier cas, et dans le second cas, elles sont comprises entre 10 et 40 K. Pour les indices particuliers de rendu des couleurs les écarts sont en moyenne, dans le premier cas, de 0,2, et dans le second cas, de 0,3.

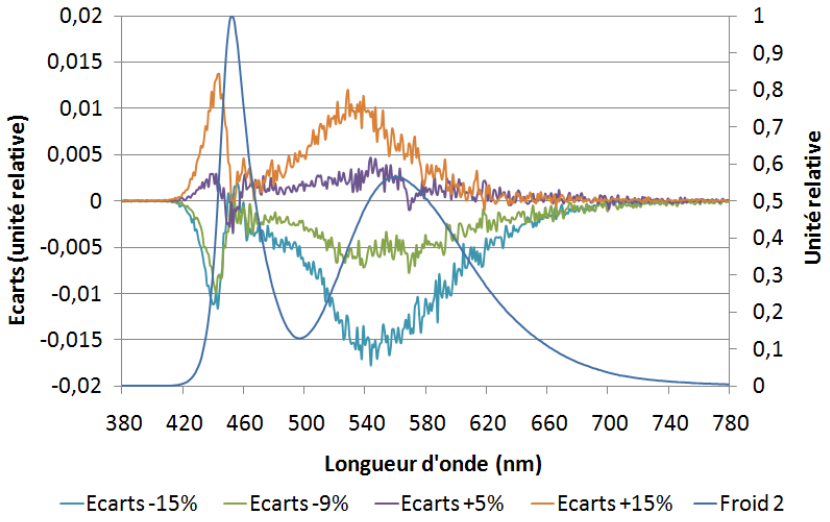


Fig. 3.33. - Evolution du spectre de l'éclairage blanc froid 2 en fonction de l'écart de courant par rapport au courant nominal de 350 mA.

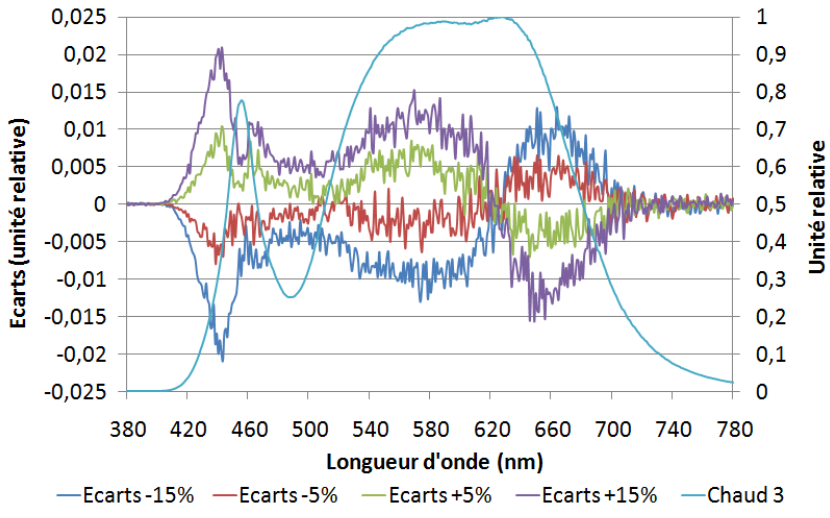


Fig. 3.34. - Evolution du spectre de l'éclairage blanc chaud 3 en fonction de l'écart de courant par rapport au courant nominal de 350 mA.

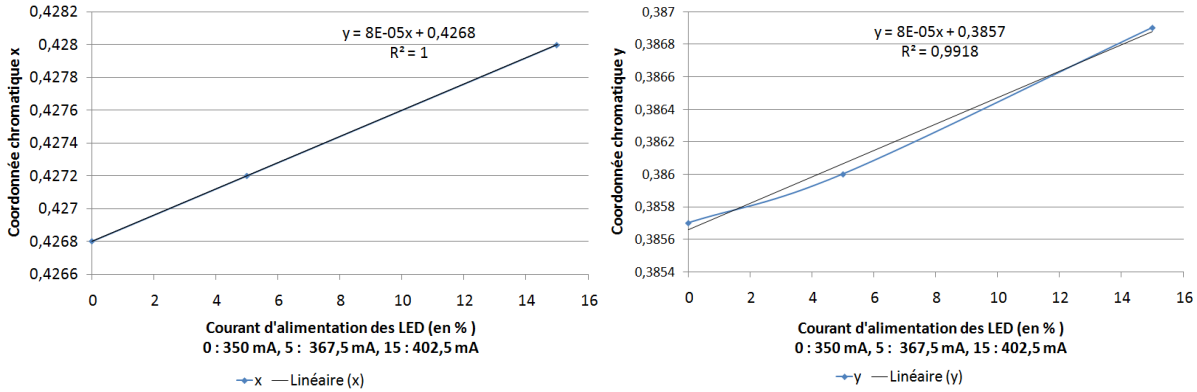


Fig. 3.35. - Exemple représentatif de variations linéaires sur les coordonnées chromatiques *x* et *y* en fonction du courant continu d'alimentation pour l'éclairage à LED blanc chaud 5.

Les variations sur la température de couleur proximale ne sont pas significatives pour des valeurs de l'ordre de 10 à 20 K mais le sont pour des valeurs supérieures à 20 K, compte tenu de l'incertitude sur ce paramètre (tableaux 3.7 et 3.8). Pour les indices de rendu des couleurs, ces écarts ne sont pas significatifs si l'on prend en considération les incertitudes obtenues (tableaux 3.9 et 3.10).

Ces résultats montrent que les variations du flux spectrique et des paramètres colorimétriques, autour du courant nominal, sont très faibles.

2.1.2. Comparaisons entre courant continu et courant pulsé

2.1.2.1. Introduction

Une étude a été menée afin de mettre en évidence l'influence du mode d'alimentation (courant continu et pulsé) sur les fonctions de répartition spectrale et les paramètres colorimétriques des éclairages à LED.

Dans le cadre des mesures présentées dans cette partie, celles-ci ont été réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre référencé CS-2000, de marque Konica Minolta (fig. 3.36).

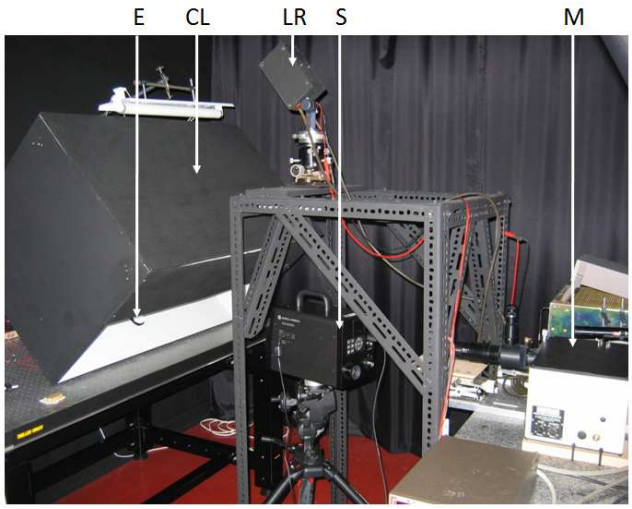


Fig. 3.36. - Banc de mesures spectrales relatives sur les éclairages à LED.
E : étalon blanc de réflexion diffuse, CL : cabine à lumière, LR : lampe tungstène halogène de référence, S : spectroradiomètre CS-2000, M : monochromateur M300.

Cet instrument a été choisi afin de réduire les temps de mesures. En effet, pour le spectroradiomètre Bentham du banc de référence, configuré pour répondre à nos besoins, le temps de mesure d'un seul spectre est proche de vingt minutes. Ce temps est de dix secondes environ pour le CS-2000 dans une configuration équivalente. Pour les résultats présentés dans cette partie, le nombre de spectres qui ont été mesurés est supérieur à cent cinquante.

Ce spectroradiomètre permet de couvrir le même domaine spectral (380-780 nm) que le Bentham et définit sur l'objet, une surface équivalente à celle définie par notre banc de référence. Le détecteur utilisé est une barrette CCD asservie en température par un élément Peltier.

La largeur de bande de sa fonction de transfert est de 5 nm. Or, le signal mesuré par le spectroradiomètre est proportionnel au résultat d'un produit de convolution entre la valeur vraie du spectre de la source étudiée, et la fonction de transfert du monochromateur. Afin de valider les mesures réalisées par le CS-2000, des écarts de spectres mesurés sur les différents éclairages à LED, avec ce spectroradiomètre et le banc de référence ont été calculés. Ceux-ci ont été comparés avec les écarts de spectres calculés avant et après une simulation de convolution - effectuée sous labVIEW - avec une fonction de transfert triangulaire et symétrique de largeur de bande de 5 nm. Ceci a permis de mettre en évidence que les écarts étaient dus à la largeur de bande de la fonction de transfert comme le montrent les figures 3.37 et 3.38. Ces mesures indiquent l'indépendance du mesurande vis-à-vis de la technologie utilisée.

Il existe des différences entre les simulations et les mesures expérimentales telles que représentées sur les figures 3.37 et 3.38. Pour essayer de comprendre d'où provenaient ces différences, des mesures de fonctions de transfert du CS-2000 ont été effectuées à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure. Les mesures ont montré que la largeur à mi-hauteur et la symétrie de la fonction de transfert du CS-2000 varient en fonction de la longueur d'onde entre 4 et 5 nm environ.

Ce phénomène peut ainsi expliquer les quelques différences entre les mesures expérimentales et les simulations réalisées avec des fonctions de transfert triangulaires et symétriques (§ 2.2. Fonction de transfert du monochromateur).

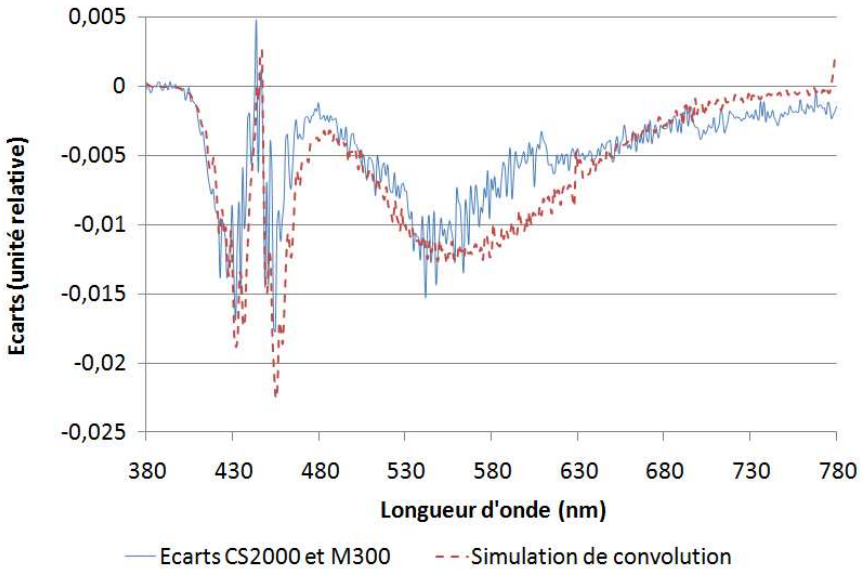


Fig. 3.37. - Ecarts sur les mesures spectrales relatives effectuées avec le CS-2000 et le banc de référence (M300) comparés aux écarts de spectres calculés avant et après des simulations de convolution avec une fonction de transfert de largeur de bande de 5 nm sur l'éclairage à LED blanc froid 1.

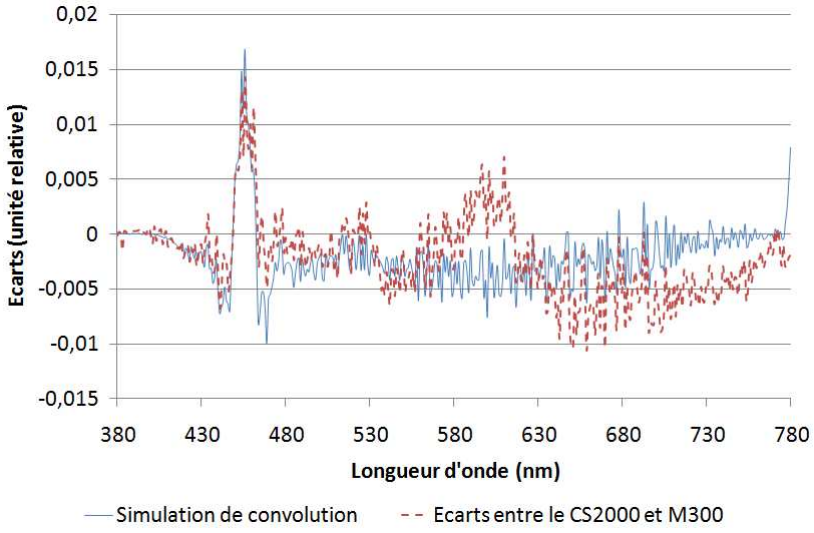


Fig. 3.38. - Ecarts sur les mesures spectrales relatives entre le CS-2000 et le banc de référence (M300) comparé aux écarts de spectres calculés avant et après des simulations de convolution avec une fonction de transfert de largeur de bande de 5 nm sur l'éclairage à LED blanc chaud 1.

2.1.2.2. Dispositifs expérimentaux

- Courant continu

Le dispositif expérimental est identique à celui représenté sur la figure 3.32.

- Courant pulsé

Nous avons choisi d'utiliser un composant électronique appelé « driver » de LED, de marque MAXIM référencé MAX16803, qui permet d'alimenter en courant pulsé (Pulse Width Modulation (PWM)) un système de une à dix LED branchées en série avec une amplitude maximale du courant de 350 mA. Il s'agit d'un composant monté en surface (CMS) de 5 mm de côté et de 1 mm d'épaisseur dont l'élément de base est un transistor (fig. 3.39 droite). Le câblage du composant respecte les spécifications constructeur conformément au schéma de la figure 3.39 (gauche). Une résistance de rappel *R*, entre la masse *GND*, et l'entrée *DIM*, augmente la stabilité électrique du dispositif.

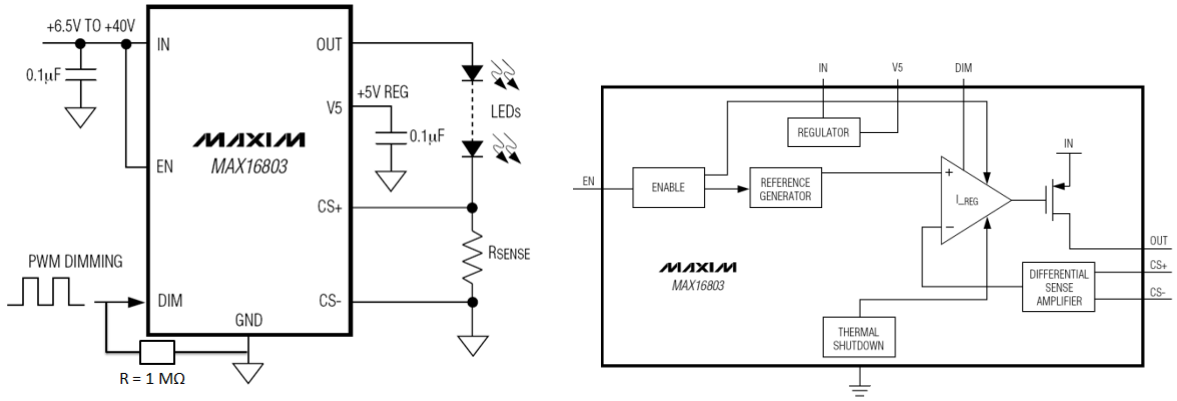


Fig. 3.39. - A gauche : montage d'alimentation en courant pulsé de LED.
A droite : diagramme fonctionnel de l'architecture interne du composant MAX16803 [MAX].
IN correspond à la tension d'alimentation et est fonction du nombre de LED branchées sur la sortie OUT du composant, R_{SENSE} a été choisie égale à 0,5 Ω, DIM est un signal TTL 0-5 V.

Pour générer le signal en créneaux, un générateur de fonction, de marque Française d'instrumentation référencé 5280A, délivre un signal TTL dont la fréquence varie de 1 µHz à 100 kHz et le rapport cyclique de 1 à 99 %. Des mesures de stabilité relative du courant moyen d'alimentation des LED ont été effectuées, à différentes fréquences et pour plusieurs rapports cycliques et, à chaque fois sur une durée de dix minutes grâce à la mesure de la tension aux bornes de la résistance R_{SENSE} réalisée à l'aide d'un multimètre Keithley 2002. Les résultats donnent des stabilités relatives comprises entre 0,15 et 0,45% environ. L'incertitude-type relative sur la mesure du courant électrique moyen est estimée égale à 0,5%. D'après les spécifications constructeur, l'exactitude du courant délivré en fonction de la valeur du rapport cyclique du signal TTL est de ± 3,5%. Des mesures ont permis de valider cette information.

2.1.2.3. Résultats

Les variations des fonctions de répartition spectrale des éclairages à LED ont été mesurées et les variations résultantes sur les paramètres photométriques et colorimétriques ont été calculées pour différents courants moyens et pour les deux modes d'alimentation.

Dans le cadre du montage en courant pulsé, des mesures spectrales ont été effectuées pour trois fréquences du signal TTL de 100, 500 et 1000 Hz. Pour chacune de ces fréquences, des mesures ont été réalisées pour sept rapports cycliques de 5, 10, 30, 50, 70, 90 et 99% correspondant à des courants moyens d'environ 17,5, 35, 105, 175, 245, 315 et 350 mA à l'exactitude de ± 3,5% près, donnée par le constructeur.
Pour l'alimentation en courant continu des mesures spectrales ont été faites pour des courants moyens de 17,5, 35, 105, 175, 245, 315 et 350 mA.

Les **variations spectrales** majeures résident dans le choix du mode d'alimentation des LED. Les mesures ont montré que les évolutions du flux spectrique dans le cadre d'une alimentation pulsée étaient beaucoup moins importantes que celles obtenues dans le cadre d'une alimentation continue, de l'ordre d'un facteur dix au maximum (figures 3.40 et 3.41). Ces variations spectrales sont contenues essentiellement dans deux domaines spectraux. Celui de l'émission propre du semi-conducteur, dans la zone bleue du spectre visible, autour de 420-480 nm, et celui de l'émission du luminophore de la LED, dans la zone jaune-orange, autour de 510-650 nm. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Marc Dyble en 2005 [DYB 05]. On souligne que des variations spectrales se produisent sur le premier front montant des spectres dans le cas du courant continu alors qu'il s'agit plutôt du premier front descendant dans le cas du courant pulsé. De plus, aucune évolution significative des spectres en fonction de la fréquence du signal TTL, en mode pulsé, n'a été observée.

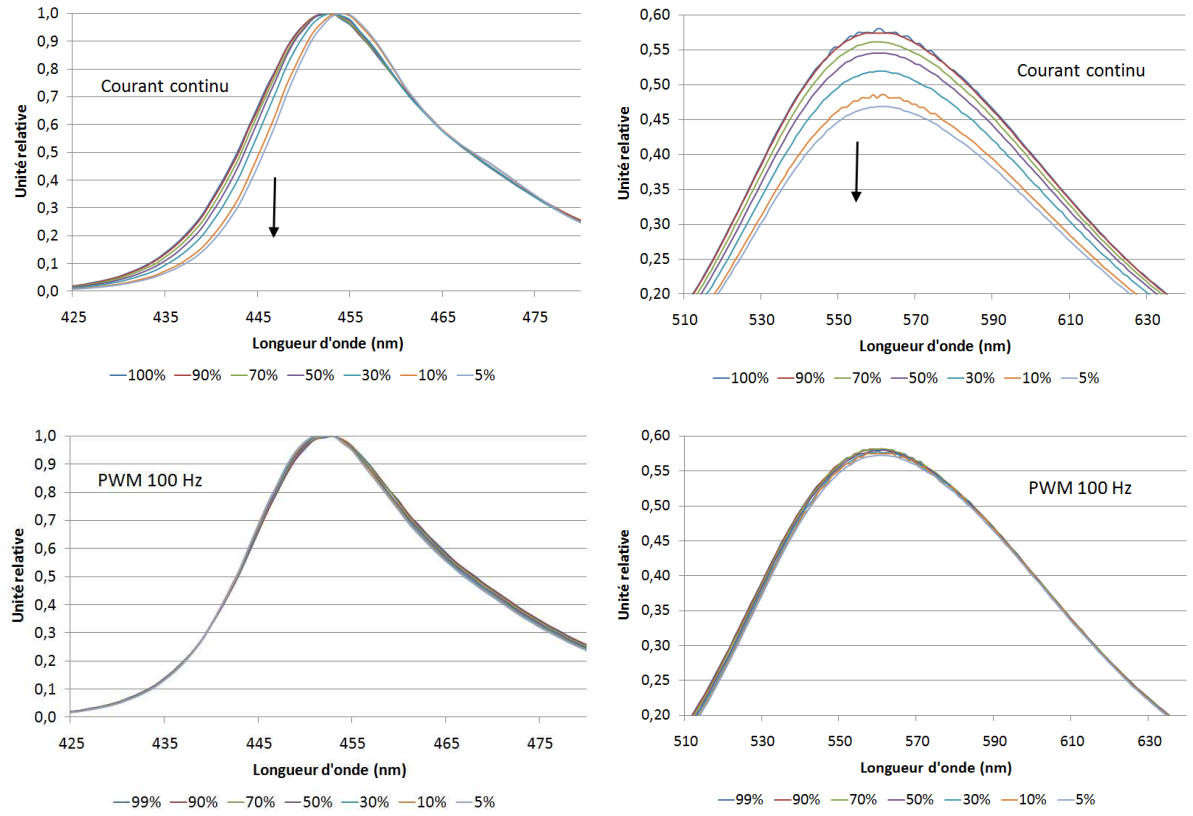


Fig. 3.40. - Spectres de l'éclairage blanc froid 2 dans le visible, entre 425 et 475 nm et entre 510 et 630 nm, lorsque celui-ci est alimenté en courant continu et en pulsé.

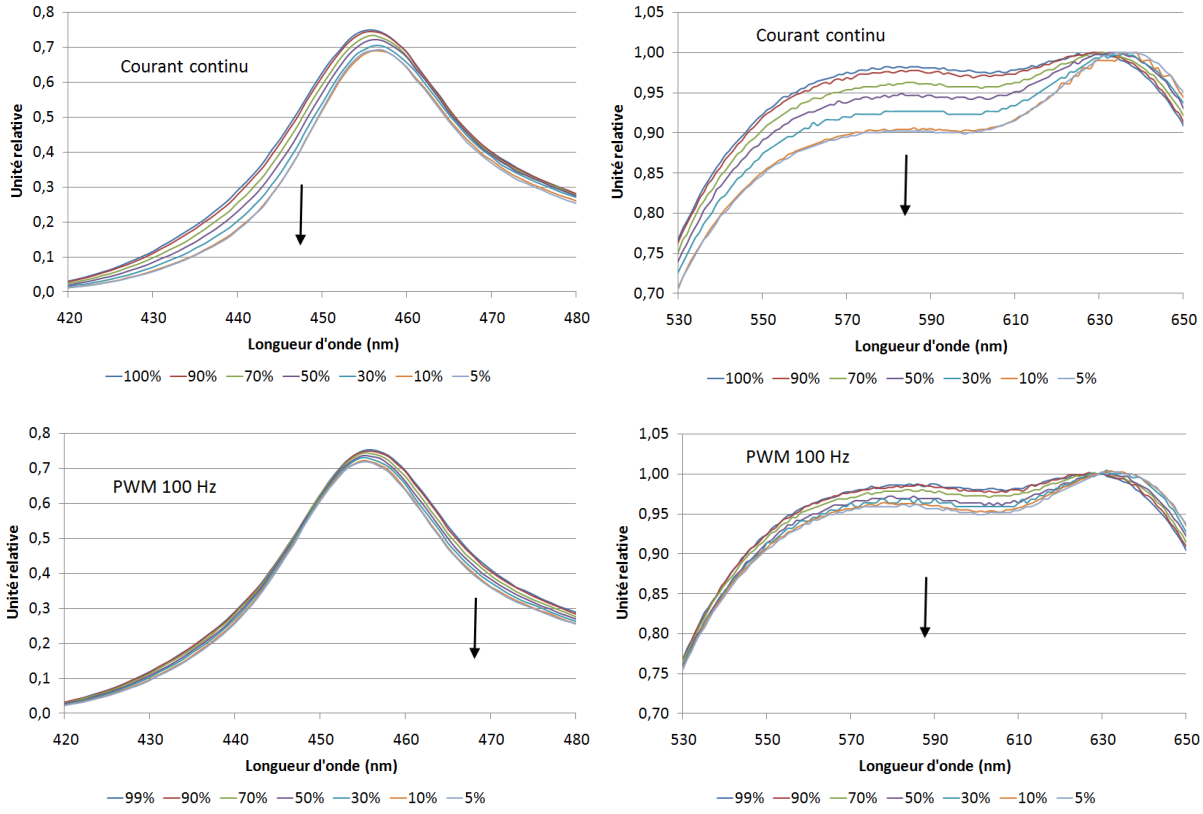


Fig. 3.41. - Spectres de l'éclairage blanc chaud 3 dans le visible, entre 420 et 480 nm et entre 530 et 650 nm, lorsque celui-ci est alimenté en courant continu et en pulsé.

Le **flux lumineux**, calculé d'après la fonction d'efficacité spectrale relative de l'œil humain $V(\lambda)$, et d'après les spectres mesurés, est représenté sur les graphiques de la figure 3.42, en fonction du courant moyen dans les deux modes d'alimentation, et pour un éclairage. Il apparaît que l'évolution du flux est plus linéaire pour une alimentation en courant pulsé que pour une alimentation en courant continu. Ce résultat obtenu pour l'ensemble des éclairages de la cabine à lumière, est en accord avec ceux présentés par Yimin Gu en 2006 [GU 06].

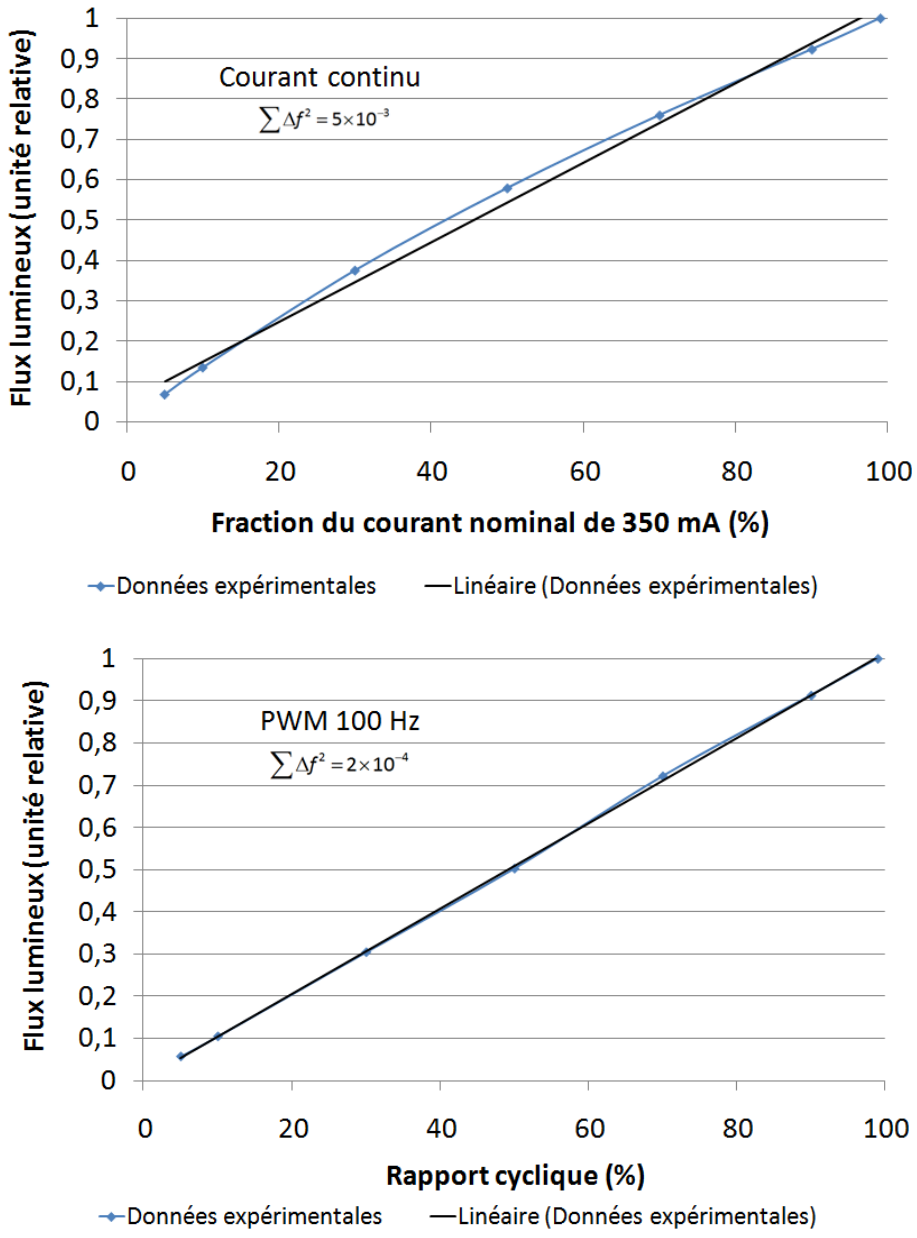


Fig. 3.42. - Evolution du flux lumineux en fonction du courant moyen d'alimentation (continu et pulsé) pour l'éclairage de type blanc chaud 3. $\sum \Delta f^2$ correspond à la somme des écarts, entre les données expérimentales et l'ajustement linéaire de ces données, au carré.

Les évolutions des **paramètres colorimétriques** (coordonnées chromatiques x et y, température de couleur proximale T_{cp}, et indices de rendu des couleurs) ont été étudiées. Les figures 3.43 à 3.45 représentent les écarts Δx, Δy et ΔT_{cp} sur les paramètres colorimétriques calculés à partir des mesures effectuées à 5% et à 100% environ du courant moyen nominal de 350 mA pour chacun des éclairages.

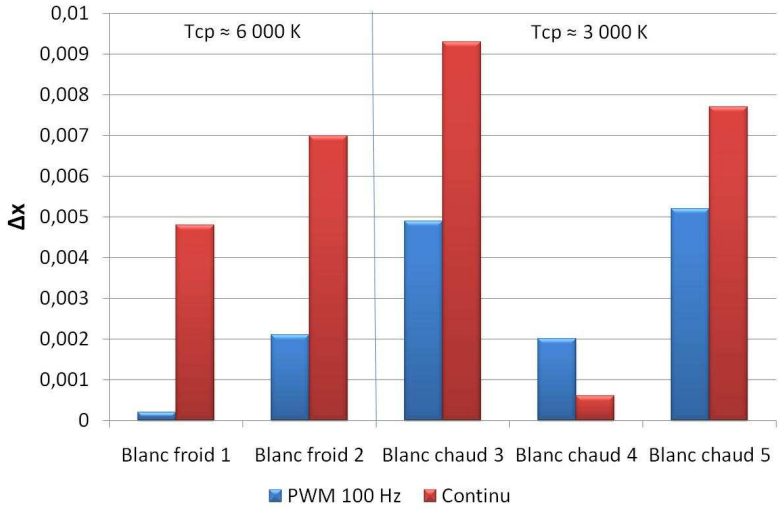


Fig. 3.43. - Ecarts Δ*x* sur la coordonnée chromatique *x* de l'espace CIE 1931 entre 5% et 100% du courant maximal de 350 mA.

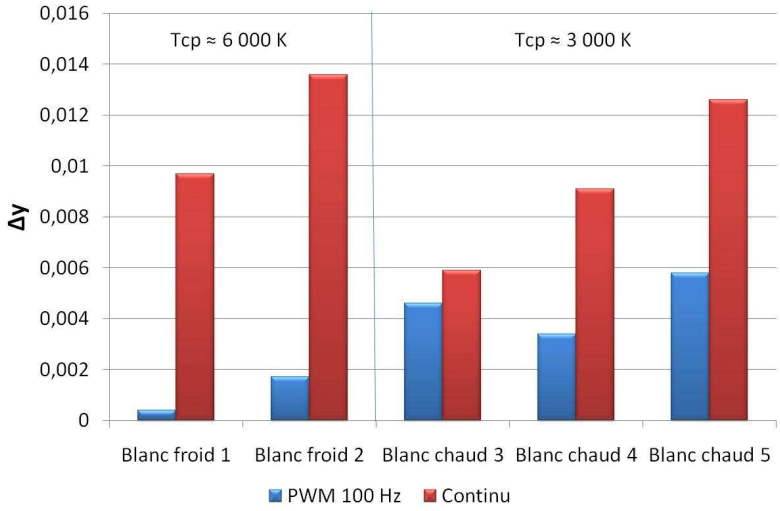


Fig. 3.44. - Ecarts Δ*y* sur la coordonnée chromatique *y* de l'espace CIE 1931 entre 5% et 100% du courant maximal de 350 mA.

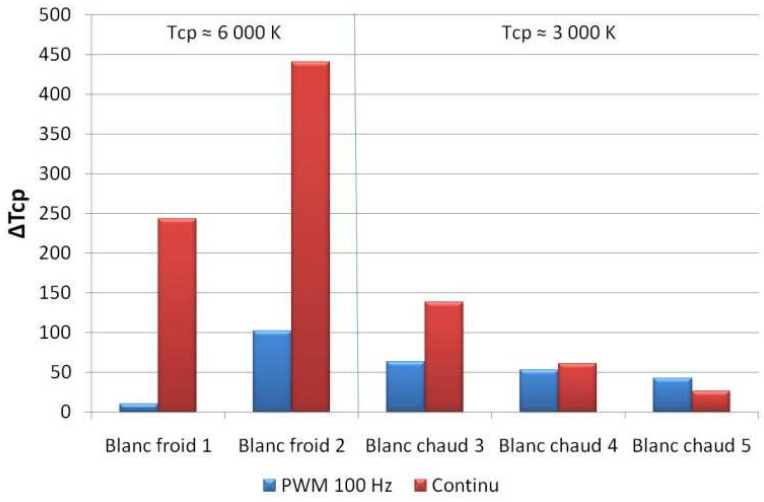


Fig. 3.45. - Ecarts ΔT_{cp} sur la température de couleur proximale entre 5% et 100% du courant maximal de 350 mA.

Les figures 3.46 et 3.47 représentent les écarts calculés sur les indices de rendu des couleurs de R_1 à R_{14} dans les mêmes conditions, pour deux éclairages à LED représentatifs.

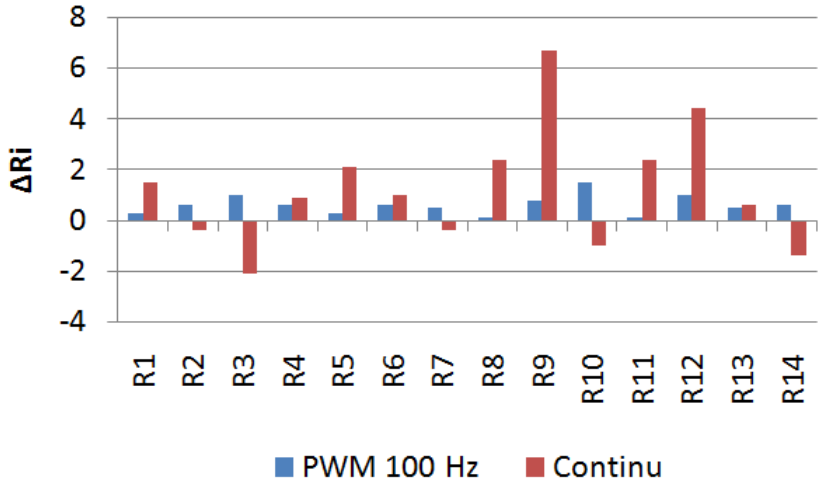


Fig. 3.46. - Ecarts sur les indices de rendu des couleurs entre 5% et 100% du courant maximal de 350 mA pour l'éclairage blanc froid 2.

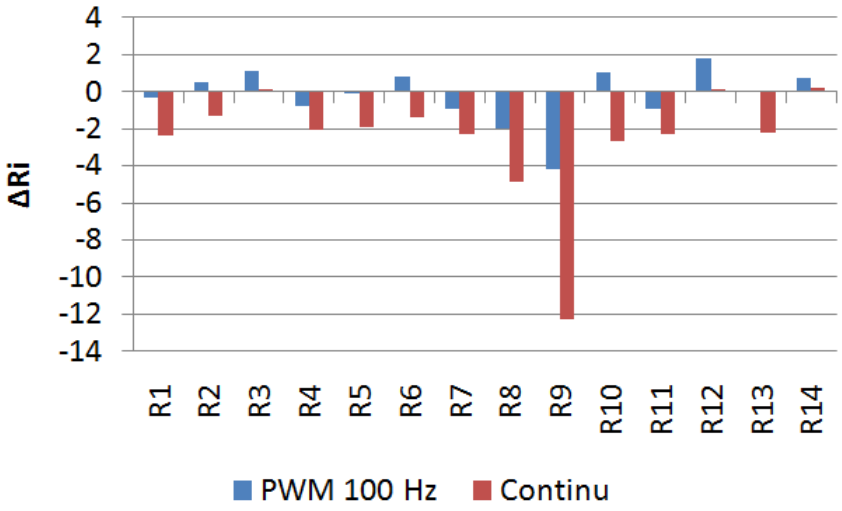


Fig. 3.47. - Ecarts sur les indices de rendu des couleurs entre 5% et 100% du courant maximal de 350 mA pour l'éclairage blanc chaud 3.

De ces graphiques, il est possible de conclure que l'utilisation d'une alimentation en courant pulsé procure globalement, une meilleure stabilité des paramètres colorimétriques que l'alimentation en courant continu.

Les incertitudes calculées pour les mesures effectuées avec le CS-2000 reposent sur le même principe que celles calculées pour le banc de référence. Seules les incertitudes dues à la largeur de bande ont été ajustées. Le tableau 3.12 donne les incertitudes associées aux paramètres colorimétriques, déduits des mesures spectrales effectuées avec le CS-2000. Ces valeurs peuvent être comparées aux valeurs des tableaux 3.5 à 3.10. Il est ainsi possible de juger de l'influence de la largeur de bande du spectroradiomètre, sur les paramètres colorimétriques des différents éclairages à LED. La largeur de bande de 5 nm ne modifie pas les incertitudes sur les paramètres des éclairages à LED, de type blanc chaud. Par contre, elle les modifie pour les éclairages à LED, de type blanc froid, d'un facteur au maximum égal à deux.

Paramètres colorimétriques	Incertitude-type				
	Blanc froid 1	**Blanc froid 2**	**Blanc chaud 3**	**Blanc chaud 4**	**Blanc chaud 5**
x	0,0003	0,0004	0,0002	0,0002	0,0002
y	0,0005	0,0006	0,0003	0,0002	0,0003
T_{cp}	16	22	4	3	3
R_1	1,2	1,3	0,6	0,7	0,7
R_2	1,1	1,2	0,6	0,7	0,6
R_3	0,8	0,6	0,5	0,3	0,4
R_4	0,6	1,0	0,5	0,6	0,5
R_5	0,9	1,1	0,5	0,6	0,6
R_6	1,2	1,4	0,6	0,6	0,7
R_7	1,2	1,1	0,6	0,7	0,7
R_8	1,1	1,2	0,7	0,7	0,8
R_9	0,8	1,0	0,5	0,5	0,5
R_{10}	1,4	1,6	0,8	1,0	0,9
R_{11}	0,6	0,8	0,4	0,5	0,4
R_{12}	0,6	0,8	0,4	0,5	0,4
R_{13}	1,5	1,7	0,9	1,0	0,9
R_{14}	0,6	0,4	0,3	0,2	0,3
R_a	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2
R_{a_14}	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2

Tab. 3.12. - Incertitude-type de mesure, sur les paramètres colorimétriques des éclairages à LED, effectuée avec le spectroradiomètre CS-2000.

Les incertitudes sur ces paramètres ont été calculées à partir de mesures effectuées pour une valeur de courant continu de 350 mA. Comme la stabilité relative du courant moyen est peu influencée par le rapport cyclique en courant pulsé, alors les incertitudes présentées sont celles de l'ensemble des résultats.

2.2. Fonction de transfert du monochromateur

2.2.1. Principe

La largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert d'un monochromateur influence la qualité des mesures spectrales effectuées. En effet, le signal mesuré par le détecteur (corrigé de la sensibilité du spectroradiomètre) correspond à un produit de convolution entre le spectre de la source étudiée et la fonction de transfert du monochromateur.
Ainsi, l'étude de la convolution entre ces deux paramètres permet d'estimer l'influence de la fonction de transfert du monochromateur *H*, sur le spectre des sources à LED étudiées *S*.

Le produit de convolution se calcul de la façon suivante :

$$(S * H)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(x-t).H(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t).H(x-t)dt \qquad (3.34)$$

Pour nous affranchir du calcul complet des intégrales, nous allons utiliser la propriété indiquant que le produit de convolution de deux fonctions est égal à la transformée de Fourier inverse (TF^{-1}) du produit des transformées de Fourier (TF) des deux fonctions, tel que :

$$(S * H)(x) = TF^{-1}(TF(S).TF(H)) \qquad (3.35)$$

Pour pouvoir réaliser des simulations de convolution avec des fonctions de transfert de différentes largeurs à mi-hauteur, un programme de simulation a été développé à l'aide du logiciel labVIEW. Les fonctions de transfert utilisées pour les simulations sont parfaitement triangulaires et symétriques et ont des largeurs à mi-hauteur comprises entre 1 et 16 nm. La figure 3.48 donne un exemple représentatif d'une fonction de transfert simulée.

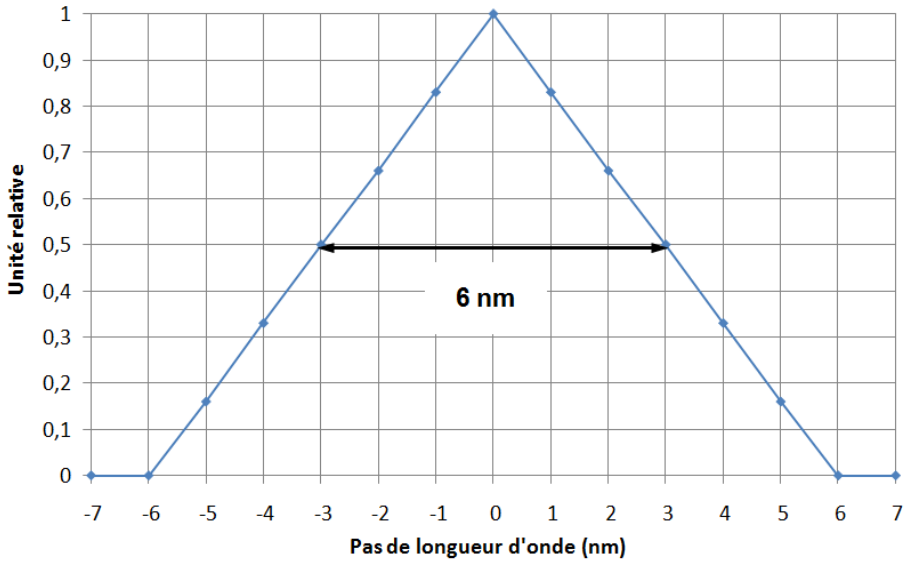
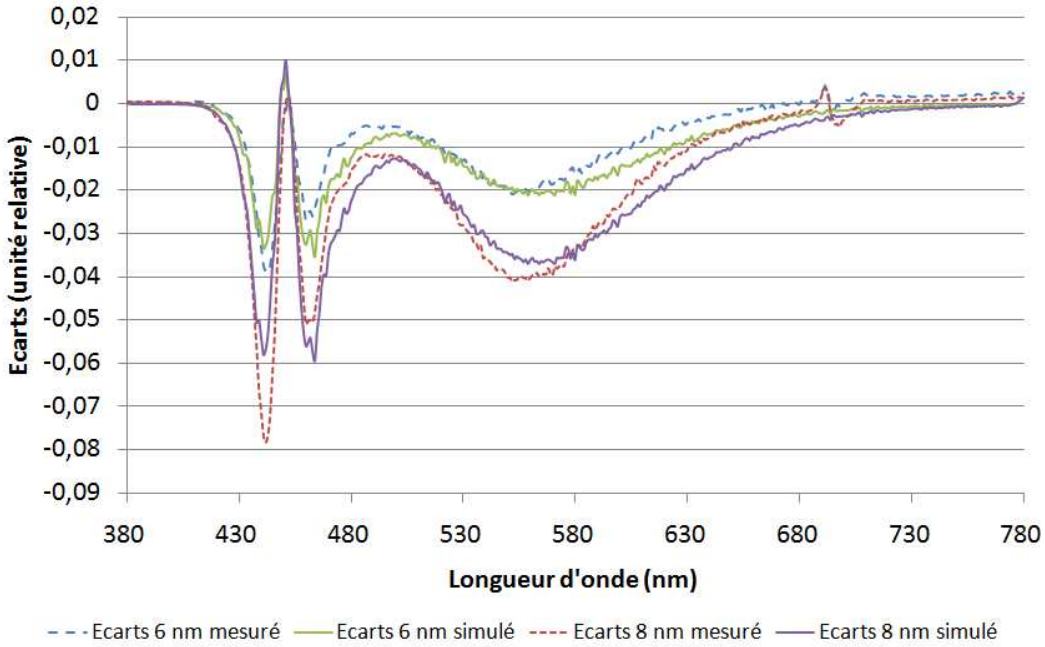


Fig. 3.48. - Exemple de fonction de transfert simulée de largeur à mi-hauteur égale à 6 nm.

2.2.2. Résultats

A partir des simulations de convolution, les écarts sur les spectres avant et après convolution, ont été calculés. Ensuite, les spectres des sources à LED ont été mesurés expérimentalement avec des largeurs de bande des fonctions de transfert de 4, 6, 8 et 14 nm. Ces mesures avaient pour objectif de pouvoir comparer les résultats expérimentaux aux résultats théoriques. Les figures 3.49 et 3.50 donnent un exemple représentatif des résultats obtenus à partir de mesures effectuées avec le spectroradiomètre Bentham.



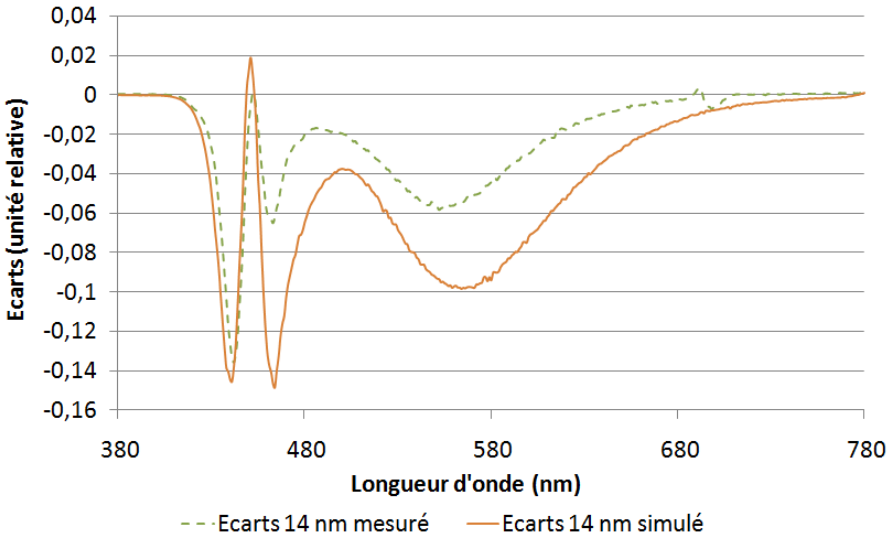
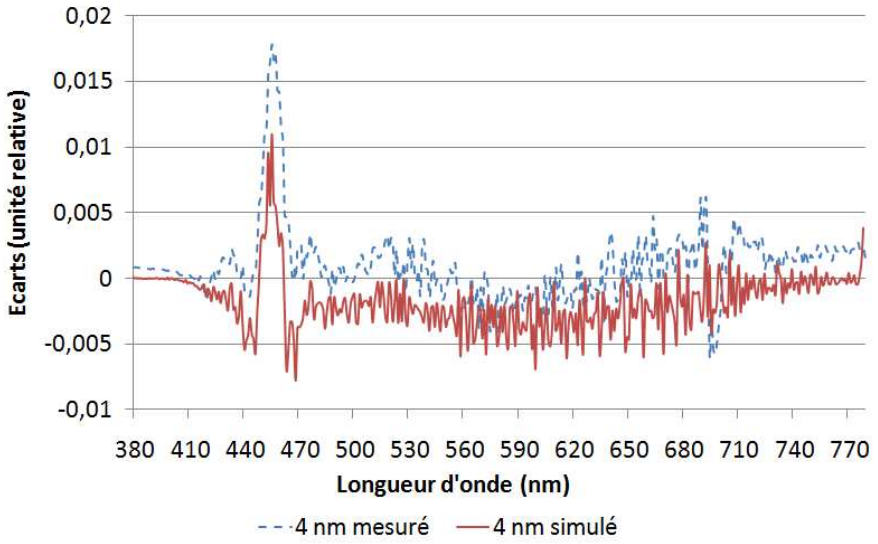
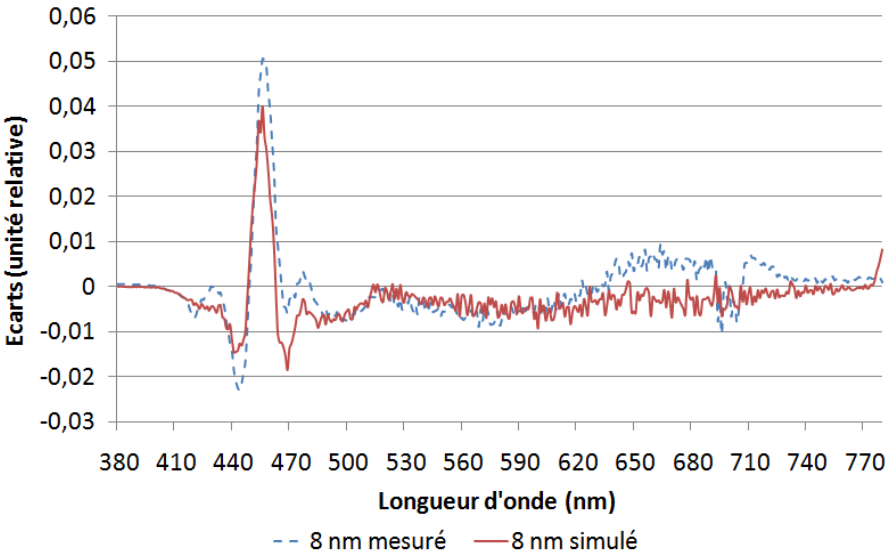


Fig. 3.49. - Comparaison des écarts obtenus, avant et après convolution, par l'expérience et par simulation, pour des largeurs de bande de 6, 8 et 14 nm sur le spectre de l'éclairage à LED blanc froid 2.





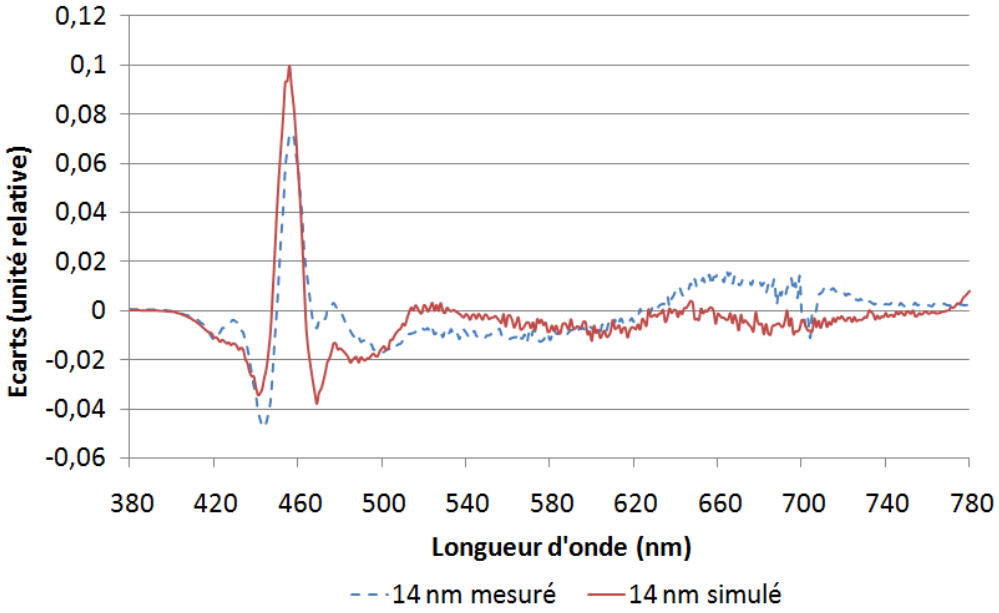


Fig. 3.50. - Comparaison des écarts obtenus, avant et après convolution, par l'expérience et par simulation pour des largeurs de bande de 4, 8 et 14 nm sur le spectre de l'éclairage à LED blanc chaud 3.

Sur les figures 3.49 il est possible de voir une dissymétrie dans les résultats des écarts mesurés par rapport à ceux simulés entre 430 et 480 nm environ. Dans la réalité, les fonctions de transfert du monochromateur Bentham ne sont pas parfaitement triangulaires et symétriques comme celles qui ont été utilisées dans les simulations. Leur symétrie, ainsi que leur largeur à mi-hauteur, peuvent évoluer en fonction de la longueur d'onde. Afin de lever les doutes concernant cette dissymétrie dans les écarts provenant des simulations, d'autres simulations ont été réalisées avec des fonctions de transfert triangulaires et dissymétriques (fig. 3.51) proches d'une fonction de transfert pouvant être mesurée expérimentalement, à une longueur d'onde donnée.

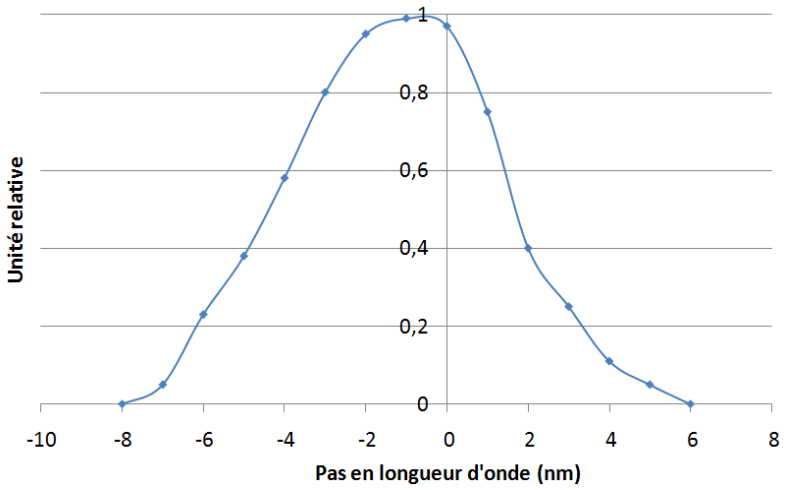


Fig. 3.51. - Fonction de transfert triangulaire et dissymétrique de largeur à mi-hauteur égale à 6 nm.

La figure 3.52 présente un exemple de résultat obtenu après convolution avec cette fonction. De cette manière, il est possible d'affirmer que cette dissymétrie des écarts est en grande partie imputable à une dissymétrie de la fonction de transfert.

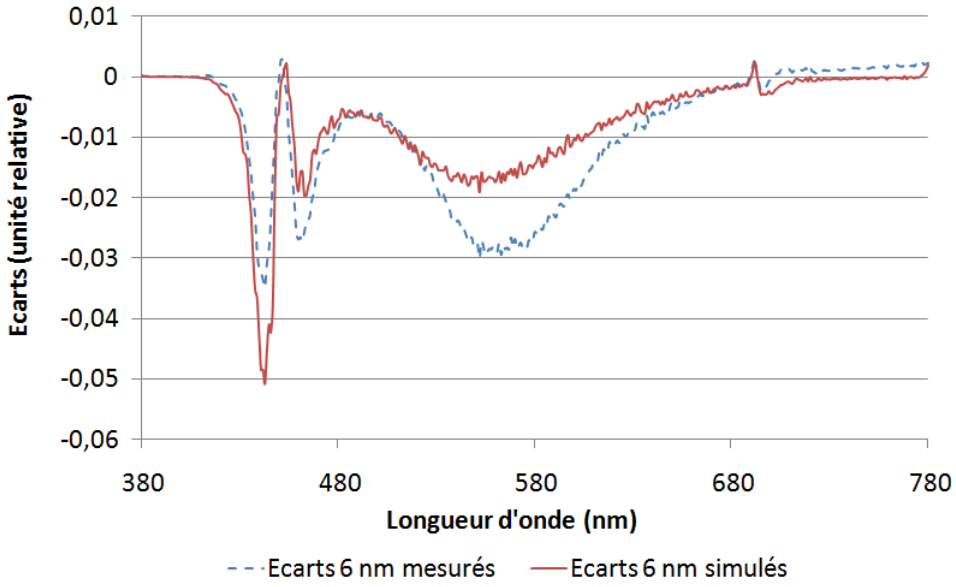


Fig. 3.52. - Comparaison des écarts obtenus, avant et après convolution, par l'expérience et par simulation, pour une largeur de bande triangulaire et dissymétrique de 6 nm, sur le spectre de l'éclairage à LED blanc froid 2.

Au vu des résultats obtenus, les simulations sont considérées comme acceptables, notamment pour les faibles largeurs de bande. Pour des largeurs de bande plus importantes, et pour les éclairages de type blanc froid, les résultats issus des simulations surestiment les écarts.
L'influence de la largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert sur les paramètres colorimétriques peut ainsi être évaluée à partir des résultats des simulations pour chacun des éclairages à LED (tableaux 3.13 à 3.17).

Blanc froid 1						
Paramètres colorimétriques	**Ecarts 2 nm**	**Ecarts 4 nm**	**Ecarts 6 nm**	**Ecarts 8 nm**	**Ecarts 14 nm**	**Ecarts 16 nm**
x	0,0000	0,0001	0,0002	0,0003	0,0010	0,0013
y	0,0001	0,0002	0,0004	0,0008	0,0022	0,0029
T_{cp}	-1	-5	-11	-19	-58	-75
R_1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
R_2	0,0	0,2	0,3	0,4	1,0	1,2
R_3	0,1	0,3	0,5	0,7	1,8	2,3
R_4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,5
R_5	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,1
R_6	0,0	0,0	0,1	0,3	1,1	1,4
R_7	0,0	0,0	0,1	0,3	0,9	1,2
R_8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
R_9	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
R_{10}	0,2	0,4	0,6	0,9	2,3	3,0
R_{11}	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3
R_{12}	0,0	0,1	0,3	0,7	2,2	2,8
R_{13}	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8
R_{14}	0,1	0,2	0,3	0,4	1,0	1,3
R_a	0,0	0,1	0,1	0,2	0,7	0,9

Tab. 3.13. - Influence de la largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert sur les paramètres colorimétriques pour l'éclairage blanc froid 1.

Blanc froid 2						
Paramètres colorimétriques	**Ecarts 2 nm**	**Ecarts 4 nm**	**Ecarts 6 nm**	**Ecarts 8 nm**	**Ecarts 14 nm**	**Ecarts 16 nm**
x	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,0006	0,0008
y	0,0000	0,0001	0,0003	0,0005	0,0016	0,0021
T_{cp}	-1	-3	-7	-13	-39	-51
R_1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,6	0,7
R_2	0,0	0,1	0,2	0,3	0,7	0,8
R_3	0,0	0,1	0,2	0,4	1,1	1,4
R_4	0,1	0,0	0,1	0,2	0,6	0,8
R_5	0,0	0,0	0,1	0,2	0,7	1,0
R_6	0,0	0,1	0,2	0,4	1,3	1,7
R_7	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
R_8	0,0	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4
R_9	0,0	0,1	0,3	0,4	1,3	1,6
R_{10}	0,0	0,3	0,5	0,7	2,0	2,5
R_{11}	0,0	-0,1	0,0	0,2	0,8	1,1
R_{12}	0,1	0,3	0,7	1,3	3,8	4,9
R_{13}	-0,1	0,1	0,2	0,2	0,6	0,8
R_{14}	0,0	0,1	0,2	0,3	0,7	0,8
R_a	0,0	0,0	0,1	0,2	0,7	0,9

Tab. 3.14. - Influence de la largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert sur les paramètres colorimétriques pour l'éclairage blanc froid 2.

Blanc chaud 3						
Paramètres colorimétriques	**Ecarts 2 nm**	**Ecarts 4 nm**	**Ecarts 6 nm**	**Ecarts 8 nm**	**Ecarts 14 nm**	**Ecarts 16 nm**
x	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,0005	0,0006
y	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003	0,0008	0,0011
T_{cp}	0	0	0	-1	-3	-3
R_1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
R_2	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4
R_3	0,0	0,1	0,2	0,3	0,7	0,9
R_4	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
R_5	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1
R_6	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,4	0,6
R_7	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1
R_8	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,3	-0,4
R_9	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,5	-0,7
R_{10}	0,0	0,2	0,3	0,4	0,8	1,0
R_{11}	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
R_{12}	0,0	0,1	0,4	0,7	2,1	2,7
R_{13}	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
R_{14}	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	0,5
R_a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2

Tab. 3.15. - Influence de la largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert sur les paramètres colorimétriques pour l'éclairage blanc chaud 3.

Blanc chaud 4						
Paramètres colorimétriques	**Ecarts 2 nm**	**Ecarts 4 nm**	**Ecarts 6 nm**	**Ecarts 8 nm**	**Ecarts 14 nm**	**Ecarts 16 nm**
x	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0003	-0,0004
y	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0004	0,0005
T_{cp}	1	1	2	3	8	11
R_1	-0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4
R_2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
R_3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
R_4	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,4	0,5
R_5	0,1	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5
R_6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
R_7	0,0	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6
R_8	0,0	0,2	0,3	0,3	0,7	0,8
R_9	0,0	0,1	0,2	0,4	1,0	1,2
R_{10}	-0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6
R_{11}	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,5	0,7
R_{12}	0,1	0,2	0,4	0,6	1,6	2,0
R_{13}	0,0	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5
R_{14}	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
R_a	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4

Tab. 3.16. - Influence de la largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert sur les paramètres colorimétriques pour l'éclairage blanc chaud 4.

Blanc chaud 5						
Paramètres colorimétriques	**Ecarts 2 nm**	**Ecarts 4 nm**	**Ecarts 6 nm**	**Ecarts 8 nm**	**Ecarts 14 nm**	**Ecarts 16 nm**
x	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0004	0,0005
y	0,0000	0,0001	0,0002	0,0004	0,0013	0,0018
T_{cp}	0	0	1	1	5	7
R_1	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4
R_2	0,0	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4
R_3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,5	0,7
R_4	0,0	-0,1	-0,1	0	0,1	0,2
R_5	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,2
R_6	0,1	0,0	0,0	0,1	0,4	0,6
R_7	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6
R_8	-0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,5
R_9	-0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8
R_{10}	-0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	1,0
R_{11}	0,1	-0,1	0,0	0	0,2	0,3
R_{12}	0,0	0,1	0,2	0,5	1,5	2,0
R_{13}	-0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4
R_{14}	-0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4
R_a	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,4

Tab. 3.17. - Influence de la largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert sur les paramètres colorimétriques pour l'éclairage blanc chaud 5.

Les résultats obtenus montrent que les LED de type blanc froid sont beaucoup plus influencées que les LED de type blanc chaud, notamment du point de vue de la température de couleur proximale.

Pour s'affranchir de ces erreurs, des méthodes de correction des effets dus à la fonction de transfert, ont été développées.

2.2.3. Méthode de correction de l'effet de la fonction de transfert

Edwin I. Stearns proposa en 1988 [STE 88] une méthode pour corriger les effets de la fonction de transfert du monochromateur sur les mesures spectrales. L'hypothèse était faite que la fonction de transfert était triangulaire et symétrique, et que sa largeur à mi-hauteur et le pas de mesure, en longueur d'onde, étaient égaux. Pour corriger la luminance mesurée pour chaque longueur d'onde, notée *i*, le calcul suivant a été proposé :

$$L_c(i) = -k.L_m(i-1) + (1+2k).L_m(i) - k.L_m(i+1) \quad (3.36)$$

avec :

- L_c, la luminance corrigée ;
- L_m, la luminance mesurée ;
- k, une constante.

Pour le premier et le dernier point mesuré, la correction est possible en appliquant l'expression suivante :

$$L_c(i) = (1+k).L_m(i) - k.L_m(i \pm 1) \quad (3.37)$$

Plus récemment, Y. Ohno [OHN 05] et J. L. Gardner [GAR 06] ont proposé des méthodes permettant de s'affranchir de la forme et de la symétrie de la fonction de transfert ainsi que de l'égalité entre la largeur à mi-hauteur et le pas d'échantillonnage.

Ces méthodes n'ont pas été appliquées dans notre cas. Les mesures spectrales ont été effectuées, soit avec le spectroradiomètre Bentham de référence, avec une largeur de bande de 1 nm, soit avec le spectroradiomètre Konica Minolta, qui a une largeur de bande de 5 nm. Dans les deux cas, les incertitudes liées à ce paramètre d'influence ont été jugées suffisamment faibles pour ne pas appliquer de corrections.

2.3. Observateurs colorimétriques 2° et 10°

D'après la recommandation de la CIE relative aux calculs des paramètres colorimétriques [CIE 95], les fonctions colorimétriques d'un observateur ayant un angle d'ouverture du champ visuel de 2° (Chapitre I : § 2.3.2.2. Espace chromatique CIE 1931 XYZ et CIE 1964 XYZ) doivent être employées.

Lors de l'observation d'objets colorés de surface étendue (situation que l'on rencontre la plupart du temps dans les expériences de mesures psychophysiques), le champ visuel de l'observateur s'élargit, et de ce fait, il nous semble que les fonctions colorimétriques d'un observateur ayant un angle d'ouverture du champ visuel de 10° seraient plus intéressantes à utiliser pour le calcul des paramètres colorimétriques.

Afin de quantifier les effets du choix des fonctions colorimétriques employées dans le calcul des paramètres colorimétriques, nous avons comparé les valeurs obtenues pour chacun des éclairages à LED de la cabine à lumière (tableaux 3.18 et 3.19).

Pour ces éclairages, l'utilisation des fonctions colorimétriques 10° engendre une augmentation de la coordonnée chromatique *x* et une diminution de *y*, de l'ordre de quelques 10^{-3}. Cela a pour conséquence de diminuer la température de couleur proximale de l'ordre de 250 à 350 K pour les éclairages de type blanc froid, et de l'ordre de 180 K pour ceux de type blanc chaud.

Ce phénomène s'explique très bien si l'on prend en compte, outre, les variations des coordonnées chromatiques, les expressions (1.37) et (1.38). Si *x* augmente et si *y* diminue, la variable *n* de l'expression (1.38) augmente. Comme le montre la figure 3.53 obtenue à partir des expressions (1.37) et (1.38), lorsque *n* augmente (pour des variations de coordonnées chromatiques contenues dans une gamme d'utilisation fréquente), la température de couleur proximale diminue.

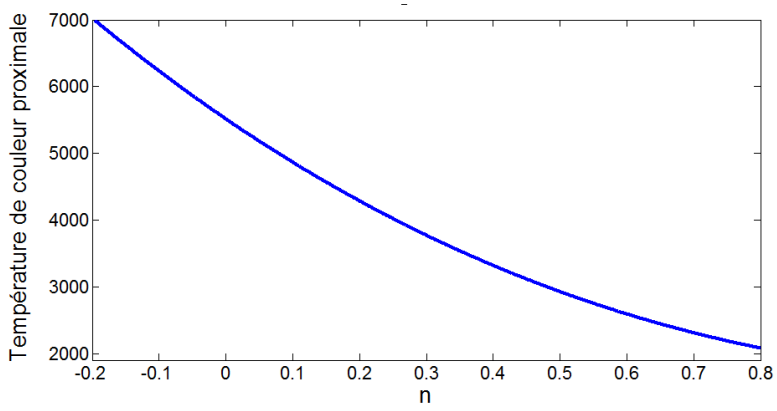


Fig. 3.53. - Evolution de la température de couleur proximale en fonction de la variable *n* de l'expression (1.38).

Pour les éclairages de type blanc froid, les indices particuliers de rendu des couleurs augmentent quasiment tous, ce qui a pour effet d'augmenter l'indice général R_a de l'ordre de 1 à 2 unités. En revanche, pour les éclairages de type blanc chaud l'inverse ce produit, ce qui provoque une diminution de l'indice général de l'ordre de 2 à 3 unités.

Paramètres colorimétriques	Blanc froid 1			Blanc froid 2		
	Observateur 2°	Observateur 10°	Ecarts	Observateur 2°	Observateur 10°	Ecarts
x	0,3237	0,3288	0,0051	0,3201	0,3272	0,0071
y	0,3268	0,3189	-0,0079	0,3325	0,3295	-0,0030
T_{cp}	5935	5688	-247	6098	5753	-345
R_1	72,8	73,8	1,0	63,5	66,0	2,5
R_2	74,2	74,2	0,0	78,6	81,3	2,7
R_3	72,1	69,0	-3,1	83,0	84,9	1,9
R_4	74,3	78,8	4,5	60,6	61,6	1,0
R_5	73,3	75,9	2,6	63,3	66,6	3,3
R_6	64,3	64,9	0,6	65,3	69,0	3,7
R_7	77,8	76,4	-1,4	80,6	77,0	-3,6
R_8	65,2	65,2	0,0	50,9	51,0	0,1
R_9	-9,7	0,7	10,4	-50,5	-38,0	12,5
R_{10}	36,1	33,6	-2,5	43,8	47,7	3,9
R_{11}	73,0	77,3	4,3	49,8	51,5	1,7
R_{12}	43,9	37,9	-6,0	32,6	30,3	-2,3
R_{13}	71,5	72,8	1,3	67,4	70,4	3,0
R_{14}	83,8	81,7	-2,1	90,2	90,8	0,6
R_a	71,7	72,3	0,6	68,2	69,7	1,5
R_{a_14}	62,3	63,0	0,7	55,6	57,9	2,3

Tab. 3.18. - Ecarts sur les paramètres colorimétriques calculés à partir des fonctions colorimétriques 2° et 10° pour les éclairages de type blanc froid.

Paramètres colorimétriques	Blanc chaud 3			Blanc chaud 4			Blanc chaud 5		
	Observateur 2°	Observateur 10°	Ecarts	Observateur 2°	Observateur 10°	Ecarts	Observateur 2°	Observateur 10°	Ecarts
x	0,4100	0,4175	0,0075	0,4604	0,4704	0,0100	0,4268	0,4326	0,0058
y	0,4027	0,3980	-0,0047	0,4318	0,4271	-0,0047	0,3856	0,3781	-0,0075
T_{cp}	3501	3315	-186	2855	2681	-174	3028	2852	-176
R_1	83,7	74,7	-9,0	73,0	63,5	-9,5	76,7	67,2	-9,5
R_2	87,7	78,8	-8,9	85,7	75,6	-10,1	85,6	77,4	-8,2
R_3	88,6	80,2	-8,4	96,7	87,3	-9,4	90,0	83,4	-6,6
R_4	83,6	91,5	7,9	68,9	80,7	11,8	74,1	81,8	7,7
R_5	81,2	89,8	8,6	70,3	82,3	12,0	74,7	85,3	10,6
R_6	80,6	88,7	8,1	79,0	90,1	11,1	77,5	88,6	11,1
R_7	93,6	84,7	-8,9	83,8	72,6	-11,2	83,0	70,9	-12,1
R_8	79,6	69,6	-10,0	56,2	45,4	-10,8	61,6	49,1	-12,5
R_9	45,9	41,0	-4,9	-0,6	-2,4	-1,8	11,3	8,4	-2,9
R_{10}	68,3	55,9	-12,4	65,6	52,5	-13,1	63,5	53,2	-10,3
R_{11}	78,7	85,4	6,7	61,1	72,0	10,9	67,7	74,3	6,6
R_{12}	53,9	55,6	1,7	48,0	53,3	5,3	55,9	63,5	7,6
R_{13}	84,0	72,4	-11,6	75,2	62,4	-12,8	78,2	66,6	-11,6
R_{14}	92,8	87,8	-5,0	97,6	91,3	-6,3	93,6	88,6	-5,0
R_a	84,8	82,2	-2,6	76,7	74,7	-2,0	77,9	75,5	-2,4
R_{a_14}	78,7	75,4	-3,3	68,6	66,2	-2,4	71,0	68,5	-2,5

Tab. 3.19. - Ecarts sur les paramètres colorimétriques calculés à partir des fonctions colorimétriques 2° et 10° pour les éclairages de type blanc chaud.

2.4. Pas en longueur d'onde des spectres

Le choix du pas en longueur d'onde des fonctions de répartition spectrale, utilisé pour calculer les paramètres colorimétriques, a été étudié.

Les paramètres colorimétriques des cinq éclairages de la cabine à lumière ont été calculés à partir de spectres ayant, dans un premier cas, un pas en longueur d'onde de 1 nm, et dans un second cas, un pas de 5 nm. Les écarts obtenus sur les paramètres colorimétriques sont donnés dans le tableau 3.20.

Paramètres colorimétriques	Ecarts				
	Blanc froid 1	Blanc froid 2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5
x	0	-0,0001	0	-0,0001	0
y	0,0001	0	0,0001	-0,0001	0
T_{cp}	0	1	1	2	1
R_1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2
R_2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1
R_3	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1
R_4	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,1
R_5	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,1
R_6	-0,1	0,0	-0,2	-0,1	-0,1
R_7	-0,1	0,1	0,0	0,2	0,2
R_8	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2
R_9	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1
R_{10}	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
R_{11}	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,1
R_{12}	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,0
R_{13}	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
R_{14}	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
R_a	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
R_{a_14}	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1

Tab. 3.20. - Ecarts sur les paramètres colorimétriques calculés à partir de deux spectres pour chacun des éclairages. L'un, a un pas en longueur d'onde de 5 nm, et l'autre de 1 nm.

Conformément à la recommandation de la CIE [CIE 04a] nous nous sommes limités à un pas maximal de 5 nm. Les résultats obtenus montrent une influence très faible, sur les paramètres colorimétriques des éclairages à LED, du choix d'un pas en longueur d'onde compris entre 1 et 5 nm.

2.5. Conclusion sur les paramètres d'influence

Plusieurs paramètres d'influence ont été étudiés dans cette partie : le premier relatif à la source lumineuse, le second à l'instrument de mesure et les derniers à la méthode de calcul.

Les études en courant continu et en courant pulsé ont permis de montrer que dans des conditions rigoureusement contrôlées il est possible d'obtenir une très bonne stabilité des paramètres colorimétriques des LED. Une alimentation en courant pulsé sera privilégiée lors d'une utilisation dynamique des LED, avec un variateur de puissance, car ce type d'alimentation permet de conserver une meilleure stabilité des paramètres colorimétriques qu'une alimentation en courant continu. L'alimentation en courant pulsé permet, de plus, de relier grâce à une relation linéaire, le flux au courant moyen d'alimentation au travers du rapport cyclique.
Ce travail a fait l'objet d'une communication lors du 14ème Congrès international de métrologie en 2009 (Annexe E).

L'étude sur les effets de la largeur à mi-hauteur de la fonction de transfert a permis, d'une part, de mettre en évidence que les simulations sont en accord avec les mesures expérimentales pour tous les éclairages à LED jusqu'à une largeur de bande de 8 nm environ. Pour les éclairages de type blanc froid les simulations surestiment les écarts pour des largeurs de bande supérieures. D'autre part, cette étude a permis de quantifier les incertitudes dues à la largeur de bande sur les mesures spectrales et, par conséquent, sur les paramètres colorimétriques.

L'utilisation des fonctions colorimétriques 2° et 10°, dans le calcul des paramètres colorimétriques, a été comparée. L'utilisation des fonctions colorimétriques 10° a un impact favorable, en terme d'augmentation de l'indice de rendu des couleurs pour les éclairages à LED de type blanc froid, alors que son impact est défavorable pour les éclairages à LED de type blanc chaud.
Le choix du pas en longueur d'onde des fonctions de répartitions spectrales, entre 1 et 5 nm, n'a qu'un impact très faible, voire négligeable, sur le calcul des paramètres colorimétriques.

3 Conclusion

Ce chapitre a permis, dans une première partie, de décrire le montage expérimental conçu à l'INM autour d'une cabine à lumière. Celle-ci avait pour objectif de nous permettre d'effectuer des mesures spectrales sur les éclairages à LED. Pour raccorder ces mesures au Système international d'unités nous avons mis en œuvre une nouvelle méthode de détermination des incertitudes sur les mesures spectrales et les paramètres colorimétriques à partir de simulations de type Monte Carlo.

Dans la deuxième partie nous avons étudié l'impact de paramètres d'influence sur les mesures spectrales et les paramètres colorimétriques.

Tous ces éléments nous ont permis de maîtriser les phénomènes physiques intervenant sur la qualité de la lumière émise par les LED.

Après avoir traité l'ensemble des aspects liés aux mesures physiques, nous allons aborder, dans le chapitre suivant, le second point qui a conduit à la construction d'une cabine à lumière : les mesures visuelles. Celles-ci vont nous permettre d'étudier la qualité des éclairages à LED au travers de la mise en place d'une expérience psychophysique, avec des observateurs.

Chapitre IV

Vers une redéfinition de l'indice de rendu des couleurs

"Chacun a ses lunettes ; mais personne ne sait au juste de quelle couleur en sont les verres"

[Alfred de Musset, poète français, 1810-1857]

Après avoir étudié dans le chapitre III, les aspects physiques liés au calcul de l'indice de rendu des couleurs (IRC), nous nous attacherons dans ce chapitre à traiter les aspects purement visuels.

Dans une première partie, nous détaillons les limitations de l'IRC à prédire le rendu des couleurs d'une source lumineuse sur un objet coloré, en particulier pour les LED. Nous présenterons une méthode proposée par le NIST (Color Quality Scale (CQS)) en remplacement de la méthode CIE 13.3 de 1995.

Dans une deuxième partie, nous explicitons une expérience psychophysique mise en place à l'INM afin de tester la qualité des éclairage à LED de la cabine à lumière, au travers des jugements d'un panel d'observateurs. Les résultats obtenus seront comparés à ceux donnés par le CQS. L'un des intérêt de cette comparaison est de voir si la méthode CQS apporte satisfaction dans la prédiction de la qualité de la lumière émise par une source lumineuse.

1 Indice de rendu des couleurs : passé, présent, futur

1.1. Limitations

Une reconsidération de la méthode de calcul de l'IRC (décrite dans le chapitre I) a été initiée, une première fois, lors de la rencontre quadriennal de la CIE de 1991, où le comité technique TC 1-33 : « Colour rendering » a été créé. Cette reconsidération partait de résultats de mesures visuelles indiquant des défauts de prédiction de la méthode de calcul par rapport aux résultats obtenus par l'intermédiaire d'études psychophysiques sur des observateurs. Au terme de ce comité, une nouvelle méthode de calcul, nommée R96a, a été développée et les remarques issues des discussions faites lors des réunions ont été publiées [CIE 99].

Les principales améliorations qui ont été proposées pour pallier les lacunes de la méthode CIE 13.3 de 1995 [CIE 95] sont décrites ci-dessous :

- Il a été observé, dans certains cas, que des sources capables de rendre de façon convenable les couleurs ayant une faible saturation, ne le sont plus pour des couleurs fortement saturées. En réponse à cela, l'utilisation, d'une part, de huit **échantillons colorés** saturés provenant de la

charte des couleurs de MacBeth, et d'autre part, de deux échantillons correspondant à des couleurs de peau de type caucasien et oriental, a été proposée.

- Le concept d'égalisation des températures de couleur entre la source à mesurer et l'illuminant de référence a été révisé. L'utilisation de six **illuminants de référence** (D65, D50, et radiateurs de Planck pour des températures de couleur de 4200 K, 3450 K, 2950 K, 2700 K), en lieu et place du jeu continu d'illuminants corps noir et d'illuminants D utilisés, a été proposée. La pertinence de ce choix a fait l'objet de débats à l'issue desquels aucun consensus n'a été trouvé.

- L'utilisation de la formule d'**adaptation chromatique** de la CIE [CIE 94] en remplacement de celle de Von Kries, est recommandée. Dans ce cadre, il a été préconisé de transformer les coordonnées chromatiques de la source en essai et de la source de référence dans l'espace des couleurs CIE 1976 L*a*b*(CIELAB).

- Pour le calcul des **différences de couleur**, l'espace chromatique U*V*W 1964 est jugé obsolète et non uniforme. Les différences de couleurs sont extrêmement exagérées dans la région rouge et sont sous-estimées dans le jaune et le bleu [SCH 03] [DAV 05]. Dans la méthode R96a, les différences de couleurs sont calculées dans l'espace CIELAB, jugé plus uniforme.

- Les **indices particuliers de rendu des couleurs** R_i sont toujours calculés, pour un échantillon de couleur *i*, à partir d'une différence de couleur ΔE_i, tels que :

$$R_i = 100 - c.\Delta E_i \qquad (4.1)$$

  avec :

  c, une constante qui a été déterminée par calcul, à partir de cent sept spectres, représentatifs de sources artificielles, fournis par les principaux fabricants de lampes.
  Pour garder une cohérence par rapport à l'ancienne méthode, les indices généraux de rendu des couleurs R_a calculés avec la méthode CIE 13.3 de 1995 et avec la méthode R96a, ont été égalisés par l'ajustement de la constante *c*. Suivant l'illuminant de référence choisi, $c(R96_a) = 3{,}248$ (nouveau jeu de six illuminants de référence) ou $c(R96_a) = 3{,}032$ (jeu continu d'illuminants corps noir et d'illuminants D).

Malgré la formalisation d'une nouvelle méthode, celle-ci n'a pas été adoptée. Les industriels de l'éclairage n'étaient pas convaincus de la nécessité de modifier la méthode CIE 13.3. D'après eux, il n'y avait pas eu assez d'expériences visuelles qui contredisaient les résultats issus du calcul de l'IRC [SCH 03] [SCH 07]. Le comité technique TC 1-33 a été dissous en 1999 sans avoir adopté de nouvelle recommandation.

D'autres arguments, moins techniques, mais plus conceptuels, que ceux précédemment cités, affirmant la nécessité de revoir la méthode de calcul de l'IRC, existent. L'IRC est un indicateur unique de quantification de la qualité du rayonnement d'une source lumineuse, sur des objets colorés. Or, la couleur ne peut se décrire convenablement qu'en prenant en compte plusieurs paramètres. Derrière le concept de rendu (ou de fidélité), existe d'autres notions permettant d'affiner la description qualitative d'une source lumineuse. Parmi celles-ci, il y a la préférence (esthétisme), la discrimination (capacité à bien séparer les couleurs) et la clarté visuelle (sensation de luminosité).

Selon le type d'application recherchée il serait intéressant d'avoir des informations détaillées sur la qualité de la lumière émise, en terme de rendu, de préférence, de discrimination ou de clarté, par la, (ou les) source(s) choisie(s). A l'heure actuelle, l'IRC ne permet pas ce genre de distinction.

1.2. Considérations pour les LED

L'apparition des LED de puissance, au début des années 2000, a relancé le débat sur la nécessité de réviser la méthode de calcul de l'IRC. Plusieurs laboratoires ont initié des projets de recherches dans ce sens.
Il a ainsi été montré par l'intermédiaire, d'une part, de mesures visuelles avec des observateurs, et d'autre part, par des simulations, que le calcul de l'IRC selon la recommandation de 1995 [CIE 95] ne s'appliquait pas convenablement [CIE 07b]. Au cours de plusieurs autres expériences de mesures visuelles, menées par d'autres laboratoires que ceux nommés dans le document « Colour rendering of white LED light sources » [CIE 07b], une mauvaise corrélation entre les résultats de calculs d'IRC et ceux issus de mesures visuelles, a été mise en évidence sur des éclairages à LED [TAR 01]. Il a également été montré que certains de ces éclairages avec un faible IRC, étaient jugés meilleurs par les observateurs que les éclairages avec des lampes à incandescence ou à fluorescence, à fort IRC [NAR 02b] [BOI 07] [BOI 09].

A partir de ces observations, la CIE a recommandé l'élaboration d'une nouvelle méthode de calcul afin de déterminer un nouvel indice (ou plusieurs nouveaux indices) de rendu des couleurs. Du fait qu'il y ait une infinité de possibilité de définir le rendu des couleurs de manière mathématique, il a été décidé que l'évaluation des résultats issus d'expériences visuelles devra toujours être nécessaire pour privilégier une méthode par rapport à une autre [CIE 07b].

Partant du principe que l'IRC est affecté directement par le spectre de la source, les fabricants manipulent la répartition spectrale des LED en modifiant la composition des luminophores qui recouvrent le semi-conducteur, afin d'augmenter artificiellement l'IRC. Cette méthode avait déjà été appliquée pour les lampes fluorescentes à des fins marketing. Celles-ci étaient conçues pour avoir un très bon indice de rendu des couleurs numérique mais un rendu des couleurs visuel incertain. D'après J. Schanda [SCH 03] cette erreur ne devrait pas être répétée pour les LED, d'où l'urgence d'adopter très rapidement une nouvelle méthode de calcul de l'IRC.

En mai 2006, lors de la rencontre de la CIE à Ottawa au Canada, le comité technique TC 1-69 ("Colour Rendering of White Light Sources") a été crée. Wendy Davis, du NIST, a été nommée à la tête de ce comité. Celui-ci s'est fixé pour objectif d'étudier de nouvelles méthodes d'évaluation des propriétés de rendu des couleurs des sources lumineuses blanches utilisées pour l'éclairage, y compris les sources à base de semi-conducteurs, pour aboutir à la rédaction d'une nouvelle recommandation. En septembre 2009, ce comité était composé de quarante trois membres dont trente trois sont actifs, et parmi lesquels je figure. Fin septembre 2009, dix laboratoires participants au TC 1-69 ont émis des rapports sur les résultats de leurs travaux. Parmi ceux-ci, il y avait trois laboratoires français : Muséum national d'histoire naturelle (MNHN, Françoise Viénot), Ecole nationale des travaux publics de l'état (ENTPE, Sophie Jost Boissard et Marc Fontoynont), et l'Institut national de métrologie (INM/Cnam). Plusieurs rapports proposant de nouvelles méthodes de calcul de l'IRC ont été soumis. La première à avoir été publiée et formalisée clairement est celle du NIST, sur laquelle nous avons décidé de travailler.

1.3. Méthode proposée par le NIST : « Color Quality Scale »

En réponse aux problèmes liés à la méthode actuelle de calcul de l'IRC, W. Davis et Y. Ohno du NIST développent, depuis le début des années 2000, une nouvelle échelle métrique de jugement de la qualité de la couleur nommée « Color Quality Scale » (CQS).

Cette échelle de jugement de la qualité de la couleur d'objets éclairés par une source lumineuse artificielle, est dérivée de la méthode actuelle de calcul de l'IRC. Cependant elle prend en compte,

outre le rendu des couleurs, la discrimination chromatique et les préférences des observateurs [DAV 05] [DAV 06] [DAV 07] [DAV 09].

Pour ce faire, la méthode proposée comporte un certain nombre de changements par rapport à la méthode CIE 13.3 :

- Quinze échantillons de couleurs de l'espace de Munsell sont utilisées (tableau 4.1 et fig. 4.1). Les facteurs spectraux de luminance de ces échantillons sont représentés sur les figures 4.2 et 4.3. Ils ont été sélectionnés pour avoir une forte saturation en comparaison des échantillons utilisés dans la méthode CIE 13.3 (tableau 4.1 et tableau 1.4), et ont été choisi uniformément espacés le long du cercle des teintes (fig. 1.21). De plus, ils sont commercialement disponibles ce qui rend possible la mise en place d'expériences psychophysiques directement avec ces échantillons.

Echantillons du CQS	Notation Munsell		
	Teinte	Clarté	Saturation
Q1	7,5 P	4	10
Q2	10 PB	4	10
Q3	5 PB	4	12
Q4	7,5 B	5	10
Q5	10 BG	6	8
Q6	2,5 BG	6	10
Q7	2,5 G	6	12
Q8	7,5 GY	7	10
Q9	2,5 GY	8	10
Q10	5 Y	8,5	12
Q11	10 YR	7	12
Q12	5 YR	7	12
Q13	10 R	6	12
Q14	5 R	4	14
Q15	7,5 RP	4	12

Tab. 4.1. - Notation des quinze échantillons de couleurs tests, issus de la classification de Munsell, utilisés par le NIST pour le calcul du CQS [DAV 05].

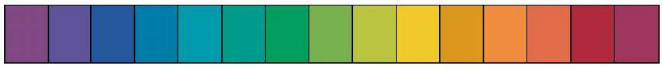


Fig. 4.1. - Quinze échantillons de la classification de Munsell utilisés pour le CQS [DAV 06].

- Comme nous l'avons vu précédemment, l'espace chromatique utilisé pour la détermination des différences de couleurs dans la méthode CIE 13.3 est considéré comme désuet. La CIE recommande l'utilisation des espaces CIELAB et CIELUV. L'espace CIELAB est utilisé pour le calcul du CQS, car considéré comme raisonnablement uniforme.

- Le modèle d'adaptation chromatique de type Von Kries est jugé moins performant que d'autres plus récents. Le modèle « Colour Measurement Committee's Chromatic Adaptation Transform » (CMCCAT2000) [LI 01] a été choisi par défaut car il est un des modèles les plus performants parmi ceux existants [CIE 04c].

- La méthode CQS intègre dans son processus de calcul les différences de saturation ou de teinte de la source à mesurer, par rapport, à la source de référence. Ainsi, un décalage de

teinte, ou une diminution de la saturation, engendre une diminution du score de la source à mesurer. Lorsqu'il y a une augmentation de la saturation, la source à mesurer n'est pas pénalisée, ni avantagée. D'après W. Davis, une augmentation de la saturation d'un objet coloré est jugée préférable car elle permet une augmentation de la luminosité. Cet aspect est intégré au calcul par l'intermédiaire d'un facteur de saturation.

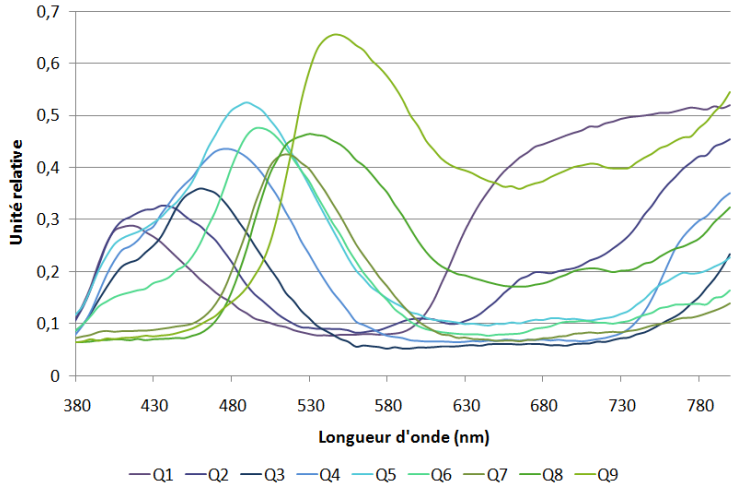


Fig. 4.2. - Facteurs spectraux de luminance des échantillons colorés Q1 à Q9.
Données : feuille de calcul « NIST CQS Simulation 7.4 » de W. Davis et Y. Ohno, d'après [HIL].

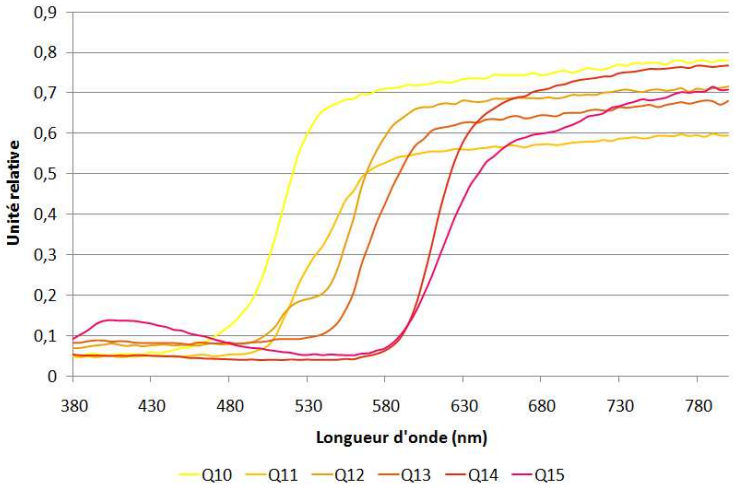


Fig. 4.3. - Facteurs spectraux de luminance des échantillons colorés Q10 à Q15.
Données : feuille de calcul « NIST CQS Simulation 7.4 » de W. Davis et Y. Ohno, d'après [HIL].

- Le calcul de l'indice général de rendu des couleurs R_a, correspond à une moyenne arithmétique des indices particuliers R_i. Ce calcul ne permet pas de prendre en compte les fortes variations de couleur obtenues pour certains échantillons.
  La méthode de calcul du CQS intègre une moyenne quadratique pour pallier ce problème. La différence de couleur ΔE_{RMS}, utilisée pour calculer l'indice général du CQS Q_a, est déterminée par :

$$\Delta E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{15}\sum_{i=1}^{15} \Delta E_i^{\,2}} \qquad (4.2)$$

où ΔE_i est la différence de couleur obtenue pour un échantillon i.

- Dans le calcul de l'IRC, un facteur d'échelle égal à 4,6 (expression (1.47)) est appliqué pour convertir les différences de couleur en indice particulier de rendu des couleurs. Pour le CQS, ce facteur d'échelle doit être modifié du fait des évolutions apportées. Il a été calculé comme étant égal à 3,1 de manière à obtenir pour les lampes fluorescentes (de F1 à F12), la même valeur de l'indice général entre l'IRC (R_a) et le CQS (Q_a). Les indices particuliers $Q_{i,\mathrm{PRE}}$, et l'indice général $Q_{a,\mathrm{RMS}}$ résultant, s'exprime par :

$$\begin{aligned} Q_{i,\mathrm{PRE}} &= 100 - 3{,}1.\Delta E_i \\ Q_{a,\mathrm{RMS}} &= 100 - 3{,}1.\Delta E_{\mathrm{RMS}} \end{aligned} \qquad (4.3)$$

- La méthode de calcul de l'IRC donne parfois des valeurs négatives pour certains indices particuliers et ceci n'a aucun sens physique. Une solution, proposée dans le CQS, consiste à corriger ces indices par une fonction mathématique décrite par :

$$\begin{aligned} Q_{i,0-100} &= 10 * \ln[\exp(\frac{Q_{i,\mathrm{PRE}}}{10}) + 1] \\ Q_{\mathrm{a},0-100} &= 10 * \ln[\exp(\frac{Q_{\mathrm{a,RMS}}}{10}) + 1] \end{aligned} \qquad (4.4)$$

avec :

- $Q_{\mathrm{a,RMS}}$ et $Q_{i,\mathrm{PRE}}$, les indices calculés, avant correction, par les expressions (4.3), et pouvant être négatifs.
- $Q_{\mathrm{a,0\text{-}100}}$ et $Q_{i,0\text{-}100}$, les indices corrigés qui sont strictement positifs.

La figure 4.4 illustre graphiquement la solution proposée au travers des expressions (4.4).

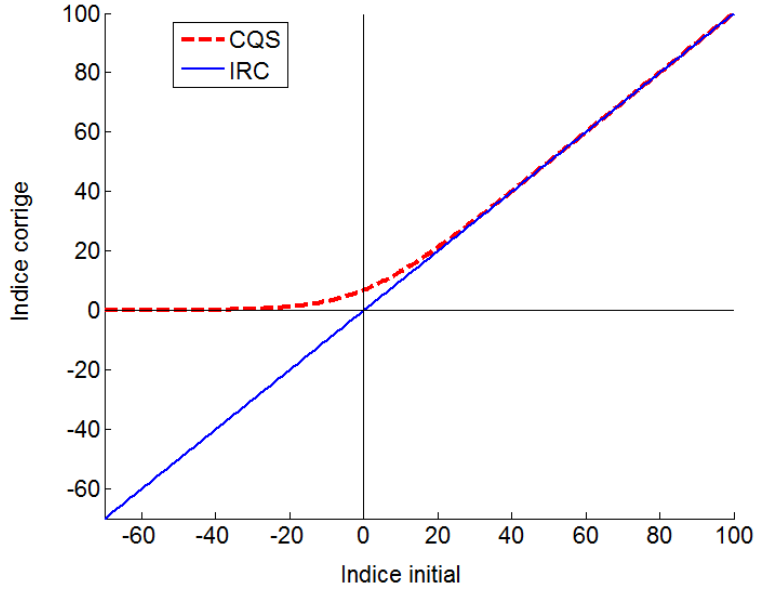


Fig. 4.4. - Correction du CQS selon la méthode du NIST [DAV 07]. « Indice initial » et « Indice corrigé » sont associés respectivement à $Q_{\mathrm{a,RMS}}$ (ou $Q_{i,\mathrm{PRE}}$) et à $Q_{\mathrm{a,0\text{-}100}}$ (ou $Q_{i,0\text{-}100}$).

- Dans le calcul de l'IRC il y a des problèmes pour des températures de couleur proximales très faibles. En effet, pour un rayonnement du corps noir de l'ordre de 2000 K par exemple, l'indice général de rendu des couleurs est considéré comme étant égal à 100 alors que cette

source ne rend pas convenablement les couleurs. La solution proposée dans le CQS consiste à pénaliser ces sources en introduisant un facteur, appelé « CCT factor » et noté M_{CCT}, calculé par l'expression (4.5) et représenté par la figure 4.5 :

$$M_{CCT} = (9{,}2672\times10^{-11}).T^3 - (8{,}3959\times10^{-7}).T^2 + (0{,}00255).T - 1{,}612 \quad \text{pour } T < 3500\,\text{K}$$
$$M_{CCT} = 1 \text{ pour } T \geq 3500\,\text{K} \qquad (4.5)$$

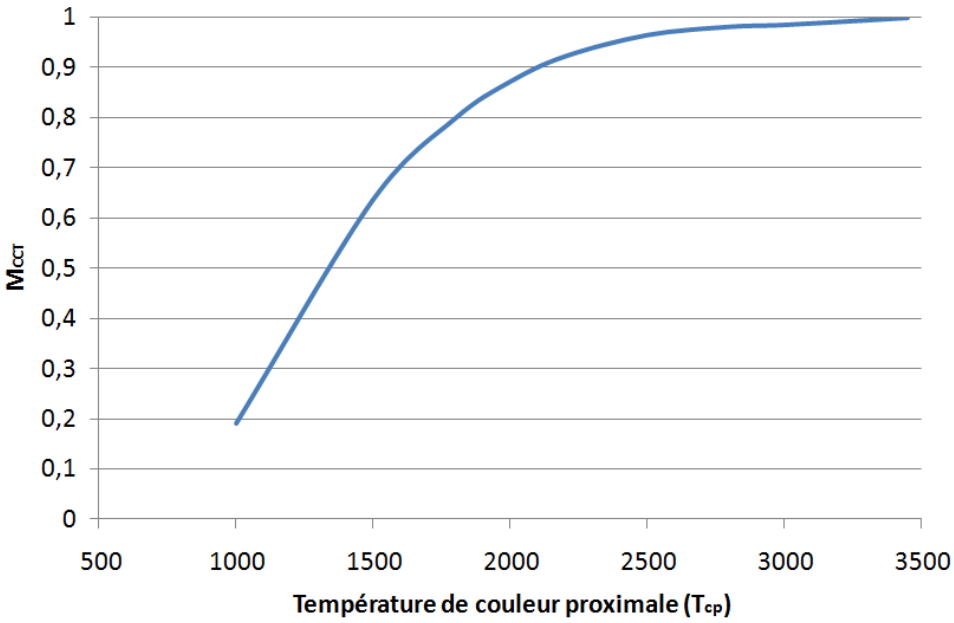


Fig. 4.5. - Evolution du « CCT factor » en fonction de la température de couleur proximale [DAV 09].

Ce facteur permet d'obtenir les indices particuliers Q_i, et l'indice général Q_a, par :

$$Q_i = M_{CCT}.Q_{i,0-100}$$
$$Q_a = M_{CCT}.Q_{a,0-100} \qquad (4.6)$$

- Aux indices particuliers et à l'indice général, ont été ajoutés deux indices complémentaires à destination d'utilisateurs expérimentés. Il s'agit de « color fidelity scale » (Q_f) et de « color preference scale » (Q_p) [DAV 09] :

  Q_f a pour objectif d'évaluer la fidélité de la couleur d'un objet, et est équivalent à l'indice général R_a de la méthode CIE 13.3. Q_f est égal à Q_a mais sans prise en compte du facteur de saturation. De plus, le facteur d'échelle a été ajusté et est égal à 2,93.

  Q_p a pour ambition de quantifier la préférence d'un observateur sur la couleur d'un objet coloré. Q_p est calculé sur le même principe que Q_a mais en favorisant les éclairages qui engendrent une augmentation de la saturation. La différence de couleur ΔE est atténuée d'autant plus que le facteur de saturation est grand (uniquement dans le cas où ce facteur est positif).

De par la dynamique engendrée par le comité technique TC 1-69 sur la redéfinition de l'indice de rendu des couleurs, nous avons jugé intéressant de mettre en place une expérience de mesure psychophysique afin de tester la qualité des éclairages à LED présents dans la cabine à lumière. Les résultats obtenus seront comparés à ceux prédits par le CQS.

2 Etude psychophysique sur les éclairages à LED

Dans le cadre de nos recherches sur la qualité de la lumière émise par les LED, nous avons tenté d'évaluer la qualité des éclairages à LED de la cabine à lumière, à partir de mesures psychophysiques. L'étude a porté sur des échantillons colorés utilisés dans la méthode CQS. Une comparaison entre les résultats issus de mesures visuelles et les prédictions issus du CQS a été effectuée. L'un des intérêts de cette expérience est de tester la capacité de la méthode CQS à prédire de la qualité de la lumière émise par une source lumineuse.

2.1. Principe

L'objectif de l'expérience de mesures visuelles mise en place à l'INM est de tester la qualité des éclairages à LED de la cabine à lumière sur plusieurs échantillons de couleurs du CQS. Ceci se fait au travers de l'établissement d'un classement des éclairages, du meilleur au moins bon, pour chacun des échantillons. Les classements obtenus sont ensuite comparés à ceux donnés par la méthode de calcul du CQS.

Pour réaliser cette expérience nous avons décidé de ne pas utiliser d'éclairage artificiel à incandescence ou à fluorescence qui servirait de référence. Nous ne souhaitions pas que l'observateur soit influencé par ce type de source.

L'expérience repose sur la capacité d'un observateur à comparer la couleur d'un échantillon, observé successivement sous deux éclairages différents. Cette comparaison doit permettre à l'observateur de porter un jugement (bon/moins bon) sur la qualité de la couleur observée. Pour ce faire nous avons mis en place un protocole de comparaison par paires, autrement nommé « 2-Alternative Forced Choice ».
Pour réaliser cela, nous soumettons à un observateur, pour un échantillon de couleur donné, la totalité des paires d'éclairages qu'il est possible d'obtenir à partir des cinq éclairages à LED (n) de la cabine à lumière (à l'exclusion des paires constituées deux fois du même éclairage), notés de 1 à 5.

L'observateur est ainsi soumis à une série de dix ($n(n-1)/2$) paires d'éclairages par échantillon :

1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	3-5	4-5

Pour chaque paire d'éclairage, l'observateur doit choisir l'éclairage qui répond le mieux à la question posée en début d'expérience.

Les réponses de l'observateur constituent un système de dix inéquations. La résolution de ce système permet d'obtenir un classement des éclairages, du meilleur au moins bon, pour l'échantillon coloré testé.

Ce processus est répété pour plusieurs échantillons utilisés dans la méthode CQS, et avec plusieurs observateurs.

2.2. Calcul de l'IRC et du CQS sur les éclairages à LED

Pour prendre en compte les conditions expérimentales des mesures visuelles, nous avons réalisé de nouvelles mesures spectrales sur les éclairages à LED. Celles-ci nous ont permis de déterminer les valeurs d'IRC et du CQS.

Pour se situer dans les conditions de mesures visuelles il a fallu, d'une part, changer l'orientation de la cabine à lumière qui était précédemment inclinée à 45°, et d'autre part, adapter les courants

d'alimentation des différents éclairages à LED pour qu'ils produisent des niveaux d'éclairement lumineux égaux à l'intérieur de la cabine à lumière.

Le changement d'orientation de la cabine nous a contraint à incliner le spectroradiomètre à 45° pour conserver les conditions géométriques de mesures à 0:45° recommandées par la CIE [CIE 04a]. Cette inclinaison n'était pas envisageable de manière simple avec le spectroradiomètre Bentham de référence. Par conséquent, nous avons utilisé le spectroradiomètre CS-2000 qui est beaucoup plus facile à manipuler.

Les niveaux d'éclairement lumineux dans la cabine ont été égalisés en ajustant le courant d'alimentation des éclairages à LED par rapport au courant nominal de 350 mA. Les éclairements ont été mesurés à l'aide d'un luxmètre de marque Hagner (modèle E2) en trois points au centre de la cabine. L'éclairement lumineux moyen est de 150 lx et l'homogénéité de l'éclairement dans une zone de 30 par 20 cm - correspondant aux dimensions des échantillons colorés utilisés pour l'expérience psychophysique - au centre de la cabine, est de 4%.
L'éclairement lumineux dans la cabine est en valeur absolue relativement faible du fait de la taille de la cabine et du nombre de LED installées à l'intérieur. Cet aspect n'a pas été jugé contraignant car l'observateur est positionné dans un environnement parfaitement noir où l'unique source de lumière provient de la cabine. Le confort visuel a été jugé suffisant.

Les niveaux de luminance lumineuse et les répartitions spectrales des éclairages à LED ont été mesurés sur un étalon blanc de réflexion diffuse, éclairé successivement par chacun des éclairages. Le plan des éclairages est parallèle au plan défini par la surface de l'étalon et le spectroradiomètre est incliné à 45° par rapport au plan de l'étalon (figure 4.6). Un indicateur sur la position angulaire du spectroradiomètre, ainsi qu'un niveau à bulle, sont présents sur le pied télescopique servant de support au spectroradiomètre. Cela permet le réglage angulaire du spectroradiomètre.

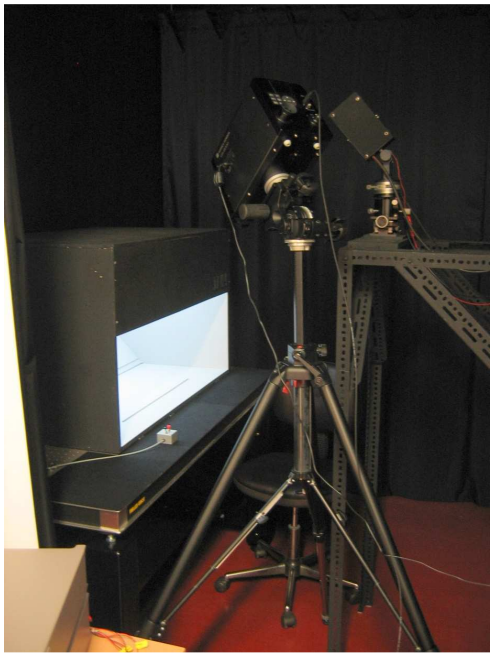


Fig. 4.6. - Configuration du banc de caractérisation des éclairages à LED
de la cabine à lumière dans le cadre des mesures visuelles.

Le tableau 4.2 présente les valeurs de luminance lumineuse réfléchies par l'étalon blanc. Le certificat d'étalonnage du fabricant du spectroradiomètre donne une exactitude de mesure de ± 2% sur les mesures de luminance.

Eclairage à LED	Luminance lumineuse (cd/m^2)
Blanc froid 1	46,3
Blanc froid 2	45,5
Blanc chaud 3	44,0
Blanc chaud 4	46,8
Blanc chaud 5	46,5

Tab. 4.2. - Luminance lumineuse transmise par l'étalon blanc de réflexion diffuse pour chacun des éclairages à LED.

A partir des mesures spectrales nous avons pu calculer, tel que décrit dans le chapitre I et le chapitre III, les indices de rendu des couleurs et les incertitudes-types associées dans la configuration des mesures visuelles (tableaux 4.3 et 4.4).

Les indices particuliers du CQS, notés de Q_1 à Q_{15}, l'indice général, noté Q_a, et les indices spéciaux Q_f et Q_p sont calculés à l'aide de la feuille de calcul « NIST CQS Simulation 7.4 » fournie par W. Davis. Le calcul se base sur la répartition spectrale d'une source, échantillonnée avec un pas en longueur d'onde de 5 nm, entre 380 et 780 nm. Le tableau 4.5 donne les valeurs des indices issus de la méthode CQS.

Ces valeurs d'indices donnent une information sur le classement des éclairages. Le tableau 4.6 permet d'effectuer une comparaison des classements obtenus, d'une part, à partir des indices de rendu des couleurs, et d'autre part, à partir des indices du CQS.

Le classement obtenu à partir des indices généraux Q_a est quasiment inchangé par rapport à celui obtenu à partir des R_a, hormis pour les blancs chauds 4 et 5 qui sont inversés dans les deux classements. Notons que les écarts d'indice entre ces deux éclairages sont très faibles.

Paramètres colorimétriques	Blanc froid 1		Blanc froid 2	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
R_1	71,5	1,6	63,5	1,9
R_2	73,6	1,4	78,5	1,6
R_3	72,5	1,1	82,6	0,8
R_4	73,5	0,9	60,3	1,4
R_5	72,3	1,3	63,1	1,6
R_6	63,8	1,5	64,9	2,0
R_7	77,8	1,7	80,4	1,6
R_8	63,8	1,5	51,0	1,6
R_9	-14,4	1,1	-50,0	1,3
R_{10}	35,2	2,0	43,5	2,2
R_{11}	71,8	0,9	49,2	1,2
R_{12}	42,5	0,8	32,4	1,1
R_{13}	70,5	2,0	67,3	2,3
R_{14}	84,0	0,8	89,9	0,6
R_a	71,1	0,5	68,0	0,5
R_{a_14}	61,3	0,4	55,5	0,4

Tab. 4.3. - Valeur moyenne et incertitude-type des indices de rendu des couleurs calculés à partir de mesures spectrales, effectuées dans les conditions de mesures visuelles, pour les éclairages à LED de type blanc froid.

Paramètres colorimétriques	Blanc chaud 3		Blanc chaud 4		Blanc chaud 5	
	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type	Moyenne	Incertitude-type
R_1	83,5	0,7	73	0,8	76,5	0,8
R_2	87,3	0,7	85,7	0,8	85,1	0,7
R_3	88,1	0,6	96,5	0,3	89,4	0,5
R_4	83,7	0,6	68,9	0,7	74,2	0,6
R_5	81	0,6	70,2	0,7	74,3	0,6
R_6	80,2	0,6	78,7	0,7	76,9	0,7
R_7	93,8	0,6	84	0,8	83,3	0,7
R_8	79,8	0,8	56,4	0,9	61,9	0,8
R_9	46,1	0,5	-0,2	0,6	11,5	0,5
R_{10}	67,5	1	65,5	1,1	62,5	1
R_{11}	78,7	0,5	61	0,6	67,8	0,5
R_{12}	53,2	0,4	47,8	0,5	54,7	0,4
R_{13}	83,6	0,9	75,2	1,2	77,8	1
R_{14}	92,6	0,4	97,5	0,3	93,3	0,4
R_a	84,7	0,2	76,7	0,2	77,7	0,2
R_{a_14}	78,5	0,2	68,6	0,2	70,6	0,2

Tab. 4.4. - Valeur moyenne et incertitude-type des indices de rendu des couleurs calculés à partir de mesures spectrales, effectuées dans les conditions de mesures visuelles, pour les éclairages à LED de type blanc chaud.

Indices CQS	Blanc froid 1	Blanc froid 2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5
Q_1	81	76	90	77	76
Q_2	90	97	98	91	97
Q_3	58	60	79	82	69
Q_4	54	40	75	70	66
Q_5	67	49	80	70	73
Q_6	72	54	82	68	72
Q_7	76	65	85	73	71
Q_8	87	79	91	84	80
Q_9	85	91	95	88	95
Q_{10}	67	72	89	81	79
Q_{11}	62	59	87	80	74
Q_{12}	65	59	88	80	74
Q_{13}	70	62	89	79	78
Q_{14}	63	51	84	69	73
Q_{15}	71	61	86	74	74
Q_a	69,3	61,9	85,2	76,6	75,2
Q_f	67,2	62,0	85,4	77,6	72,8
Q_p	76,5	64,9	85,5	75,2	82,3

Tab. 4.5. - Indices calculés par la méthode CQS pour les éclairages à LED de la cabine à lumière.

R_a	R_{a_14}	Classement 1	Q_a	Q_f	Classement 2	Q_p	Classement 3
84,7	78,5	Blanc chaud 3	85,2	85,4	Blanc chaud 3	85,5	Blanc chaud 3
77,7	70,6	Blanc chaud 5	76,6	77,6	Blanc chaud 4	82,3	Blanc chaud 5
76,7	68,6	Blanc chaud 4	75,2	72,8	Blanc chaud 5	76,5	Blanc froid 1
71,1	61,3	Blanc froid 1	69,3	67,2	Blanc froid 1	75,2	Blanc chaud 4
68,0	55,5	Blanc froid 2	61,9	62,0	Blanc froid 2	64,9	Blanc froid 2

Tab. 4.6. - Comparaisons entre les classements obtenus par la méthode CIE 13.3 et la méthode CQS pour les éclairages à LED de la cabine à lumière.

2.3. Dispositif expérimental et protocole

Cette étude a été réalisée sur les échantillons de couleurs mis en œuvre dans la méthode CQS car ils sont commercialement disponibles, ce qui n'est pas le cas de ceux utilisés dans la méthode CIE 13.3. Les échantillons utilisés ont pour dimensions 21 cm de largeur et 28 cm de hauteur avec une finition mate. Nous avons jugé que l'expérience ne devait pas durer plus de trente à quarante-cinq minutes. Par conséquent, nous avons limité le nombre d'échantillons utilisés pour cette étude. Le tableau 4.5 nous a permis de choisir des échantillons dont les écarts d'indices entre les différents éclairages étaient les plus grands. De plus, nous avons essayé de sélectionner des échantillons uniformément répartis sur le cercle des teintes. De cette façon, nous avons sélectionné huit échantillons colorés : Q1, Q3, Q4, Q8, Q10, Q12, Q13, Q14.
Pour compléter ce panel d'échantillons individuels de couleurs nous avons décidé d'ajouter un échantillon constitué d'une mosaïque de couleurs. Nous souhaitions, en effet, pouvoir tester l'indice Q_a du CQS à partir de mesures visuelles. Pour ce faire, nous avons décidé d'utiliser la charte des couleurs de MacBeth partant du principe que l'indice Q_a est fonctionnel pour une mosaïque de couleurs constituée d'échantillons autres que les échantillons Q1 à Q15.

Trente cinq observateurs ont effectué l'expérience. Parmi ces observateurs il y avait treize femmes âgées de 20 à 60 ans et vingt deux hommes âgés de 20 à 63 ans. Les observateurs participant à l'expérience étaient habillés d'une blouse blanche pour cacher leurs vêtements. Des gants blancs leur étaient également fournis pour qu'ils ne soient pas influencés par la couleur de la peau de leurs mains.

Dans un premier temps, chaque observateur était soumis à un test de Farnsworth D15 afin de vérifier sa vision des couleurs (fig. 4.7). Le test avait lieu sous un éclairage à base de tubes fluorescents. Le principe de ce test est de classer quatorze pions de couleurs, par ordre de teinte, en plaçant les teintes les plus proches les unes à côté des autres. Un pion « pilot » permet d'avoir un point de départ au classement.

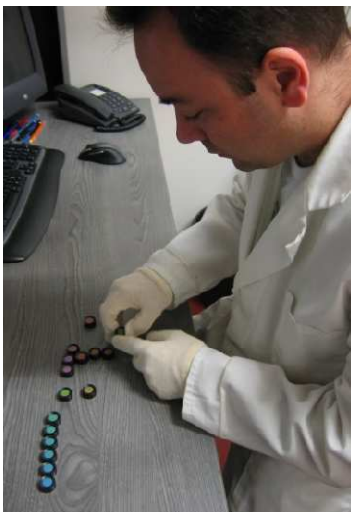


Fig. 4.7. - Test de Farnsworth D15 mis en place à l'INM.

Seulement six observateurs ont effectué au maximum une inversion. Cela a été considéré comme acceptable et les inversions ont été imputées aux conditions d'éclairage qui n'étaient pas idéales. Un seul observateur (pour qui l'expérience n'a pas été poursuivie) a été diagnostiqué comme étant deutéranope (incapacité de la vision à différencier le rouge du vert).

L'observateur était ensuite placé devant la cabine à lumière, dans une pièce dont les parois sont totalement noires (fig. 4.8).



Fig. 4.8. - Illustration d'un observateur placé devant la cabine à lumière
au cours de l'expérience de mesure visuelle mise en place à l'INM.

Un opérateur, placé en dehors de la salle noire (fig. 4.9), donne les instructions suivantes :

« Un certain nombre d'éclairages sont disponibles dans la cabine que vous voyez. Plusieurs paires d'éclairages vont vous être présentées.
Pour chacune des paires d'éclairages, indiquez celui offrant la meilleure qualité d'éclairage sur l'échantillon coloré.
Huit échantillons colorés vont vous être présentés les uns à la suite des autres.
Pour chacun de ces échantillons, je vous demanderai de me décrire la couleur que vous percevez lorsque je vous les apporterai.
Concernant les aspects pratiques : vous avez à disposition, sur votre gauche, un boitier de commande permettant de commuter à volonté entre les deux éclairages proposés. Une fois votre choix effectué vous devez laisser allumer l'éclairage qui vous convient le mieux et ensuite appuyer sur le bouton de validation.
Au cours de cette expérience je vous demanderai également de garder le dos appuyé contre le dossier de la chaise et de ne pas vous pencher sur les échantillons ».

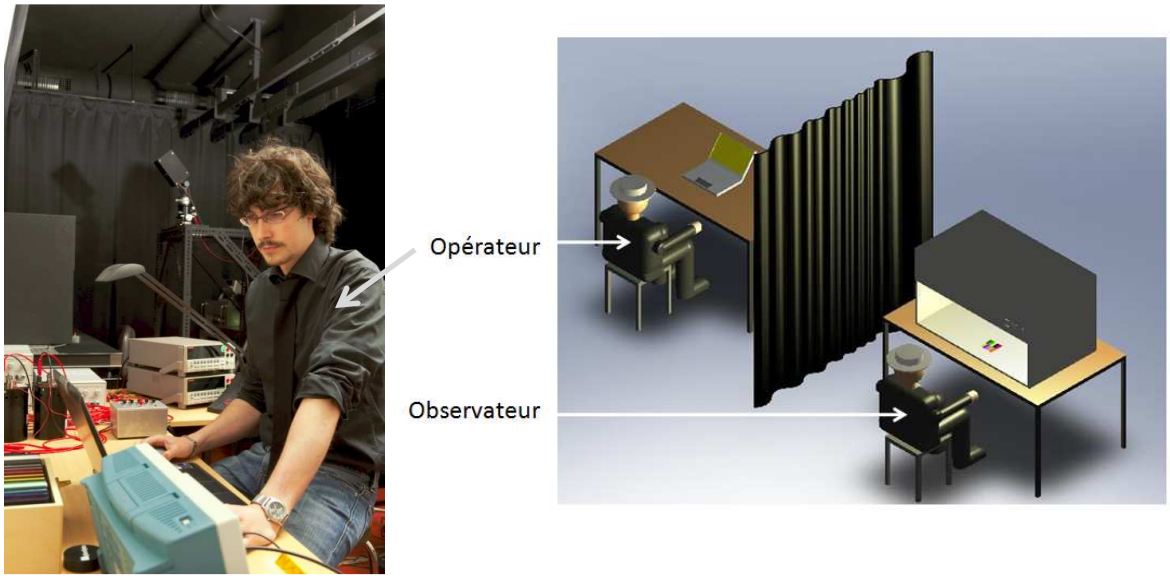


Fig. 4.9. - Configuration de l'opérateur et de l'observateur lors des mesures visuelles.
Photo de gauche : Alain Potignon/ONISEP.

Le choix des paires d'éclairages soumis à l'observateur est mis en œuvre par l'opérateur qui dispose d'un boitier de commande (fig. 4.10 et Annexe D). Ce choix est aléatoire et suit une loi de distribution uniforme. Pour chaque échantillon coloré une série de dix paires d'éclairages est générée informatiquement (parmi les 10 ! = 3 628 800 séries possibles), par l'intermédiaire d'un programme développé sous labVIEW. Ceci permet de s'affranchir des effets de présentation des paires d'éclairages sur les résultats.
Grâce au boitier de commande, l'opérateur choisit deux éclairages (parmi cinq) par un appui de bouton (*BC* sur la figure 4.10). A ce moment là, deux LED vertes (*ILC*) s'allument pour indiquer les éclairages choisis. Lorsque le choix est fait, il valide par un autre appui de bouton (*BV1*). Quelques instants (800 ms) après, un des deux éclairages choisi est alimenté, et une des LED rouge (*ILA*) s'allume. Cela indique que l'éclairage illumine la cabine.

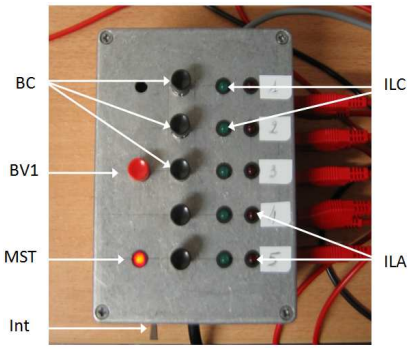


Fig. 4.10. - Boitier de commande des éclairages à LED.
Int : Interrupteur d'alimentation du boitier, MST : indicateur de mise sous tension, BC : boutons de choix des éclairages, BV1 : bouton de validation des deux éclairages choisis, ILC : indicateur de visualisation des éclairages à LED choisis, ILA : indicateur de l'éclairage à LED allumé dans la cabine.

Un boitier « observateur » placé, à gauche de la cabine (fig. 4.11), permet à l'observateur de commuter à volonté entre les deux éclairages proposés (*BC2*), et de valider par un appui de bouton (*BV2*) lorsqu'il a effectué son choix.

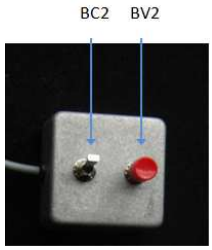


Fig. 4.11. - Boitier « observateur ».
BC2 : bouton de commutation entre les deux éclairages proposés,
BV2 : bouton de validation de l'éclairage choisi.

Lorsque l'observateur a effectué son choix, l'opérateur dispose de l'information sur le boitier de commande (fig. 4.12) : la LED rouge (*ILA3*) correspondant à l'éclairage choisi est allumée. Lorsque l'observateur valide son choix, la LED verte (*ILC3*), associée à l'éclairage choisi, clignote distinctement.
A la fin de chaque série de paires d'éclairages, l'opérateur dispose de dix inéquations correspondant aux choix de l'observateur. Ces dix inéquations sont résolues mentalement pour obtenir un classement des éclairages, pour chaque échantillon, du meilleur (noté 1) au moins bon (noté 5). L'opération est répétée pour tous les échantillons sélectionnés. L'ordre de présentation des échantillons colorés suit une loi de distribution uniforme pour s'affranchir des éventuels effets de présentation sur les résultats.

Au final, 3150 observations ont été collectées (35 observateurs x 9 échantillons x 10 paires d'éclairages) avec une durée moyenne de l'expérience, pour chaque observateur, de quarante minutes.

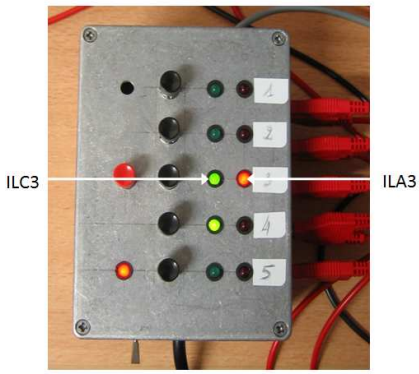


Fig. 4.12. - Fonctionnement du boitier de commande des éclairages à LED.
ILA3 : éclairage à LED choisi, ILC3 : lorsque la LED clignote l'observateur à validé son choix.

2.4. Résultats et analyses

2.4.1. Mesures de luminance lumineuse

Les niveaux de luminance lumineuse renvoyés par les échantillons de couleur, illuminés par les éclairages à LED, ont été mesurés. Ces mesures ont été réalisées dans les mêmes conditions expérimentales que les mesures de luminance lumineuse effectuées sur l'étalon blanc de réflexion diffuse (tab. 4.2). Elles permettent d'établir un classement des éclairages à LED pour chaque échantillon (tab. 4.7). Les classements obtenus seront comparés, par la suite, aux classements déduits des réponses des observateurs.

		Q1	Q3	Q4	Q8	Q10	Q12	Q13	Q14
Blanc froid 1		5,61	5,11	7,81	21,57	35,80	21,51	15,20	5,53
Blanc froid 2		5,44	5,10	7,60	21,25	35,69	21,32	14,76	5,07
Blanc chaud 3		5,88	4,56	6,89	19,70	34,91	22,47	16,64	7,09
Blanc chaud 4		6,25	4,42	6,55	20,34	37,65	25,42	18,96	7,94
Blanc chaud 5		6,43	4,30	6,61	19,89	38,72	24,63	19,25	7,71
Classement des éclairages à LED	**1**	Chaud 5	Froid 1	Froid 1	Froid 1	Chaud 5	Chaud 4	Chaud 5	Chaud 4
	2	Chaud 4	Froid 2	Froid 2	Froid 2	Chaud 4	Chaud 5	Chaud 4	Chaud 5
	3	Chaud 3	Chaud 3	Chaud 3	Chaud 4	Froid 1	Chaud 3	Chaud 3	Chaud 3
	4	Froid 1	Chaud 4	Chaud 5	Chaud 5	Froid 2	Froid 1	Froid 1	Froid 1
	5	Froid 2	Chaud 5	Chaud 4	Chaud 3	Chaud 3	Froid 2	Froid 2	Froid 2

Tab. 4.7. - En haut : mesures de luminance lumineuse (en cd/m^2) sur les échantillons colorés illuminés par les éclairages à LED de la cabine à lumière. En bas : classement des éclairages en fonction de la luminance mesurée de 1 (plus) à 5 (moins).

2.4.2. Mesures de reproductibilité

Afin de quantifier la stabilité de jugement des observateurs, des mesures de reproductibilité ont été réalisées. Celles-ci ont porté sur trois observateurs qui ont effectué, chacun, trois fois l'expérience, à quelques jours d'intervalle. Au final, des réponses associées à 270 observations ont été collectées (3 observateurs x 9 échantillons x 10 paires d'éclairages).

Pour quantifier la reproductibilité des mesures, nous avons décidé de procéder à un comptage des paires d'éclairage pour lesquelles les réponses d'un observateur ont été identiques pendant les trois séances et pour un échantillon donné. Ce nombre est ensuite divisé par le nombre total de paires d'éclairages proposées à l'observateur (égal à dix dans notre cas). Nous attirons l'attention sur le fait que ce mode de calcul est particulièrement sévère puisque nous ne prenons pas en considération les cas où l'observateur donne successivement deux fois la même réponse.

Les scores obtenus permettent d'établir une moyenne, en pourcentage, du nombre de paires d'éclairages pour lesquelles les réponses ont été identiques pendant les trois séances. Cette moyenne a été calculée, pour chaque observateur, et pour chaque échantillon. Le tableau 4.8 présente les résultats obtenus.

Pour les échantillons, les moyennes sont comprises entre 60 et 80%. Ces valeurs indiquent que le jugement des observateurs est stable. Par conséquent, la reproductibilité des mesures visuelles semble acceptable.
Pour les trois observateurs, les moyennes sont comprises entre 58 et 83%. Ceci montre que la stabilité du jugement n'est pas bonne pour tous les observateurs. Certains d'entre eux semblent avoir des difficultés à établir un critère de sélection. Cela étant, il est possible de dire que l'observateur moyen semble avoir un jugement stable. Par conséquent, une analyse en moyenne des réponses des observateurs semble intéressante dans une première approche.

	Observateur 1	**Observateur 2**	**Observateur 3**	**Moyenne par échantillon**
Q1	3/10	8/10	7/10	**60%**
Q3	7/10	9/10	8/10	**80%**
Q4	3/10	9/10	8/10	**67%**
Q8	8/10	9/10	6/10	**77%**
Q10	3/10	7/10	10/10	**67%**
Q12	6/10	9/10	5/10	**67%**
Q13	6/10	9/10	3/10	**60%**
Q14	8/10	8/10	4/10	**67%**
MacBeth	8/10	7/10	4/10	**63%**
Moyenne par observateur	**58%**	**83%**	**61%**	

Tab. 4.8. - Résultats de mesures de reproductibilité sur trois observateurs.

2.4.3. Analyse en moyenne des réponses des observateurs

A partir des réponses d'un observateur nous pouvons établir un classement des éclairages à LED, du meilleur au moins bon. En effectuant un comptage des éclairages classés en premier, puis en deuxième, puis en troisième,… pour l'ensemble des observateurs, et en divisant la somme par le nombre total d'observateurs, il est possible d'obtenir le pourcentage de réponses associées au choix d'un éclairage.

Les figures 4.13 illustrent la répartition des réponses des observateurs, en pourcentage, pour chaque échantillon de couleur (de Q1 à Q14) ainsi que pour la charte de couleurs MacBeth. L'abscisse des graphiques correspond au classement des éclairages à LED du meilleur (1) au moins bon (5).
Le classement moyen des éclairages à LED est obtenu, pour chaque échantillon, en considérant les éclairages ayant une majorité de réponses issues des observateurs. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux calculés avec la méthode CQS (tableau 4.9).

De ces résultats nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Echantillons bleus

Pour les échantillons Q3 et Q4, les classements issus des observateurs sont identiques et s'accordent avec une majorité des réponses (> 50%). Il apparaît nettement que les blancs froids sont classés en premier et les blancs chauds en dernier, avec une nette discrimination entre chaque éclairage. Ces classements ne concordent pas avec ceux obtenus par le CQS. Les classements des observateurs correspondent à ceux obtenus par les mesures de luminance. Pour ces échantillons, il semblerait que la qualité d'éclairage soit définie assez clairement, et de manière identique, par les observateurs.

Echantillons orange-rouge

Pour les échantillons Q12, Q13 et Q14, les réponses des observateurs sont beaucoup plus dispersées. Nous n'observons pas de discrimination entre chaque éclairage. Cependant, il apparaît nettement que les blancs chauds sont classés en premier et les blancs froids en dernier. Cela concorde avec les prédictions du CQS et les mesures de luminance. Néanmoins, le terme de qualité d'éclairage semble poser des problèmes. Il n'y a visiblement pas de consensus sur la question contrairement à ce qu'il semble se passer pour les échantillons bleus.

Autres échantillons

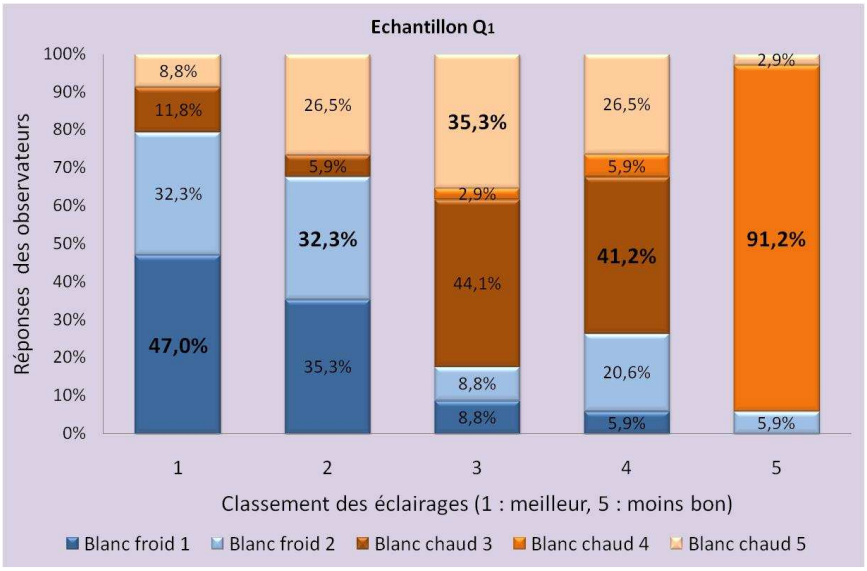
Pour l'échantillon Q1, les réponses des observateurs sont dispersées. Leur choix se porte majoritairement sur les blancs froids 1 et 2 qui sont classés en premier ex aequo. Ensuite sont classés, en troisième et quatrième position, les blancs chauds 3 et 5 également ex aequo. Seul le blanc chaud 4 est très nettement classé en dernier avec 91% des réponses. Le CQS indique que les éclairages blanc chaud 4, blanc chaud 5 et blanc froid 2 sont très proches. D'après les réponses des observateurs, l'éclairage blanc chaud 4 semble de toute évidence bien moins apprécié que les autres éclairages. De plus, il apparaît nettement que les blancs froid sont classés en premier, contrairement aux classements obtenus par le CQS et par les mesures de luminance.

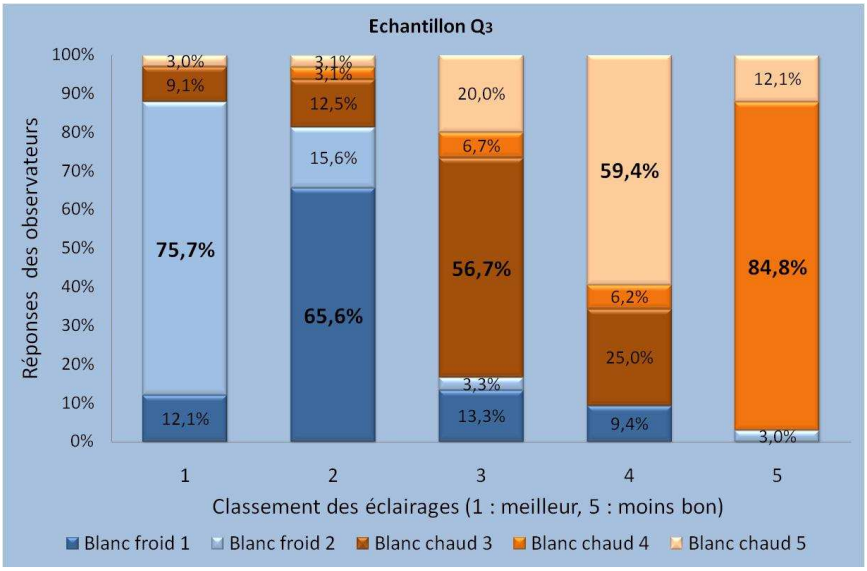
Pour l'échantillon Q8, la discrimination entre chaque éclairage est bonne. Les blancs froids sont très majoritairement classés en premier en accord avec les mesures de luminance. Les réponses des observateurs pour les blancs chauds concordent à plus de 50%. Cela ne correspond pas aux données issues du CQS.

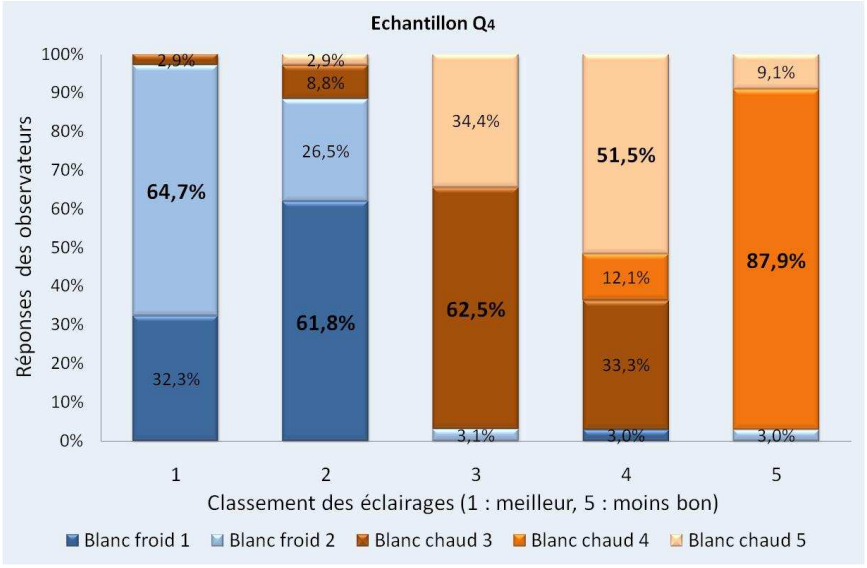
Pour l'échantillon Q10, les réponses des observateurs donnent à une faible majorité les blancs froids en premier, à l'inverse du CQS et du classement issu des luminances. Comme pour l'échantillon Q1, l'éclairage blanc chaud 4 est très largement relégué en dernière position avec 65% des réponses alors qu'il est classé en deuxième position avec les données issues du CQS et des mesures de luminance.

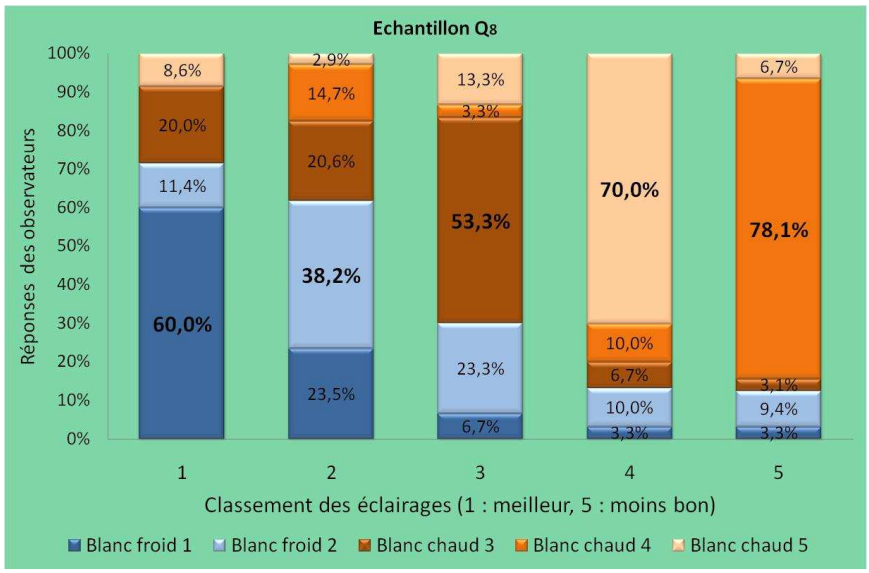
Pour la charte des couleurs de MacBeth, nous souhaitions tester l'aptitude d'un observateur à émettre un jugement sur une mosaïque de couleurs. Ceci sous-entendait la capacité d'effectuer une moyenne de la qualité de l'éclairage sur des échantillons de couleurs très différentes. Ce test ne s'est pas révélé particulièrement concluant. Malgré tout, nous pouvons indiquer que la couleur de l'échantillon influence très largement le jugement de la qualité d'un éclairage. De plus, nous pouvons noter que l'éclairage blanc chaud 4 est classé en dernier avec 61% des réponses alors que le CQS le classe deuxième.

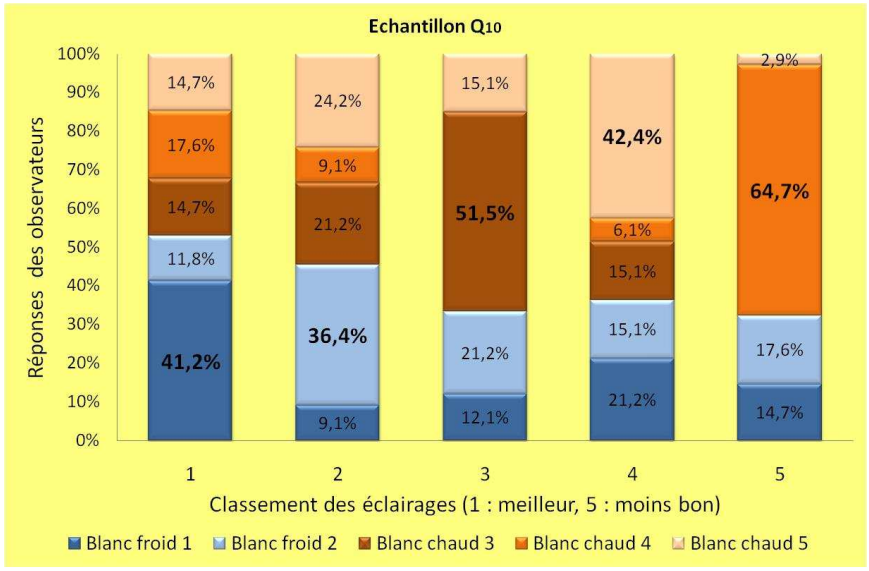
Cette première méthode d'analyse permet d'obtenir un classement des éclairages à LED du meilleur au moins bon mais ne permet pas de déterminer une échelle de quantification des écarts entre chacun des éclairages. Pour résoudre cet aspect nous avons appliqué, dans la partie qui suit, la loi du jugement comparatif.

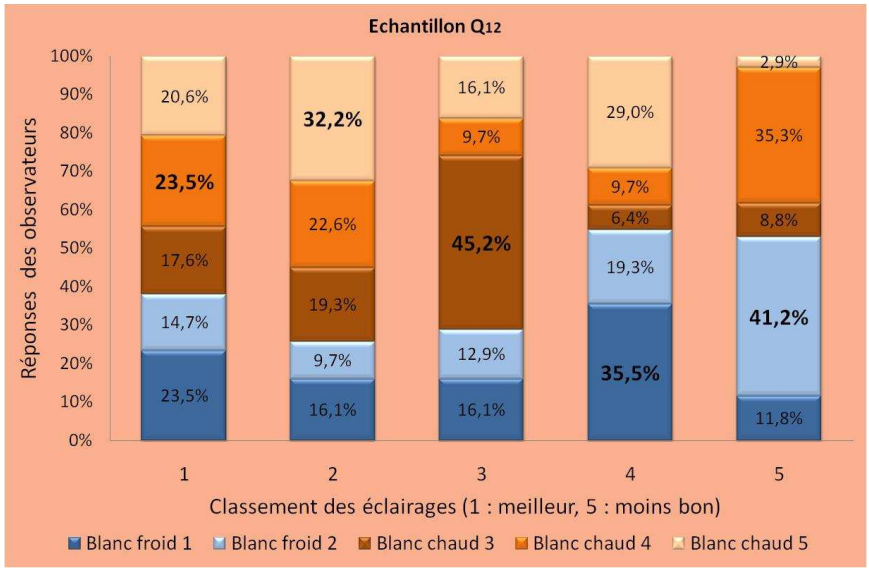

Echantillon Q1
Réponses des observateurs
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8,8%
11,8%
32,3%
47,0%
26,5%
5,9%
32,3%
35,3%
35,3%
2,9%
44,1%
8,8%
8,8%
26,5%
5,9%
41,2%
20,6%
5,9%
2,9%
91,2%
5,9%
1
2
3
4
5
Classement des éclairages (1 : meilleur, 5 : moins bon)
Blanc froid 1
Blanc froid 2
Blanc chaud 3
Blanc chaud 4
Blanc chaud 5


Echantillon Q3
Réponses des observateurs
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
3,0%
9,1%
75,7%
12,1%
3,1%
3,1%
12,5%
15,6%
65,6%
20,0%
6,7%
56,7%
3,3%
13,3%
59,4%
6,2%
25,0%
9,4%
12,1%
84,8%
3,0%
1
2
3
4
5
Classement des éclairages (1 : meilleur, 5 : moins bon)
Blanc froid 1
Blanc froid 2
Blanc chaud 3
Blanc chaud 4
Blanc chaud 5


Echantillon Q4
Réponses des observateurs
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
2,9%
64,7%
32,3%
2,9%
8,8%
26,5%
61,8%
34,4%
62,5%
3,1%
51,5%
12,1%
33,3%
3,0%
9,1%
87,9%
3,0%
1
2
3
4
5
Classement des éclairages (1 : meilleur, 5 : moins bon)
Blanc froid 1
Blanc froid 2
Blanc chaud 3
Blanc chaud 4
Blanc chaud 5


Echantillon Q8
Réponses des observateurs
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8,6%
20,0%
11,4%
60,0%
2,9%
14,7%
20,6%
38,2%
23,5%
13,3%
3,3%
53,3%
23,3%
6,7%
70,0%
10,0%
6,7%
10,0%
3,3%
6,7%
78,1%
3,1%
9,4%
3,3%
1
2
3
4
5
Classement des éclairages (1 : meilleur, 5 : moins bon)
Blanc froid 1
Blanc froid 2
Blanc chaud 3
Blanc chaud 4
Blanc chaud 5


Echantillon Q10
Réponses des observateurs
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
14,7%
17,6%
14,7%
11,8%
41,2%
24,2%
9,1%
21,2%
36,4%
9,1%
15,1%
51,5%
21,2%
12,1%
42,4%
6,1%
15,1%
15,1%
21,2%
2,9%
64,7%
17,6%
14,7%
1
2
3
4
5
Classement des éclairages (1 : meilleur, 5 : moins bon)
Blanc froid 1
Blanc froid 2
Blanc chaud 3
Blanc chaud 4
Blanc chaud 5


Echantillon Q12
Réponses des observateurs
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
20,6%
23,5%
17,6%
14,7%
23,5%
32,2%
22,6%
19,3%
9,7%
16,1%
16,1%
9,7%
45,2%
12,9%
16,1%
29,0%
9,7%
6,4%
19,3%
35,5%
2,9%
35,3%
8,8%
41,2%
11,8%
1
2
3
4
5
Classement des éclairages (1 : meilleur, 5 : moins bon)
Blanc froid 1
Blanc froid 2
Blanc chaud 3
Blanc chaud 4
Blanc chaud 5

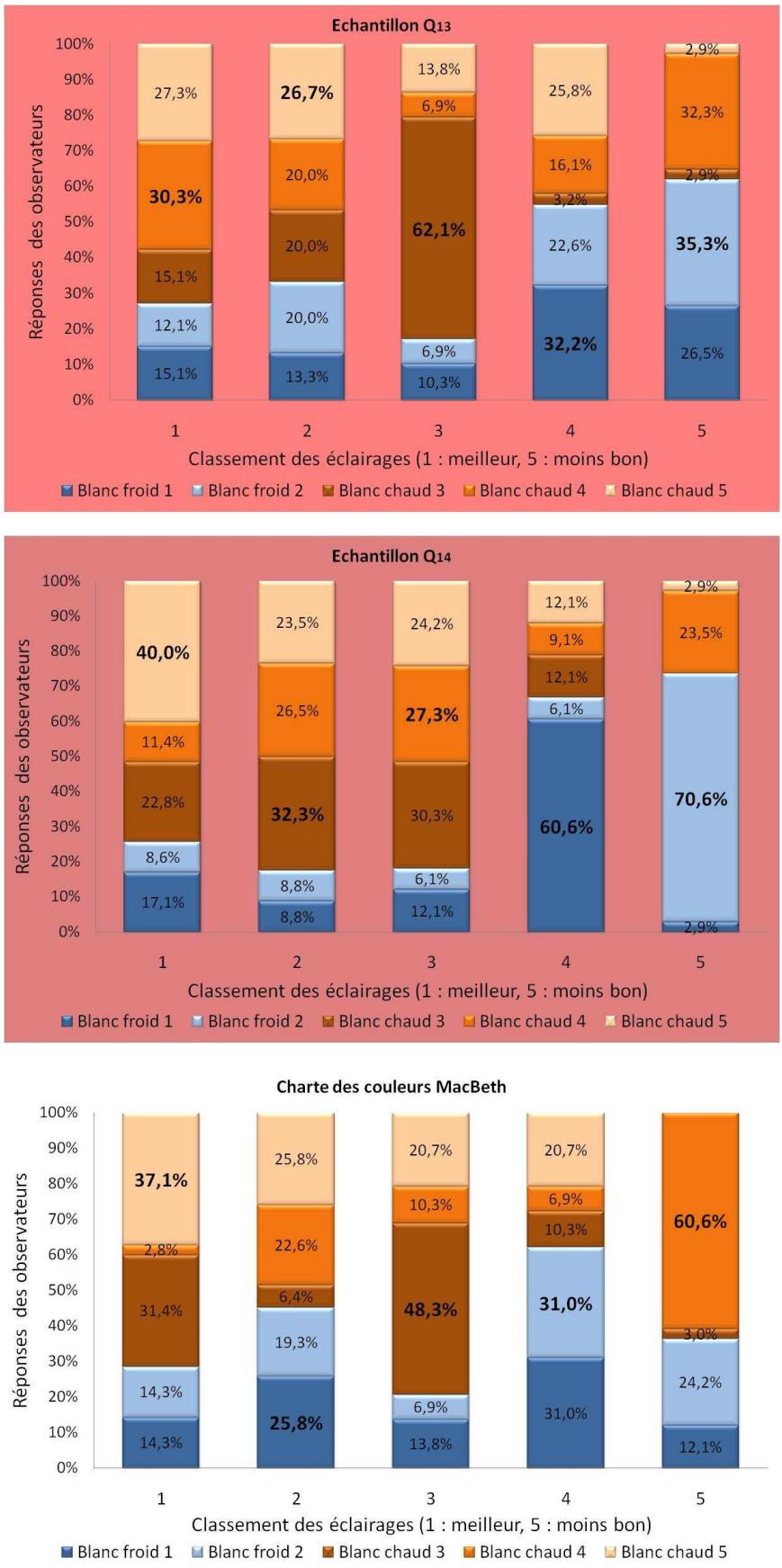


Fig. 4.13. - Répartitions des réponses des observateurs pour chacun des échantillons de couleur ainsi que pour la charte MacBeth.

Echantillon CQS		Classement moyen (analyse en moyenne)	Réponses observateurs majoritaires (%)	Accord avec CQS	Réponses observateurs en accord avec le CQS (%)	Classement CQS	Classement luminance lumineuse
Q1	1	Blanc froid 1	47	NON	12	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5
	2	Blanc froid 2	32	NON	35	Blanc froid 1	Blanc chaud 4
	3	Blanc chaud 5	35	NON	3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 3
	4	Blanc chaud 3	41	NON	21	Blanc froid 2	Blanc froid 1
	5	Blanc chaud 4	91	NON	3	Blanc chaud 5	Blanc froid 2
Q3	1	Blanc froid 2	76	NON	0	Blanc chaud 4	Blanc froid 1
	2	Blanc froid 1	66	NON	13	Blanc chaud 3	Blanc froid 2
	3	Blanc chaud 3	57	NON	20	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3
	4	Blanc chaud 5	59	NON	0	Blanc froid 2	Blanc chaud 4
	5	Blanc chaud 4	85	NON	0	Blanc froid 1	Blanc chaud 5
Q4	1	Blanc froid 2	65	NON	3	Blanc chaud 3	Blanc froid 1
	2	Blanc froid 1	62	NON	0	Blanc chaud 4	Blanc froid 2
	3	Blanc chaud 3	63	NON	34	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3
	4	Blanc chaud 5	52	NON	3	Blanc froid 1	Blanc chaud 5
	5	Blanc chaud 4	88	NON	3	Blanc froid 2	Blanc chaud 4
Q8	1	Blanc froid 1	60	NON	20	Blanc chaud 3	Blanc froid 1
	2	Blanc froid 2	38	NON	24	Blanc froid 1	Blanc froid 2
	3	Blanc chaud 3	53	NON	3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4
	4	Blanc chaud 5	70	OUI	70	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5
	5	Blanc chaud 4	78	NON	9	Blanc froid 2	Blanc chaud 3
Q10	1	Blanc froid 1	41	NON	15	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5
	2	Blanc froid 2	36	NON	9	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4
	3	Blanc chaud 3	52	NON	15	Blanc chaud 5	Blanc froid 1
	4	Blanc chaud 5	42	NON	15	Blanc froid 2	Blanc froid 2
	5	Blanc chaud 4	65	NON	15	Blanc froid 1	Blanc chaud 3
Q12	1	Blanc chaud 4	24	NON	18	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4
	2	Blanc chaud 5	32	NON	23	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5
	3	Blanc chaud 3	45	NON	16	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3
	4	Blanc froid 1	36	OUI	36	Blanc froid 1	Blanc froid 1
	5	Blanc froid 2	41	OUI	41	Blanc froid 2	Blanc froid 2
Q13	1	Blanc chaud 4	30	NON	15	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5
	2	Blanc chaud 5	27	NON	20	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4
	3	Blanc chaud 3	62	NON	14	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3
	4	Blanc froid 1	32	OUI	32	Blanc froid 1	Blanc froid 1
	5	Blanc froid 2	35	OUI	35	Blanc froid 2	Blanc froid 2
Q14	1	Blanc chaud 5	40	NON	23	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4
	2	Blanc chaud 3	32	NON	24	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5
	3	Blanc chaud 4	27	OUI	27	Blanc chaud 4	Blanc chaud 3
	4	Blanc froid 1	61	OUI	61	Blanc froid 1	Blanc froid 1
	5	Blanc froid 2	71	OUI	71	Blanc froid 2	Blanc froid 2
MacBeth	1	Blanc chaud 5	37	NON	31	Blanc chaud 3	
	2	Blanc froid 1	29	NON	23	Blanc chaud 4	
	3	Blanc chaud 3	48	NON	21	Blanc chaud 5	
	4	Blanc froid 2	31	NON	31	Blanc froid 1	
	5	Blanc chaud 4	61	NON	24	Blanc froid 2	

Tab. 4.9. - Classements des éclairages à LED obtenus par les observateurs comparés à ceux calculés par la méthode CQS.

2.4.4. Analyse par la loi du jugement comparatif

2.4.4.1. Introduction

La loi du jugement comparatif a été introduite par le psychophysicien Louis Léon Thurstone (1887-1955) en 1927 [THU 27b] en réponse aux problèmes de mesure d'attributs sociaux ou psychologiques complexes qui ne sont pas quantifiables par des grandeurs physiques. Cette loi permet de quantifier sur une échelle de valeur, la proportion avec laquelle un stimulus donné est jugé meilleur qu'un autre stimulus.

La psychophysique, développée au milieu du XIX^{ème} siècle, s'intéresse à la quantification de la relation entre un stimulus physique et la perception que l'humain en a. Cette discipline à mi-chemin entre la psychologie et la physique, repose sur une notion fondamentale qui est celle de seuil. Cette notion est liée la capacité de détection et de discrimination des systèmes sensoriels humains.

Pour la formalisation de la loi du jugement comparatif, L. L. Thurstone part de l'hypothèse que le seuil de discrimination est défini par une probabilité. Ainsi, deux stimuli (ou deux excitations) *i* et *j*, de niveaux différents, provoquent deux processus discriminatifs (ou deux réponses), s_i et s_j. A ces deux processus discriminatifs correspondent deux distributions sur le continuum psychologique, qui peuvent, par moment, être confondues (zone grise de la figure 4.14). De cette manière, s_i et s_j sont considérées comme étant deux variables aléatoires. L. L. Thurstone explique cela par le fait que les stimuli n'ont pas les mêmes effets sur l'organisme à chacune de leur présentation. Cela peut provenir de fluctuations de l'activité neuronale du système nerveux de l'observateur. De cette façon, un stimulus *i* n'est pas associé à un seul processus discriminatif mais à une multitude. Si l'on présente un stimulus à un observateur un grand nombre de fois, alors la distribution des processus discriminatifs *s* associés au stimulus, pourra être générée. L'hypothèse est faite que cette distribution correspond à une loi normale caractérisée par sa moyenne $\mu(s)$ et son écart-type $\sigma(s)$.

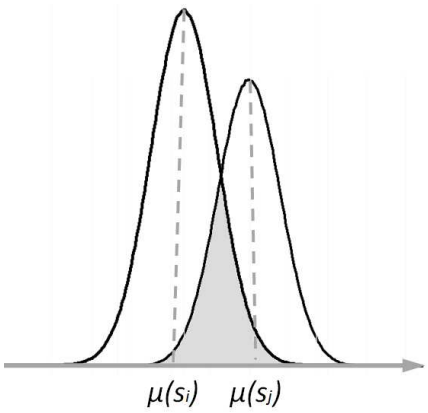


Fig. 4.14. - Distribution sur le continuum psychologique des processus discriminatifs associés à deux stimuli *i* et *j*. $\mu(s_i)$ correspond à la valeur moyenne de s_i et $\mu(s_j)$ à la valeur moyenne de s_j.

Chacun des processus discriminatifs obtenu possède une valeur contenue dans un continuum psychologique. L'existence de ce continuum psychologique est la base de la construction des échelles psychophysiques car il suppose l'existence d'une grandeur psychologique continue. Cette grandeur est supposée être corrélée à une grandeur physique, correspondant aux niveaux des stimuli, et appartement à un continuum physique.

Partant de ce principe, L. L. Thurstone exprime la loi du jugement comparatif, comme étant l'expression de la différence des moyennes des deux distributions associée à s_i et s_j [THU 27a] [THU 27b] [BON 86] :

$$\mu(s_i - s_j) = \mu(s_i) - \mu(s_j) = z_{ij}.\sigma_{s_j - s_i} = z_{ij}.\sqrt{\sigma^2(s_i) + \sigma^2(s_j) - 2.r_{ij}.\sigma(s_i).\sigma(s_j)} \qquad (4.5)$$

avec :

- z_{ij}, la valeur de la variable normale réduite correspondant à la probabilité que le stimulus *i* soit jugé supérieur au stimulus *j* : *p(i>j)* (2.4.4.2. Analyse par la « condition C »);
- $\sigma_{s_j - s_i}$, l'écart-type de la distribution de la différence des processus discriminatifs. L'expression de cet écart-type repose sur le même principe que l'expression (2.15) ;
- $\sigma(s_i)$ et $\sigma(s_j)$, les écarts-types des deux distributions associées à s_i et s_j ;
- r_{ij}, la corrélation entre les processus discriminatifs s_i et s_j associés aux stimuli *i* et *j*.

Comme l'explique L. L. Thurstone, cette équation ne peut pas être résolue en l'état compte tenu du grand nombre d'inconnues contenu dans l'expression de $\sigma_{s_j - s_i}$. Il est nécessaire de faire des hypothèses pour simplifier cette loi et la rendre applicable concrètement. L. L. Thurstone proposa cinq scénarios de simplification, notés de cas I à cas V [THU 27b]. En 1958, Warren S. Torgerson (1924-1997) [TOR 58] introduisit trois autres scénarios, basés sur ceux de L. L. Thurstone, dont deux, nommés « condition B » et « condition C », qui sont désormais très largement utilisés. La « condition A » ne présente qu'un intérêt théorique.

Pour la « condition B », deux hypothèses sont faites. La première stipule que tous les termes de corrélation sont égaux pour toutes les paires de stimuli (r_{ij} est assimilé à une constante *r*). La seconde indique que les différences entre les écarts-types des distributions associées aux processus discriminatifs sont faibles ($\sigma(s_i) - \sigma(s_j) = d$, avec *d* très petit par rapport à $\sigma(s_j)$).

Pour la « condition C », l'écart-type de la distribution de la différence des processus discriminatifs, $\sigma_{s_j - s_i}$, est considéré comme étant constant pour toutes les paires de stimuli ($\sigma_{s_j - s_i}$ est assimilé à une constante *c*).

La « condition C » est l'hypothèse la plus couramment retenue car c'est elle qui engendre le plus d'approximation, et qui, par conséquent est plus simple à mettre en œuvre. Cela étant, comme le dit Virgile Charton [CHA 02], l'hypothèse que l'écart-type de la distribution de la différence des processus discriminatifs est constant n'est pas toujours valable, notamment lorsque les stimuli sont complexes, ce qui est le cas dans notre expérience. Dans ces conditions, il est plus raisonnable de considérer que les différences entre les écarts-types des distributions associées aux processus discriminatifs, sont légèrement différents. Dans ce cas, cela revient à choisir d'appliquer la « condition B ».

Comme la « condition C » est plus simple à mettre en œuvre nous commencerons à la décrire en premier.

2.4.4.2. Analyse par la « condition C »

A l'issu des expériences de comparaisons par paires, il est possible de compter le nombre de fois qu'un stimulus *i*, a été jugé meilleur, par les observateurs, qu'un autre stimulus *j*. C'est ce que l'on appellera la fréquence des jugements. En divisant ce nombre par le nombre total de comparaisons effectuées par les observateurs, pour cette paire de stimuli, il est possible de calculer la probabilité *p(i>j)*. Les probabilités calculées pour l'ensemble des paires de stimuli sont synthétisées dans un tableau à double entrée, tel que représenté par le tableau 4.10, et que l'on nommera par la suite, « matrice P ».

La valeur de 0,5 assignée à chaque case de la diagonale du tableau (cases grises), est une valeur théorique, non vérifiée expérimentalement, qui indique l'équiprobabilité de jugement par les observateurs, d'un stimulus par rapport à lui-même.

Q1		Stimulus *i*				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Stimulus *j*	**1**	0,50	0,97	0,94	1,00	0,97
	2	0,03	0,50	0,69	0,80	0,63
	3	0,06	0,31	0,50	0,61	0,40
	4	0,00	0,20	0,39	0,50	0,18
	5	0,03	0,37	0,60	0,82	0,50

Tab. 4.10. - Matrice P : matrice des probabilités p_{ij} ($p(i>j)$) associées aux fréquences des jugements $i>j$ pour l'échantillon de couleur Q1. 1 : « blanc chaud 4 », 2 : « blanc chaud 3 », 3 : « blanc froid 2 », 4 : « blanc froid 1 », 5 : « blanc chaud 5 ».

A partir de la « matrice P », une nouvelle matrice, nommée « matrice Z », est calculée. Chaque élément de cette matrice, noté z_{ij}, est déterminé en se rapportant à une table [BON 86 (Annexe IV)] correspondant à une distribution normale réduite de moyenne nulle et d'écart-type égal à un (fig. 4.15). La surface comprise entre la courbe et l'axe des abscisses est égale à l'unité.

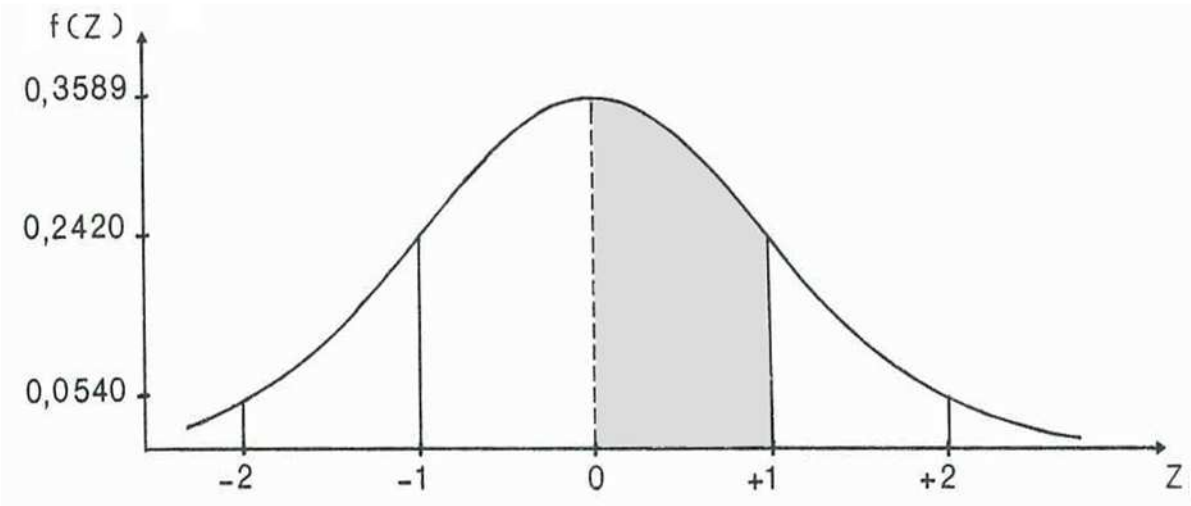


Fig. 4.15. - Distribution normale réduite de moyenne nulle et d'écart-type égal à un [BON 86].

Claude Bonnet explique [BON 86] que pour un écart-réduit z = 1 (fig. 4.15), $f(z)$ = 0,2420 et $p(z)$ = 0,3414. $p(z)$ correspond à la surface sous la courbe délimitée par la valeur z = 0 et par la valeur de z = 1 (zone grise de la figure 4.15). Donc la probabilité qu'une valeur quelconque de z soit inférieure ou égale à 1 est donnée par 0,3414 + 0,5 = 0,8413. De la même façon, la probabilité que z soit supérieur à 1 est donnée par 0,5 - 0,3414 = 0,1587.

Pour remplir la « matrice Z » (tab. 4.11) à partir de la « matrice P », il suffit de suivre ce raisonnement mais, à l'envers. Ainsi la probabilité $p(i=2 > j=1)$ = 0,97 donnera $p(z_{ij})$ = 0,47 et z_{ij} = +1,88 et la probabilité $p(i=2 > j=4)$ = 0,20 donnera $p(z_{ij})$ = 0,30 et z_{ij} = -0,84. Cette transformation permet de linéariser les valeurs de probabilités en unités d'écarts-réduits.

Lorsque les probabilités sont égales à 1 ou à 0, (uniquement pour les échantillons Q1 et Q4) nous avons choisi de limiter la valeur de l'écart réduit z_{ij} respectivement à 2 et à -2 pour ne pas engendrer de disproportion dans les résultats, avec des écarts réduits trop importants. Après avoir fait varier cette valeur des écarts-réduits entre 1,88 et 2,33 et entre -2,33 et -1,88, nous avons constaté que l'impact sur le résultat final n'est pas significatif pour ces deux échantillons.

Comme l'explique W. S. Torgerson [TOR 58], le classement des stimuli sur une échelle unidimensionnelle est ensuite possible par l'intermédiaire de la moyenne des écarts-réduits $M(z_{ij})$ (en gras dans le tableau 4.11) et tel que représenté sur la figure 4.16. La moyenne $M(z_{ij})$ est assimilable à $\mu(s_i)$ dans l'expression 4.5.

Q1		**Stimulus *i***				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Stimulus *j*	**1**	0,00	+1,88	+1,55	+2,00	+1,88
	2	-1,88	0,00	+0,50	+0,84	+0,33
	3	-1,55	-0,50	0,00	+0,28	-0,25
	4	-2,00	-0,84	-0,28	0,00	-0,92
	5	-1,88	-0,33	+0,25	+0,92	0,00
$M(z_{ij})$	$\frac{1}{n}\sum_j z_{ij}$	**-1,462**	**0,042**	**0,404**	**0,808**	**0,208**

Tab. 4.11. - Matrice Z : matrice des écarts-réduits z_{ij} pour l'échantillon de couleur Q1. *n* est égal au nombre d'éclairage à LED.

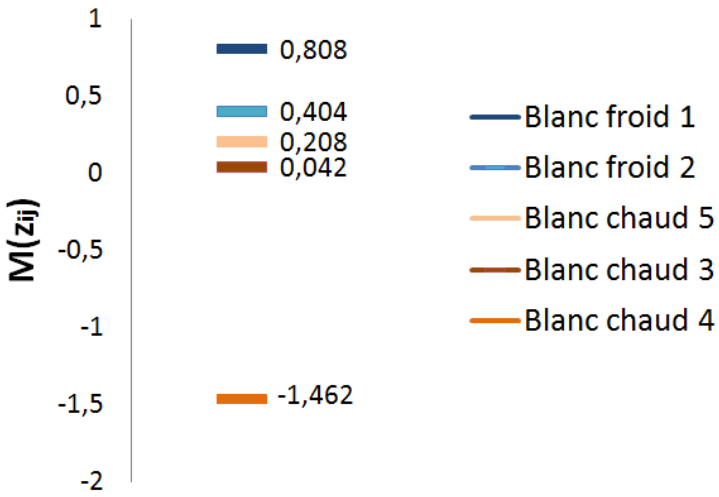


Fig. 4.16. - Echelle psychophysique obtenue par la « condition C » à partir des jugements d'observateurs, sur les cinq éclairages à LED, avec l'échantillon Q1.

2.4.4.3. Analyse par la « condition B »

Cette analyse prend pour point de départ la « matrice Z » calculée dans la « condition C ». Pour cette analyse nous devons estimer les écarts-types des distributions associées aux processus discriminatifs, qui ne sont plus considérées comme constants. Tel que le décrit V. Charton [CHA 02] à partir de l'analyse de W. S. Torgerson [TOR 58], ces valeurs sont obtenues par plusieurs étapes de calcul. La première consiste à calculer la quantité V_i, assimilable à une variance, exprimée par :

$$V_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[z_{ij} - M(z_{ij})\right]^2 \qquad (4.6)$$

De cette façon, nous obtenons une nouvelle matrice, notée « matrice V » (tableau 4.12), dont chaque élément correspond à $\left[z_{ij} - M(z_{ij})\right]^2$.

Q1		Stimulus *i*				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Stimulus *j*	**1**	2,137	3,378	1,313	1,421	2,796
	2	0,175	0,002	0,009	0,001	0,015
	3	0,008	0,294	0,163	0,279	0,210
	4	0,289	0,778	0,468	0,653	1,272
	5	0,175	0,138	0,024	0,013	0,043
V_i	$\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[z_{ij}-M(z_{ij})\right]^2$	**0,557**	**0,918**	**0,395**	**0,473**	**0,867**

Tab. 4.12. - Matrice V : matrice des éléments de variance pour l'échantillon de couleur Q1. *n* est égal au nombre d'éclairage à LED.

A partir de ces variances, il est possible de calculer les écarts-types σ_i, des distributions associées aux processus discriminatifs par [TOR 58] :

$$\sigma_i = \frac{B}{V_i} - 1 \tag{4.7}$$

avec :

$$B = \frac{2.n}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{V_i}} \tag{4.8}$$

Nous obtenons ainsi le tableau 4.13 :

	Stimulus *i*						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	$\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{V_i}$	B
$\frac{1}{V_i}$	1,796	1,089	2,529	2,113	1,153	8,680	1,152
σ_i	1,069	0,255	1,913	1,434	0,328		

Tab. 4.13. - Matrice des écarts-types de dispersion des processus discriminatifs.

Le classement des stimuli est ensuite possible en déterminant les valeurs de A_i (assimilables à $\mu(s_i)$ dans l'expression 4.5) telles que :

$$A_i = \frac{1}{n}.\left(\sum_j y_{ij} - \sum_i y_{ij}\right) = \frac{1}{n}.\left(\sigma_i.\sum_{j=1}^{n} z_{ij} + \sum_{j=1}^{n}\sigma_j z_{ij}\right) \tag{4.9}$$

Une nouvelle matrice, notée « matrice A » (tableau 4.14), contenant les éléments $y_{ij} = \sigma_i.z_{ij}$ est obtenue :

Q1		Stimulus *i*					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	$\sum_i y_{ij} = -\sum_{j=1}^{n} \sigma_j z_{ij}$
Stimulus *j*	**1**	0,000	0,479	2,965	2,869	0,618	6,931
	2	-2,010	0,000	0,957	1,205	0,108	0,260
	3	-1,657	-0,127	0,000	0,402	-0,082	-1,465
	4	-2,138	-0,214	-0,536	0,000	-0,302	-3,190
	5	-2,010	-0,084	0,478	1,320	0,000	-0,296
	$\sum_j y_{ij} = \sigma_i . \sum_{j=1}^{n} z_{ij}$	-7,814	0,054	3,865	5,795	0,342	
	$n.A_i = \sum_j y_{ij} - \sum_i y_{ij}$	-14,745	-0,207	5,329	8,985	0,637	
	***A*$_i$**	**-2,949**	**-0,041**	**1,066**	**1,797**	**0,127**	

Tab. 4.14. - « Matrice A » des valeurs de A_i.

Le classement des stimuli sur une échelle unidimensionnelle est ensuite effectué par l'intermédiaire des valeurs de A_i, tel que représenté sur la figure 4.17.

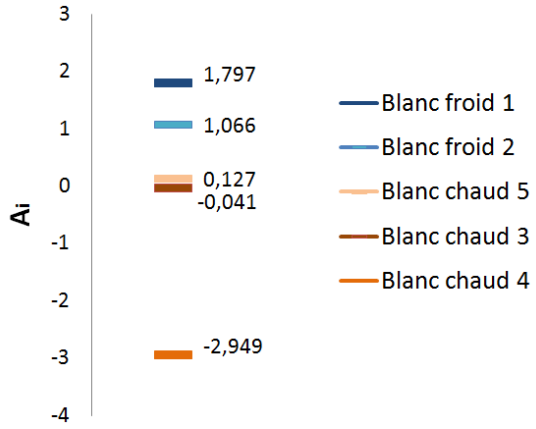
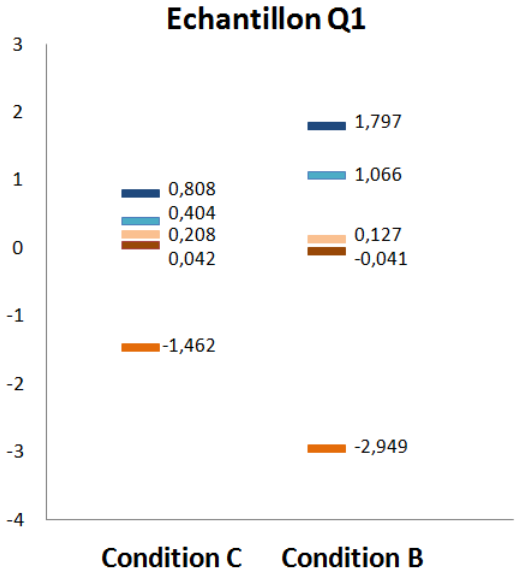


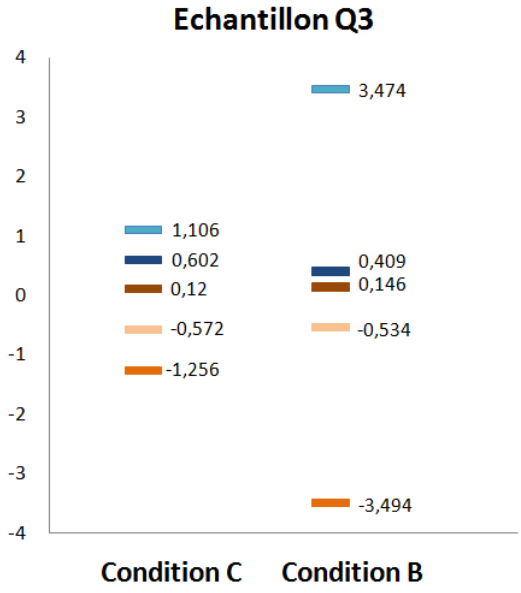
Fig. 4.17. - Echelle psychophysique obtenue par la « condition B » à partir des jugements d'observateurs, sur les cinq éclairages à LED, avec l'échantillon Q1.

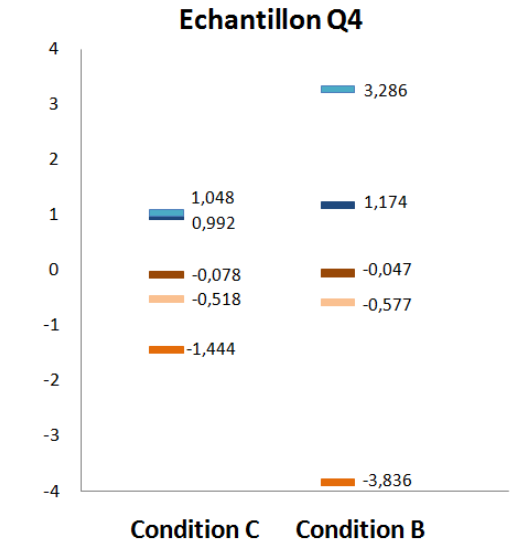
L'application de la « condition B » et de la « condition C » a l'ensemble des échantillons colorés permet d'obtenir deux classements différents. Ceux-ci sont représentés sur les figures 4.18.

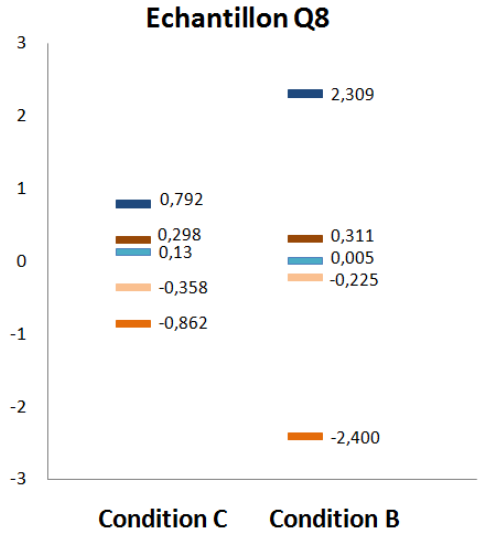
Comme nous pouvons le voir, le classement des éclairages est inchangé sauf pour les échantillons Q10, Q12 et Q14 où il y a, au maximum, une inversion entre deux éclairages. Cependant, les distances entre ces éclairages sont très faibles. Pour la charte des couleurs MacBeth, le classement des éclairages est très différent selon la condition appliquée. Cependant, nous constatons que pour la « condition C » l'éclairage blanc chaud 4 est classé en dernier alors qu'il est classé en deuxième avec le résultat de la « condition B ». Compte tenu du fait que pour la majorité des échantillons de couleur utilisé dans notre expérience cet éclairage est très souvent classé en dernier, il paraît plus raisonnable de prendre en compte la « condition C » plutôt que la « condition B ».

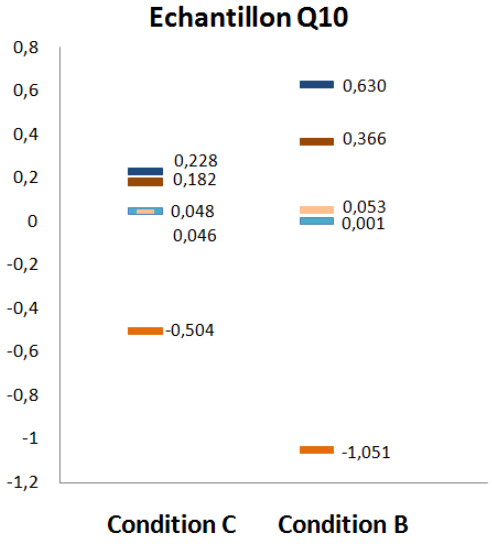
Le choix de la condition la plus appropriée peut être déterminé par la mise en œuvre de tests d'ajustements (« test of goodness of fit » en anglais).

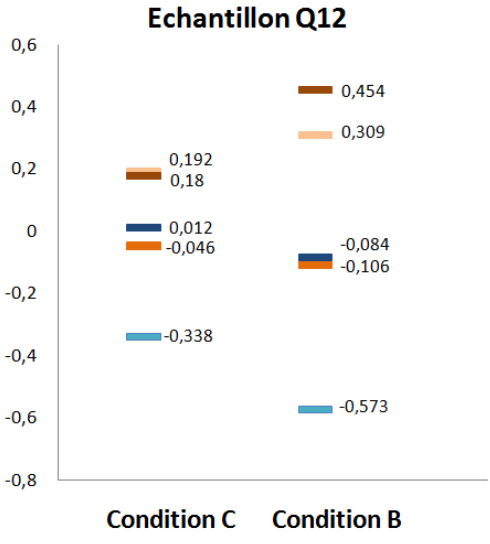

Echantillon Q1
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
0,808
0,404
0,208
0,042
-1,462
1,797
1,066
0,127
-0,041
-2,949
Condition C
Condition B


Echantillon Q3
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
1,106
0,602
0,12
-0,572
-1,256
3,474
0,409
0,146
-0,534
-3,494
Condition C
Condition B


Echantillon Q4
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
1,048
0,992
-0,078
-0,518
-1,444
3,286
1,174
-0,047
-0,577
-3,836
Condition C
Condition B


Echantillon Q8
3
2
1
0
-1
-2
-3
0,792
0,298
0,13
-0,358
-0,862
2,309
0,311
0,005
-0,225
-2,400
Condition C
Condition B


Echantillon Q10
0,8
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
-0,6
-0,8
-1
-1,2
0,228
0,182
0,048
0,046
-0,504
0,630
0,366
0,053
0,001
-1,051
Condition C
Condition B


Echantillon Q12
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
-0,6
-0,8
0,192
0,18
0,012
-0,046
-0,338
0,454
0,309
-0,084
-0,106
-0,573
Condition C
Condition B

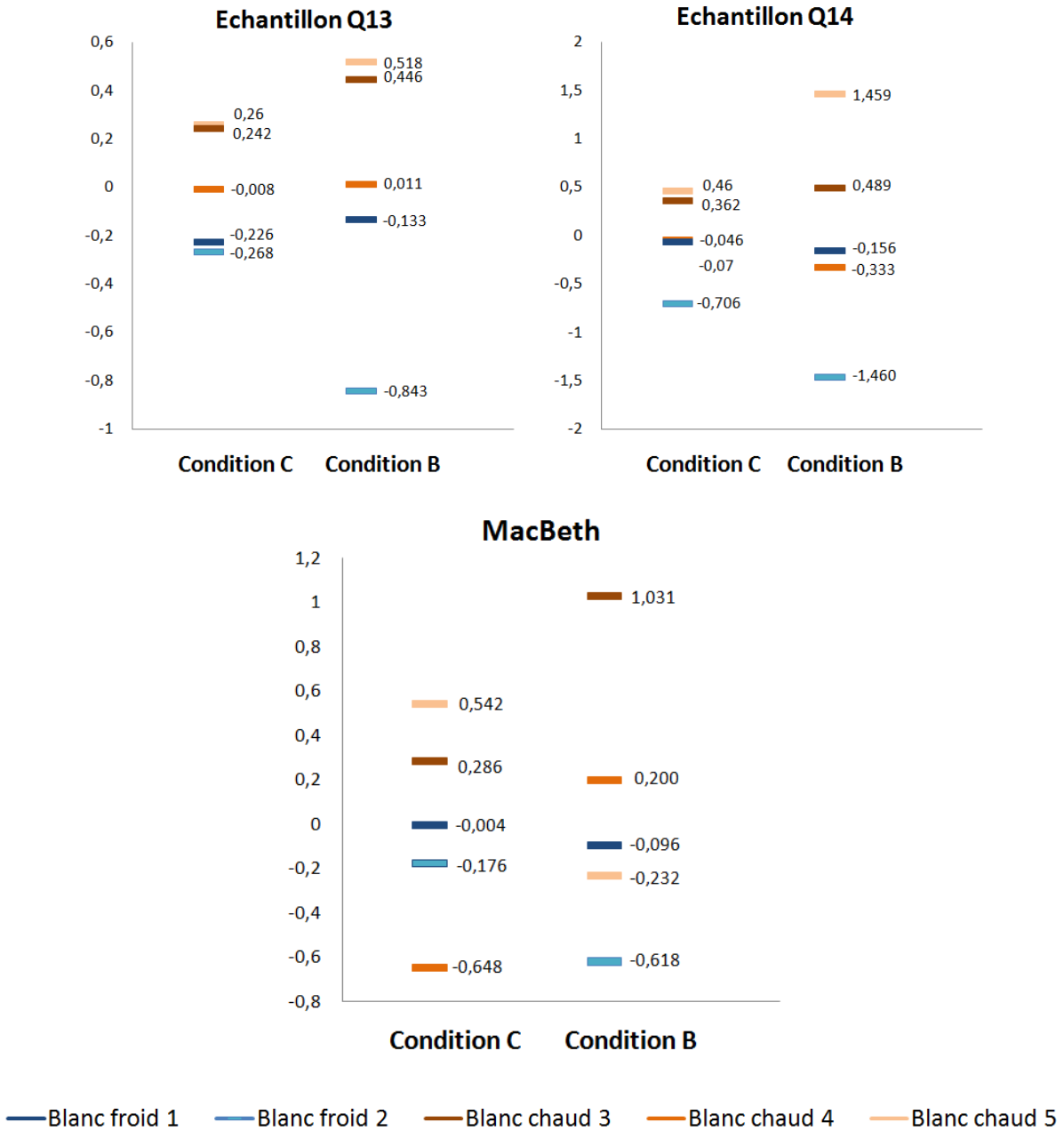


Fig. 4.18. - Classement des éclairages à LED obtenus par la loi du jugement comparatif à partir des conditions B et C.

2.4.4.4. Test d'ajustement

W. S. Torgerson explicite deux méthodes qui permettent de tester la validité des modèles théoriques (loi du jugement comparatif avec les hypothèses de la « condition B » et de la « condition C ») en déterminant l'ajustement entre les résultats prédits par ces modèles et les résultats observés [TOR 58].

Le premier test d'ajustement que nous nommerons « TA-M » a été proposé en 1951 par Frederick Mosteller (1916-2006) [MOS 51] pour le cas V de la loi du jugement comparatif. Du fait que la « condition C » de W. S. Torgerson est équivalente au cas V de la loi de L. L. Thurstone, la méthode de F. Mosteller peut être appliquée. Celle-ci correspond à une méthode basée sur le test du χ^2 - introduit par Karl Pearson (1857-1936) au début du XX^{ème} siècle - ainsi que sur une transformation en

arc sinus des valeurs de probabilités. W. S. Torgerson a complété cette méthode, en ajustant le calcul du degré de liberté nécessaire à l'application du test du χ^2, pour la rendre applicable avec la « condition B ». Selon les critères de W. S. Torgerson, la méthode n'est applicable que lorsque le nombre de stimuli est supérieur ou égal à six [TOR 58]. Celle-ci ne peut donc pas être mise en pratique dans notre cas, pour la « condition B ».

Le second test d'ajustement, que nous nommerons « TA-T », est celui proposé par W. S. Torgerson [TOR 58] dont le principe est de déterminer, en appliquant un modèle théorique (« condition B » et « condition C »), les probabilités *p''(i>j)* et *p'(i>j)* à partir des moyennes des écarts-réduits calculés dans la « matrice Z » pour la « condition C », et dans la « matrice A » pour la « condition B ». Au final il s'agit d'effectuer le cheminement inverse de celui réalisé pour l'obtention des échelles psychophysiques.

Etant donné que la méthode « TA-T » est d'une mise en œuvre plus simple, nous commençons par l'appliquer en premier sur la « condition C ».

« Condition C » - « TA-T »

Le point de départ de ce test d'ajustement est la « matrice Z », précédemment calculée, pour laquelle nous déterminons les moyennes $\underset{i}{M}(z_{ij})$ et $\underset{j}{M}(z_{ij})$ des écarts-réduits en fonction de *i* et de *j* (tab. 4.15).

Q1		**Stimulus *i***					$\underset{j}{M}(z_{ij}) = \frac{1}{n}\sum_{i} z_{ij}$
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	
Stimulus *j*	**1**	0,00	+1,88	+1,55	+2,00	+1,88	**1,462**
	2	-1,88	0,00	+0,50	+0,84	+0,33	**-0,042**
	3	-1,55	-0,50	0,00	+0,28	-0,25	**-0,404**
	4	-2,00	-0,84	-0,28	0,00	-0,92	**-0,808**
	5	-1,88	-0,33	+0,25	+0,92	0,00	**-0,208**
$\underset{i}{M}(z_{ij}) = \frac{1}{n}\sum_{j} z_{ij}$		**-1,462**	**0,042**	**0,404**	**0,808**	**0,208**	

Tab. 4.15. - Matrice Z : matrice des écarts-réduits z_{ij} pour l'échantillon de couleur Q1.

Une « matrice G » (tab. 4.16) est ensuite remplie par des éléments qui sont égaux à $\underset{i}{M}(z_{ij}) + \underset{j}{M}(z_{ij})$.

Q1		**Stimulus *i***				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Stimulus *j*	**1**	0,000	1,504	1,866	2,270	1,670
	2	-1,504	0,000	0,362	0,766	0,166
	3	-1,866	-0,362	0,000	0,404	-0,196
	4	-2,270	-0,766	-0,404	0,000	-0,600
	5	-1,670	-0,166	0,196	0,600	0,000

Tab. 4.16. - Matrice G : matrice des éléments $\underset{i}{M}(z_{ij}) + \underset{j}{M}(z_{ij})$ pour l'échantillon de couleur Q1.

Une « matrice P' » (tab. 4.17) des probabilités p'_{ij} déduites des valeurs de la « matrice G », est ensuite déterminée en se référant à une table correspondant à une distribution normale réduite de moyenne nulle et d'écart-type égal à un [BON 86 (Annexe IV)].

Q1		Stimulus *i*				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Stimulus *j*	**1**	0,500	0,933	0,969	0,988	0,953
	2	0,067	0,500	0,641	0,779	0,568
	3	0,031	0,359	0,500	0,655	0,421
	4	0,012	0,221	0,345	0,500	0,274
	5	0,048	0,436	0,579	0,726	0,500

Tab. 4.17. - Matrice P' : matrice des probabilités p'_{ij} pour l'échantillon de couleur Q1.

Enfin, une « matrice D » constituée par la différence entre les probabilités p_{ij} de la « matrice P » (tab. 4.10) et celles de la « matrice P' » est calculée (tab. 4.18). La moyenne des différences est ensuite effectuée. Les différences nulles de la diagonale du tableau 4.18 ne sont pas prises en compte dans la moyenne pour ne pas la diminuer artificiellement.

Q1		Stimulus *i*					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	
Stimulus *j*	**1**	0,000	0,037	0,029	0,012	0,018	
	2	0,037	0,000	0,049	0,021	0,063	
	3	0,029	0,049	0,000	0,045	0,021	
	4	0,012	0,021	0,045	0,000	0,094	
	5	0,018	0,066	0,021	0,094	0,000	$\frac{1}{n.(n-1)}.\sum_i\sum_j\left\|p_{ij}-p'_{ij}\right\|$
$\sum_j\left\|p_{ij}-p'_{ij}\right\|$		0,095	0,173	0,145	0,172	0,195	**0,039**

Tab. 4.18. - Matrice D : matrice des différences $\left|p_{ij}-p'_{ij}\right|$ pour l'échantillon de couleur Q1.

Plus la moyenne des différences $\left|p_{ij}-p'_{ij}\right|$ est faible, et meilleur est l'ajustement du modèle théorique aux données expérimentales. Comme l'explique V. Charton [CHA 02] la valeur de 0,039 indique, qu'en moyenne, les valeurs de probabilités observées *p(i>j)* présentent un écart de 3,9 % par rapport aux probabilités p'_{ij} prédites par le modèle théorique de la loi du jugement comparatif, simplifiée par la « condition C ». Par conséquent, l'ajustement semble tout à fait acceptable dans ce cas.

« Condition C » - « TA-M »

Cette méthode suit le même raisonnement que la méthode précédente pour l'obtention des probabilités p'_{ij} prédites.

A partir de la « matrice P » et de la « matrice P' » nous effectuons des transformations en arc sinus pour obtenir respectivement une « matrice θ » et une « matrice θ' ». Ainsi, chaque élément de la « matrice θ » (tab. 4.19) est composée d'éléments θ_{ij} calculés à partir des éléments de la « matrice P » par [MOS 51] [TOR 58] :

$$\theta_{ij} = \sin^{-1}.\sqrt{p_{ij}} \qquad (4.10)$$

Q1		Stimulus *i*				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Stimulus *j*	**1**	0,785	1,397	1,323	1,571	1,397
	2	0,174	0,785	0,980	1,107	0,917
	3	0,247	0,591	0,785	0,896	0,685
	4	0,000	0,464	0,674	0,785	0,438
	5	0,174	0,654	0,886	1,133	0,785

Tab. 4.19. - Matrice θ : matrice des transformations en arc sinus des valeurs de probabilités p_{ij} pour l'échantillon de couleur Q1.

De la même façon, la « matrice θ' » (tab. 4.20) est composée d'éléments θ'_{ij} calculés à partir des éléments de la « matrice P' » par [MOS 51] [TOR 58] :

$$\theta'_{ij} = \sin^{-1}.\sqrt{p'_{ij}} \tag{4.11}$$

Q1		Stimulus *i*				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Stimulus *j*	**1**	0,785	1,309	1,395	1,463	1,351
	2	0,261	0,785	0,928	1,082	0,853
	3	0,176	0,643	0,785	0,943	0,706
	4	0,108	0,489	0,627	0,785	0,551
	5	0,220	0,722	0,865	1,020	0,785

Tab. 4.20. - Matrice θ' : matrice des transformations en arc sinus des valeurs de probabilités p'_{ij} pour l'échantillon de couleur Q1.

Une nouvelle matrice, notée « matrice χ » (tab. 4.21), composée des éléments $(\theta'_{ij} - \theta_{ij})^2$ est ensuite calculée afin d'obtenir la valeur χ^2 exprimée par [MOS 51] [TOR 58] :

$$\chi^2 = \frac{\sum_i \sum_j (\theta'_{ij} - \theta_{ij})^2}{821 / N} \tag{4.12}$$

avec :

- N, nombre d'observations sur lesquelles sont basées les probabilités p_{ij}. Dans notre cas, N est égal à 350 (35 observateurs x 10 paires d'éclairages).

Cette valeur de χ^2, associée au nombre de degrés de liberté calculés à partir du nombre de stimuli par $(n-1).\frac{(n-2)}{2}$ [MOS 51] [TOR 58], doit être comparée aux valeurs d'une table d'une loi en χ^2. Ainsi, pour la valeur de 0,042 calculée pour l'échantillon Q1, dans le cadre de la « condition C », le nombre de degrés de liberté est égal à six, et la probabilité d'accord des données prédites par le modèle théorique aux données expérimentales est supérieure à 95%.

Q1		Stimulus *i*						
		1	**2**	**3**	**4**	**5**		
Stimulus *j*	**1**	0,000	0,008	0,005	0,012	0,002		
	2	0,008	0,000	0,003	0,001	0,004		
	3	0,005	0,003	0,000	0,002	0,000		
	4	0,012	0,001	0,002	0,000	0,013		
	5	0,002	0,005	0,000	0,013	0,000	$\sum_i \sum_j (\theta'_{ij} - \theta_{ij})^2$	χ^2
$\sum_j (\theta'_{ij} - \theta_{ij})^2$		0,026	0,016	0,010	0,027	0,019	0,099	**0,042**

Tab. 4.21. - Matrice χ : matrice des éléments $(\theta'_{ij} - \theta_{ij})^2$ pour l'échantillon de couleur Q1.

« Condition B » - « TA-T »

Les éléments A_i de la « matrice A » (tab. 4.14) sont utilisés pour établir une « matrice G' » d'écarts-réduits dont chaque élément est égal à $A_i + A_j$ (tab. 4.22).

Q1		Stimulus *i*					$A_j = -A_i$
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	
Stimulus *j*	**1**	0,000	2,908	4,015	4,746	3,077	**2,949**
	2	-2,908	0,000	1,107	1,838	0,169	**0,041**
	3	-4,015	-1,107	0,000	0,731	-0,938	**-1,066**
	4	-4,746	-1,838	-0,731	0,000	-1,670	**-1,797**
	5	-3,077	-0,169	0,938	1,670	0,000	**-0,127**
A_i		**-2,949**	**-0,041**	**1,066**	**1,797**	**0,127**	

Tab. 4.22. - Matrice G' : matrice des éléments $A_i + A_j$ pour l'échantillon de couleur Q1.

A partir des éléments de la « matrice G' », les probabilités p''_{ij} sont obtenues en se référant à une table correspondant à une distribution normale réduite de moyenne nulle et d'écart-type égal à un [BON 86 (Annexe IV)]. La matrice P'' résultante est représentée par le tableau 4.23.

Q1		Stimulus *i*				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Stimulus *j*	**1**	0,500	0,998	1,000	1,000	0,999
	2	0,002	0,500	0,867	0,967	0,568
	3	0,000	0,134	0,500	0,767	0,174
	4	0,000	0,033	0,233	0,500	0,048
	5	0,001	0,432	0,826	0,953	0,500

Tab. 4.23. - Matrice P'' : matrice des probabilités p''_{ij} pour l'échantillon de couleur Q1.

Enfin, une « matrice D' » constituée par la différence entre les probabilités p_{ij} de la « matrice P » (tab. 4.10) et celles de la « matrice P'' » est calculée (tab. 4.24). La moyenne des différences est

ensuite effectuée. Comme précédemment, les différences nulles de la diagonale du tableau 4.24 ne sont pas prises en compte dans la moyenne pour ne pas la diminuer artificiellement.

Q1		**Stimulus *i***					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	
Stimulus *j*	**1**	0,000	0,028	0,060	0,000	0,029	
	2	0,028	0,000	0,176	0,167	0,062	
	3	0,060	0,176	0,000	0,157	0,226	
	4	0,000	0,167	0,157	0,000	0,132	
	5	0,029	0,062	0,226	0,132	0,000	$\frac{1}{n.(n-1)}.\sum_i\sum_j\left\|p_{ij}-p'_{ij}\right\|$
$\sum_j\left\|p_{ij}-p'_{ij}\right\|$		0,117	0,434	0,620	0,457	0,451	**0,104**

Tab. 4.24. - Matrice D' : matrice des différences $\left|p_{ij}-p''_{ij}\right|$ pour l'échantillon de couleur Q1.

Ces tests d'ajustements ont été appliqués pour l'ensemble des échantillons colorés, et à chaque fois dans les deux conditions B et C (tableau 4.25).

Echantillons CQS	**Condition C**		**Condition B**
	TA-T	**TA-M**	**TA-T**
Q1	0,039	0,042	0,104
Q3	0,064	0,113	0,095
Q4	0,054	0,151	0,064
Q8	0,065	0,075	0,150
Q10	0,036	0,021	0,123
Q12	0,054	0,030	0,089
Q13	0,043	0,025	0,121
Q14	0,070	0,088	0,151
MacBeth	0,051	0,069	0,191

Tab. 4.25. - Résultats des tests d'ajustements sur la loi du jugement comparatif avec les hypothèses de la « condition B » et celles de la « condition C ».

D'après le tableau 4.25, les tests d'ajustement donnent, pour la « condition C », de meilleurs résultats que pour la « condition B ». Par conséquent, nous ne conserverons dans la suite du chapitre, que les classements obtenus par la « condition C ».

2.4.4.5. Résultats

Les différents classements issus des mesures de luminance lumineuse, de l'analyse en moyenne, de la loi du jugement comparatif et des prédictions du CQS, ont été comparés (tab. 4.26).

Les classements entre l'analyse en moyenne et la loi du jugement comparatif sont égaux pour les échantillons Q1, Q3, Q4 et Q14. Il y a une inversion pour les échantillons Q8, Q10 et la charte MacBeth. Pour l'échantillon Q13, il y a deux inversions, et pour l'échantillon Q12, seul le classement de l'éclairage blanc froid 2 en dernière position, est conservé.

Echantillon CQS		Classement observateurs (Condition C)	Classement observateurs (analyse en moyenne)	Classement CQS	Classement luminance lumineuse
Q1	1	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5
	2	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc froid 1	Blanc chaud 4
	3	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 3
	4	Blanc chaud 3	Blanc chaud 3	Blanc froid 2	Blanc froid 1
	5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5	Blanc froid 2
Q3	1	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc chaud 4	Blanc froid 1
	2	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc chaud 3	Blanc froid 2
	3	Blanc chaud 3	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3
	4	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5	Blanc froid 2	Blanc chaud 4
	5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4	Blanc froid 1	Blanc chaud 5
Q4	1	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc chaud 3	Blanc froid 1
	2	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc chaud 4	Blanc froid 2
	3	Blanc chaud 3	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3
	4	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5	Blanc froid 1	Blanc chaud 5
	5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4	Blanc froid 2	Blanc chaud 4
Q8	1	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc chaud 3	Blanc froid 1
	2	Blanc chaud 3	Blanc froid 2	Blanc froid 1	Blanc froid 2
	3	Blanc froid 2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4
	4	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5
	5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4	Blanc froid 2	Blanc chaud 3
Q10	1	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5
	2	Blanc chaud 3	Blanc froid 2	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4
	3	Blanc chaud 2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	Blanc froid 1
	4	Blanc froid 5	Blanc chaud 5	Blanc froid 2	Blanc froid 2
	5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4	Blanc froid 1	Blanc chaud 3
Q12	1	Blanc chaud 5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4
	2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5
	3	Blanc froid 1	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3
	4	Blanc chaud 4	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc froid 1
	5	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc froid 2
Q13	1	Blanc chaud 5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5
	2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4
	3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3
	4	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc froid 1
	5	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc froid 2
Q14	1	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4
	2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5
	3	Blanc froid 4	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4	Blanc chaud 3
	4	Blanc chaud 1	Blanc froid 1	Blanc froid 1	Blanc froid 1
	5	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc froid 2
MacBeth	1	Blanc chaud 5	Blanc chaud 5	Blanc chaud 3	
	2	Blanc chaud 3	Blanc froid 1	Blanc chaud 4	
	3	Blanc froid 1	Blanc chaud 3	Blanc chaud 5	
	4	Blanc froid 2	Blanc froid 2	Blanc froid 1	
	5	Blanc chaud 4	Blanc chaud 4	Blanc froid 2	

Tab. 4.26. - Classements des éclairages à LED obtenus par les observateurs comparés à ceux calculés par la méthode CQS.

Des incertitudes ont été associées aux valeurs moyennes des écarts réduits (qui correspondent aux moyennes des processus discriminatifs) calculés par la « condition C ». Dans une première approche, ces incertitudes, pour un niveau de confiance de 95%, sont estimées par k.[(√2/2)/√N] avec k, le facteur d'élargissement égal à 1,96 et, N le nombre d'observateurs [MON 06].

Les écarts obtenus entre les éclairages à LED, par la « condition C », ont ensuite été comparés à ceux prédits par la méthode CQS (fig. 4.19). Les résultats permettent d'avoir une vision beaucoup plus détaillée des classements des éclairages. Ils permettent également de confirmer globalement les observations de l'analyse en moyenne, précédemment effectuée, et d'apporter les compléments suivants :

Echantillons bleus

Pour les échantillons Q3 et Q4, les incertitudes confirment la nette tendance observée sur le classement des éclairages par l'analyse en moyenne. La discrimination entre les éclairages pour l'échantillon Q3 est très bonne et affirme l'inversion quasi totale entre le classement issu des mesures visuelles et celui issu des prédictions du CQS.

Echantillons orange/rouge

Pour les échantillons Q12 et Q14 il est possible, au travers des résultats de la « condition C », de regrouper les éclairages dans trois catégories. La première est constituée des éclairages blanc chaud 3 et 5, la deuxième du blanc chaud 4 et du blanc froid 1 et la troisième constituée du blanc froid 2. Pour les résultats issus du CQS les catégories sont légèrement différentes. La première correspond au blanc chaud 3, la deuxième au blanc chaud 4 et 5, et la troisième au blanc froid 1 et 2. Malgré tout, les deux types de classements ne sont pas inversés comme pour les échantillons bleus. Aux regards des incertitudes sur les mesures visuelles, les prédictions du CQS semblent acceptables.

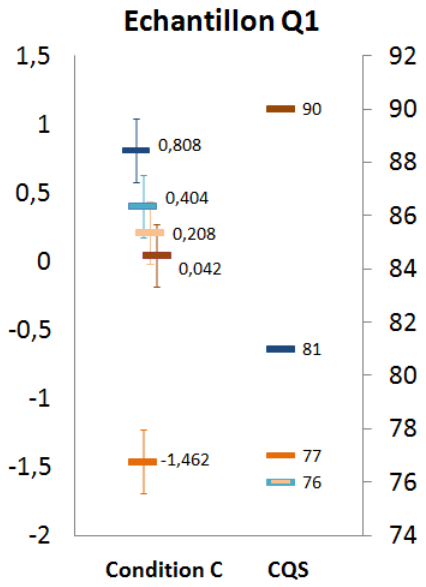
Autres échantillons

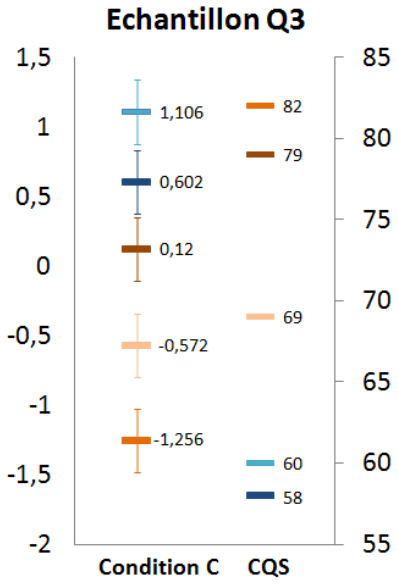
Pour l'échantillon Q1, le blanc chaud 4 est classé, d'après les résultats issus de la « condition C », très significativement en dernière position. Ceci n'est pas en accord avec le CQS qui positionne les trois éclairages, blanc chaud 4, blanc chaud 5 et blanc froid 1, au même niveau et en dernière position.

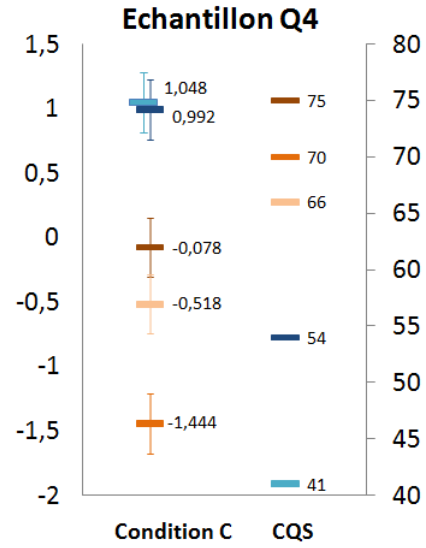
Pour l'échantillon Q8, les incertitudes nuancent les résultats de la précédente analyse concernant le classement des éclairages, notamment en ce qui concerne les blancs froids.

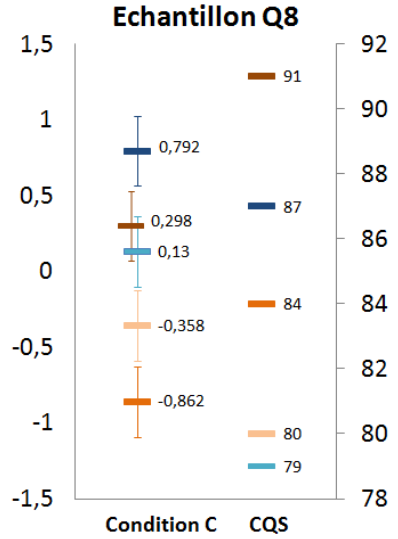
Pour l'échantillon Q10, si l'on prend en compte les incertitudes, seul le blanc chaud 4 se distingue nettement en étant classé en dernière position. Il est très difficile de tirer une conclusion sur le classement des autres éclairages.

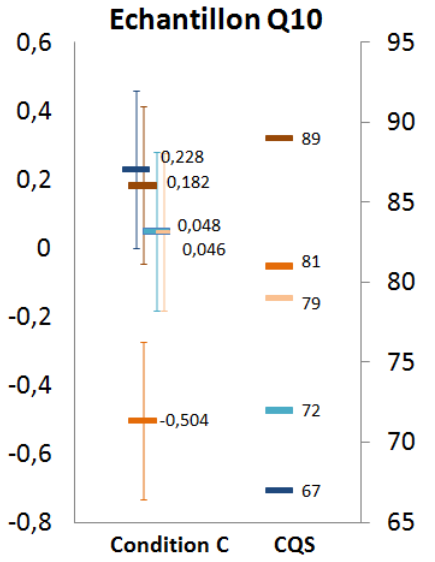
Pour la charte des couleurs de MacBeth, il apparaît que l'éclairage blanc chaud 5 est classé en premier et l'éclairage blanc chaud 4 en dernier. Or, le CQS classe ces deux éclairages respectivement, en troisième et deuxième position, avec des valeurs d'indices très proches.

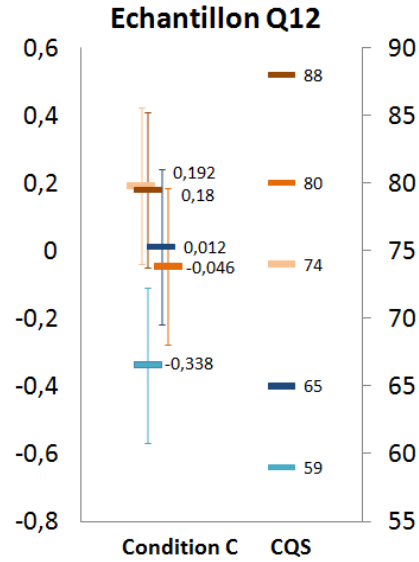

Echantillon Q1
1,5
1
0,5
0
-0,5
-1
-1,5
-2
92
90
88
86
84
82
80
78
76
74
0,808
0,404
0,208
0,042
-1,462
90
81
77
76
Condition C
CQS


Echantillon Q3
1,5
1
0,5
0
-0,5
-1
-1,5
-2
85
80
75
70
65
60
55
1,106
0,602
0,12
-0,572
-1,256
82
79
69
60
58
Condition C
CQS


Echantillon Q4
1,5
1
0,5
0
-0,5
-1
-1,5
-2
80
75
70
65
60
55
50
45
40
1,048
0,992
-0,078
-0,518
-1,444
75
70
66
54
41
Condition C
CQS


Echantillon Q8
1,5
1
0,5
0
-0,5
-1
-1,5
92
90
88
86
84
82
80
78
0,792
0,298
0,13
-0,358
-0,862
91
87
84
80
79
Condition C
CQS


Echantillon Q10
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
-0,6
-0,8
95
90
85
80
75
70
65
0,228
0,182
0,048
0,046
-0,504
89
81
79
72
67
Condition C
CQS


Echantillon Q12
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
-0,6
-0,8
90
85
80
75
70
65
60
55
0,192
0,18
0,012
-0,046
-0,338
88
80
74
65
59
Condition C
CQS

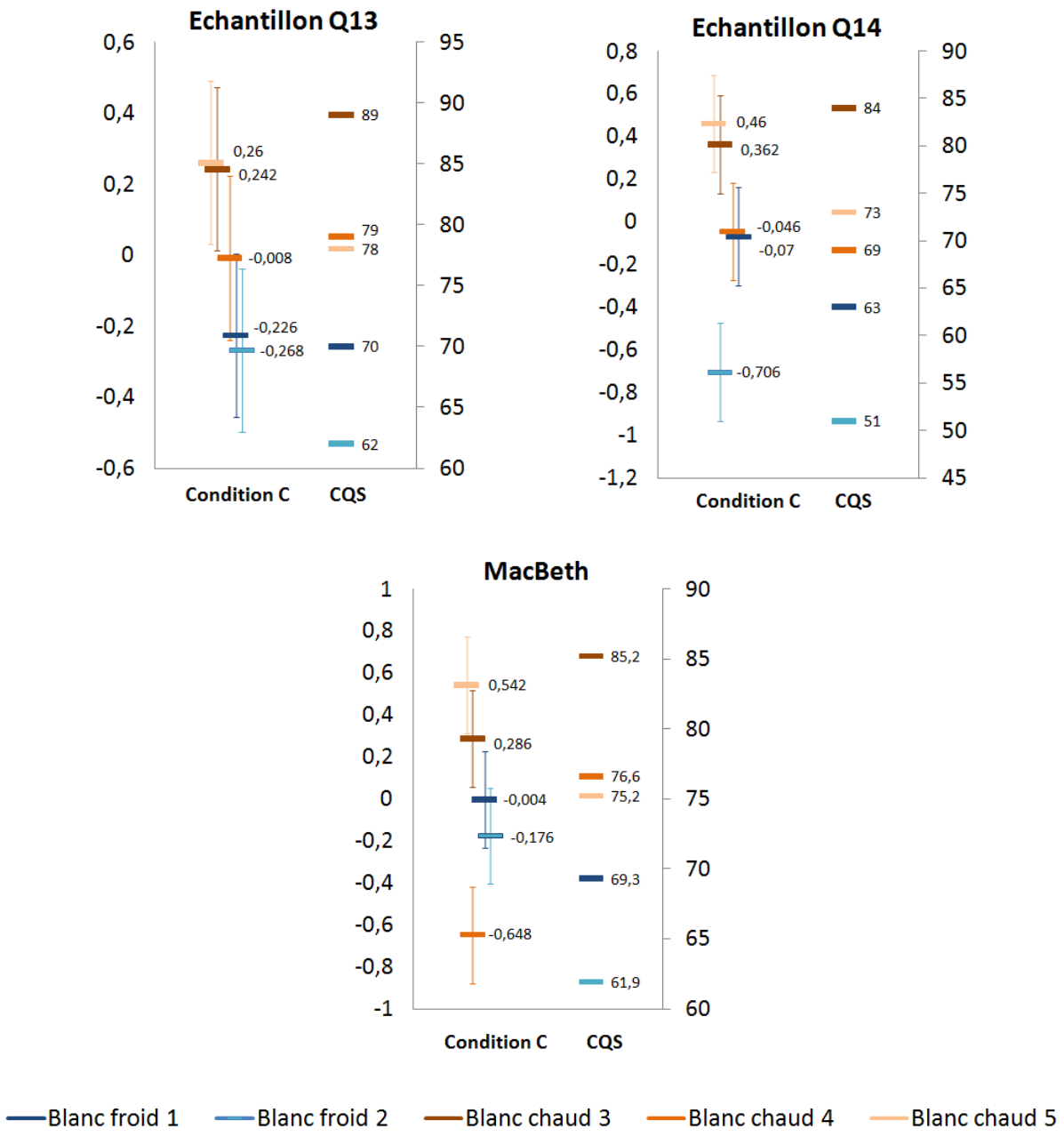


Fig. 4.19. - Comparaisons des classements des éclairages à LED obtenus par la loi du jugement comparatif et prédits par le CQS.

2.5. Conclusion sur l'étude psychophysique

Cette étude a porté sur la qualité de la lumière émise par des éclairages à LED. Selon les résultats obtenus, le concept de qualité d'un éclairage est corrélé avec la température de couleur proximale de la source et la couleur de l'échantillon. Pour les échantillons de couleur bleue, les observateurs choisissent un éclairage ayant une température de couleur élevée (blancs froids). Pour des échantillons orange/rouge, les réponses des observateurs sont plus confuses que pour les échantillons bleus mais globalement, les éclairages blancs chauds sont favorisés.

Nous pensons que si les observateurs préfèrent un éclairage blanc froid pour des échantillons bleus et un éclairage blanc chaud pour des échantillons oranges/rouges, cela provient du fait que la notion de qualité d'un éclairage renvoie vers une sensation de saturation de l'échantillon.

Le terme de qualité renvoie vers des critères de subjectivité entre observateurs très différents et parfois contradictoires. Une approche linguistique et anthropologique semble nécessaire. Il est d'ores et déjà possible d'affirmer que certains observateurs privilégient l'éclairage qui produit un effet de saturation sur l'échantillon alors que d'autres, au contraire, rejettent cet effet de saturation au profit de la netteté de la surface, où l'on peut distinguer les défauts de l'échantillon.

Etant donné la multitude de notions que sous entend le terme de qualité, on peut s'interroger sur la pertinence d'un unique indicateur de quantification de la qualité d'un éclairage. La définition de plusieurs indices qui renvoie vers des notions plus explicites paraît plus approprié qu'un seul indice, d'un usage commercial facile et en apparence simple, mais au contraire difficile à définir pour un utilisateur non expert.

La méthode CQS, proposée par le NIST, apporte, sans nul doute, des améliorations très intéressantes par rapport à la méthode CIE 13.3 de 1995 : utilisation d'échantillons de couleurs plus saturés, calculs dans des espaces colorimétriques plus uniformes, moyenne quadratique pour l'estimation des différences de couleur, suppression des valeurs négatives pour les indices,... Cela étant, ces modifications ne semblent pas toujours pertinentes. D'après les résultats obtenus, et dans les conditions de notre expérience, les prédictions du CQS ne sont pas satisfaisantes.

A partir des résultats tirés de notre expérience nous pouvons suggérer plusieurs axes d'améliorations du CQS :

- Nous pensons qu'il serait intéressant de favoriser, dans le calcul des indices particuliers Q_i, les éclairages qui augmentent la saturation des échantillons colorés, notamment pour les échantillons de couleurs bleus. Les résultats des observateurs semblent unanimes sur ce point.
- Il apparaît, pour plusieurs échantillons colorés, que l'éclairage blanc chaud 4, de température de couleur égale à 2850 K, est très souvent classé en dernière position par les observateurs. Cela provient du fait que cet éclairage illumine les échantillons avec une teinte très jaunâtre. Il nous semble intéressant de revoir le calcul du facteur M_{CCT} (fig. 4.5) introduit dans le CQS pour pénaliser davantage les sources de faible température de couleur proximale.
- Nous proposons également que les indices spéciaux Q_p et Q_f, destinés à un public d'utilisateurs expérimentés, soient calculés pour chaque échantillon colorés en complément des indices particuliers Q_i, et non pas uniquement en complément de l'indice général Q_a.

3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de détailler, dans une première partie, les points faibles de la méthode de détermination de l'indice de rendu des couleurs. Un nouvelle méthode explicitée en 1999, à l'issue du comité technique TC 1-33, a été proposée mais n'a pas été retenue faute de consensus parmi les membres. Un nouveau comité technique crée en 2006 a permis de relancer le débat sur ce sujet. Conformément aux jalons fixés par ce comité, de nouvelles méthodes de calcul ont été proposées, par différents laboratoires dans le monde, en septembre 2009. Compte tenu du caractère très récent des méthodes proposées, nous avons pris le parti de n'en détailler qu'une seule. Il s'agit de celle proposée par le NIST (Color Quality Scale (CQS)), dont la première communication a été publiée en 2005.

Une deuxième partie concerne la mise en place d'une expérience psychophysique qui prend comme point de départ les échantillons de couleurs utilisés dans le CQS. Ceux-ci nous ont permis de quantifier, à partir de mesures visuelles, la qualité des éclairages à LED de la cabine à lumière. Nous avons également pu comparer les résultats obtenus et ceux prédits par le CQS. Dans la configuration

de notre expérience, nous avons pu mettre en évidence une mauvaise concordance des résultats, notamment pour les échantillons bleus. Ceci nous a permis de dégager des axes d'améliorations de la méthode CQS.

Par manque de temps nous n'avons pas pu mettre en application, pour l'instant, les améliorations suggérées pour le CQS. De plus, nous n'avons pas mis en place de calcul d'incertitude associé aux indices du CQS. Celui-ci nécessite, d'une part, une connaissance très détaillée de la méthode de détermination du CQS (dont la dernière version nous a été communiquée à la fin du mois de septembre 2009), et d'autre part, une analyse des corrélations entre les différents paramètres intervenant dans le calcul (au même titre que les corrélations intervenant dans le calcul de l'indice de rendu des couleurs).

Les résultats obtenus, à partir de l'expérience mise en place à l'INM, ont été communiqués au comité technique TC 1-69 en septembre 2009. Les points d'amélioration du CQS que nous avons suggérés seront soumis au comité technique TC 1-69 au début de l'année 2010.

Conclusion générale

"Le connu est fini, l'inconnu infini ; ce que nous comprenons n'est qu'un îlot perdu dans l'océan illimité de l'inexplicable. Et chaque génération se devra d'agrandir ce territoire"

[Thomas Henri Huxley, biologiste britannique, 1825-1895]

Avec l'apparition des diodes électroluminescentes de forte puissance au début des années 2000, un besoin de caractérisation de propriétés radiométriques, photométriques et colorimétriques de ces sources s'est accru.

L'équipe « Rayonnements optiques » de l'Institut national de métrologie s'est penchée sur cette thématique au cours des années 2006-2009.

La mise en place d'un banc de mesure en intensité lumineuse et d'un banc de caractérisation des propriétés des LED de faible puissance (inférieure à 1 W) a constitué un prélude au sujet principal du travail de recherche entrepris avec cette thèse. Le développement de ces bancs, complété par une étude de l'état de l'art sur les LED, nous a permis de préparer la mise en place d'une salle dédiée aux mesures sur des éclairages à LED de forte puissance (supérieure ou égale à 1 W).

Dans ce sens, nous avons aménagé une salle autour d'une cabine à lumière contenant des éclairages à LED afin de satisfaire deux objectifs. Le premier était de pouvoir réaliser des mesures physiques sur les éclairages, grâce notamment à un spectroradiomètre. Le second était de pouvoir réaliser des mesures visuelles avec des observateurs sur ces mêmes éclairages.

Concernant le premier objectif, le principal travail a consisté à calculer les incertitudes de mesure sur la répartition spectrale des éclairages à LED, au travers de la quantification des sources d'erreur (étalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre, fonction de transfert du monochromateur, non linéarité du détecteur, phénomène de diffusion,…). Les incertitudes ont été déterminées par simulation Monte Carlo. D'autres simulations Monte Carlo ont permis de déterminer les incertitudes sur les paramètres colorimétriques (coordonnées chromatiques, température de couleur proximale et indices de rendu des couleurs) calculés à partir des répartitions spectrales.
L'étude de paramètres d'influence intervenant à trois niveaux de détermination des paramètres colorimétriques ont été étudiés :

- le courant d'alimentation agissant directement sur les éclairages à LED ;
- la fonction de transfert du monochromateur ;
- le choix des fonctions colorimétriques et du pas d'échantillonnage (en longueur d'onde) des fonctions de répartition spectrale qui interviennent dans la méthode de calcul des paramètres colorimétriques.

Pour le second objectif, une expérience psychophysique reposant sur une méthode de comparaison par paires a permis de quantifier, au travers de mesures visuelles, la qualité des éclairages à LED sur

plusieurs échantillons colorés. Une analyse en moyenne, puis une analyse par la loi du jugement comparatif, des résultats issus des observateurs, ont permis d'obtenir un classement des éclairages à LED, du meilleur au moins bon, pour chaque échantillon.

La confrontation des résultats obtenus, d'un côté, par une mesure objective à l'aide d'un instrument de mesure impartial à la sensibilité déterminée, et d'un autre côté, par une combinaison de mesures subjectives à partir d'humains aux sensibilités innombrables, nous a permis de proposer des pistes de quantification de la qualité d'un éclairage d'une source lumineuse.

La création du comité technique TC 1-69, au sein de la CIE, en 2006, sur le rendu des couleurs des sources de lumière blanche, a permis de relancer une dynamique de recherche sur cette question dans différents laboratoires dans le monde. L'objectif de ce comité est de définir une nouvelle recommandation pour l'évaluation des propriétés de rendu des couleurs des sources lumineuses. Compte tenu des délais et des moyens humains mis en œuvre, la proposition à ce comité d'une nouvelle méthode de calcul ne me semblait pas réaliste. Par conséquent, j'ai pris le parti de participer à ce comité en ayant un regard critique, mais constructif, sur l'élaboration d'une nouvelle échelle de quantification. Mon choix s'est porté sur l'échelle, nommée Color Quality Scale (CQS), proposée par le NIST en remplacement de la méthode CIE 13.3, actuellement adoptée. Au moment où le choix a été fait de développer une expérience psychophysique, l'échelle du NIST était la seule échelle dont le formalisme mathématique était bien établi et publié. A partir des résultats obtenus, un certain nombre d'améliorations pour le CQS sont apparus. Nous essaierons de mettre en œuvre ces améliorations et les conclusions seront communiqués au comité technique au début de l'année 2010. Conformément aux jalons fixés par ce comité nous avons d'ores et déjà transmis les premiers résultats de nos travaux en septembre 2009.

Une nouvelle échelle, proposée en septembre 2009, au comité technique TC 1-69, par le laboratoire dirigé par Peter Hanselaer de l'université technologique de Saint-Lieven en Belgique, paraît particulièrement intéressante par son coté novateur. Celle-ci est basée, non plus sur un illuminant de référence, mais sur la mémoire des couleurs que les humains ont d'objets colorés que l'on rencontre dans la vie de tous les jours.

Bibliographie

[ASS 06] Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies (ASSIST)
LED Life for General Lighting : Recommendations for the Definition and Specification of Useful Life for Light Emitting Diode Light Sources, 2006
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/ASSIST-LEDLife-revised2007.pdf

[ASTM] American Society for Testing and Materials (ASTM)
E1808-96, Standard guide for designing and conducting visual experiments, 2003

[BAS 99] J. Bastie
Mesures des intensités et des éclairements lumineux au BNM-INM
Actes des Conférences Métrologie 99, p. 304-307, 1999

[BIP] Bureau international des poids et mesures
Calibration and measurement capabilities - Photometry, Luminous intensity, LED
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=US&iservice=PR/Photo.1.1.2

[BIPM] Bureau international des poids et mesures
Histoire de la métrologie, le rôle du BIPM
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.bipm.org/fr/convention/wmd/2004/history.html
http://www.bipm.org/fr/convention/wmd/2004/role_bipm.html

[BOI 07] S. Boissard, M. Fontoynont, P. Avouac
Optimisation of mixing of LED-based light for object presentation
Proceedings of the 26th session of the CIE, 2007

[BOI 09] S. Boissard, M. Fontoynont
Optimisation of LED-based Light Blendings for Object Presentation
Color research and application, vol. 34, n°4, 2009
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www3.interscience.wiley.com/journal/122442025/abstract

[BON 86] C. Bonnet
Manuel pratique de psychophysique
Editions Armand Colin, 1986

[BOU 37] P. J. Bouma
Colour reproduction in the use of different sources of « white » light
Philips Technical Review, vol. 2, p. 1-7, 1937

[BRI 96] Encyclopedia Britannica
Munsell colour system : Munsell colour tree
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.britannica.com

[BSI] British Standards Institution (BSI)
BSI 950-1:1967, Specification for artificial daylight for the assessment of colour, Part 1 : Illuminant for colour matching and colour appraisal, 1967

[CER] Ceram
Ceramic colour standards Series II - Specifications constructeur

[CHA 02] V. Charton
Etude comparative de la perception d'ambiances lumineuses en milieu réel et en milieu virtuel.
Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2002
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://csidoc.insa-lyon.fr/these/2002/charton/1titre.pdf

[CHA 04] C. Chain
Caractérisation spectrale et directionnelle de la lumière naturelle : application à l'éclairage des bâtiments
Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2004
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2004/chain/01_page_de_garde.pdf

[CHE 39] M. E. Chevreul
De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés, Paris 1839

[CIE] Commission internationale de l'éclairage
Statuts
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.cie.co.at/doc/statutesfrench.pdf

[CIE 31] Commission internationale de l'éclairage
Compte rendu de la 8ème session, Cambridge, 1931

[CIE 48] Commission internationale de l'éclairage
Compte rendu de la 11ème session, Paris, 1948

[CIE 63] Commission internationale de l'éclairage
Publication CIE n° 9, 1963

[CIE 65] Commission internationale de l'éclairage
Méthode de mesure et de spécification des qualités de rendu des couleurs des sources de lumières, 1ère édition
CIE 13 - 1965

[CIE 74] Commission internationale de l'éclairage
Méthode de mesure et de spécification des qualités de rendu des couleurs des sources de lumières, 2ème édition
CIE 13.2 - 1974

[CIE 87] Commission internationale de l'éclairage
Vocabulaire international de l'éclairage
CIE 17.4 - 1987

[CIE 94] Commission internationale de l'éclairage
A method of predicting corresponding colours under different chromatic and illuminance applications
CIE 109 - 1994

[CIE 95] Commission internationale de l'éclairage
Méthode de mesure et de spécification des qualités de rendu des couleurs des sources de lumières, 3ème édition
CIE 13.3 - 1995
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/More-reprints/1995%20CIE%20(CIE%2013-3%201995)%20Method%20of%20measuring%20and%20specifying%20colour%20rendering%20properties%20of%20light%20sources-X.pdf

[CIE 99] Commission internationale de l'éclairage
TC 1-33 "Colour rendering" closing remarks
CIE 135 - 1999

[CIE 04a] Commission internationale de l'éclairage
Colorimetry - 3rd edition
CIE 15 - 2004

[CIE 04b] Commission internationale de l'éclairage
Photometry - The CIE system of physical photometry
CIE S 010/E:2004

[CIE 04c] Commission internationale de l'éclairage
A review of chromatic adaptation transform
CIE 160:2004, 2004

[CIE 06] Commission internationale de l'éclairage
Colorimetry - Part 1 : CIE standard colorimetric observers
CIE S 014-1/E:2006

[CIE 07a] Commission internationale de l'éclairage
Measurement of LEDs
CIE 127 - 2007

[CIE 07b] Commission internationale de l'éclairage
Colour rendering of white LED light sources
CIE 177 - 2007

[CIPM] Comité international des poids et mesures
Echelle internationale de température de 1990 (EIT-90)
Procès-verbaux, 78e session, p. T1-T21, 1989
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.bipm.org/fr/publications/its-90.html

[COD 06] P. J. Mohr, B. N. Taylor, D. B. Newell
Codata recommended values of fundamental physical constants : 2006
Reviews of modern physics, vol. 80, p. 663-730, 2008
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://physics.nist.gov/cuu/Constants/codata.pdf

[COU 92] J. M. Desbancs (Coutin)
Etude du rayonnement émis par les diodes lasers en vue de leur utilisation en métrologie des rayonnements
Thèse de doctorat, Cnam, 1992

[CRA 72] M. G. Craford, R. W. Shaw, A. H. Herzog, W. O. Groves
Radiative recombination mechanisms in GaAsP diodes with and without nitrogen doping
Journal of Applied Physics, vol. 43, p. 4075-4083, 1972
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://link.aip.org/link/?JAPIAU/43/4075/1

[DAR 83] H. J. A. Dartnall, J. K. Bowmaker, J. D. Mollon
Human Visual Pigments: Microspectrophotometric Results from the Eyes of Seven Persons
Proceeding of the Royal Society of London, B 220, p. 115-130, 1983
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/220/1218/115.abstract

[DAV 05] W. Davis, Y. Ohno
Toward and improved color rendering metric
Fifth International Conference on Solid State Lighting, vol. 5941, p. 59411G.1-59411G.8, 2005
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/DavisOhnoSPIE2005.pdf

[DAV 06] W. Davis, Y. Ohno
Development of a Color Quality Scale
Sixth International Lighting Research Symposium on Light and Color, 2006
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/DavisOhnoLRO2006.pdf

[DAV 07] W. Davis, Y. Ohno
Measuring color quality of light sources
Eleventh International Symposium on Science and Technology of Light Sources, p. 459-468, 2007

[DAV 09] W. Davis, Y. Ohno
The Color Quality Scale
TC 1-69 report (disponible uniquement pour les membres du comité technique TC 1-69), 2009

[DeCU 97] C. DeCusatis (éditeur) : ouvrage collectif
Handbook of Applied Photometry
Editions Springer-Verlag et "Optical Society of America", 1997 (ISBN : 1-56396-416-3)

[DYB 05] M. Dyble, N. Narendran, A. Bierman, T. Klein
Impact of dimming white LEDs : chromaticity shifts due to different dimming method
Proceedings of fifth international conference on solid state lighting, 2005
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/pdf/dyble-SPIE2005.pdf

[EUR 08] Metrology in short 3rd edition
EURAMET project 1011 : DFM Denmark, NPL United Kingdom, PTB Germany, 2008 (ISBN : 978-87-988154-5-7)
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.euramet.org/index.php?id=mis

[FOR 11] A. S. Forsius
Physica Manuskript, 1611
ACTA Bibliothecae Regiae Stockholmiensis, p. 315-321, 1971

[GAR 99] J. L. Gardner, R. B. Frenkel
Correlation coefficients for tristimulus response value uncertainties
Metrologia, vol. 36, p. 477-480, 1999
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://iopscience.iop.org/0026-1394/36/5/10

[GAR 00a] J. L. Gardner
Uncertainty estimation in colour measurement
Color Research and Application, vol. 25, n°5, p. 349-355, 2000
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www3.interscience.wiley.com/journal/72514666/abstract

[GAR 00b] J. L. Gardner
Correlated colour temperature - Uncertainty and estimation
Metrologia, vol. 37, p. 381-355, 2000
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://iopscience.iop.org/0026-1394/37/5/8

[GAR 06] J. L. Gardner
Bandwidth correction for LEDs chromaticity
Color Research and Application, vol. 31, n° 5, p. 374-380, 2006
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www3.interscience.wiley.com/journal/112750963/abstract

[GED 08] G. Ged
Facteur de linéarité du tube photomultiplicateur R928
Communication privée, 2008

[GED 09] G. Ged, A. Richard, N. Pousset, A. Razet
Application des LED à la détermination de linéarité à faible flux
Congrès international de métrologie, Paris, France, 2009
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://nicolas_pousset.perso.neuf.fr/These/Article/Linearite.pdf

[GLY] Earl F. Glynn
Chromaticity diagrams
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/Chromaticity.htm

[GON 05] L. P. Gonzalez Galvan
Matérialisation de la Candela à l'aide de photomètres dont la chaîne de raccordement au radiomètre cryogénique primaire est parfaitement établie
Thèse de doctorat, Conservatoire national des arts et métiers, 2005

[GU 06] Y. Gu, N. Narendran, T. Dong, H. Wu
Spectral and luminous efficacy change of high power LEDs under different dimming methods Proceedings of Sixth International Conference on Solid State Lighting, 2006
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/pdf/Gu-SPIE6337-17.pdf

[GUI 31] J. Guild
The colorimetric properties of the spectrum
The Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Ser. A, 230, p. 149 - 187, 1931

[GUM 95] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML
Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, 2ème édition, 1995
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf

[GUM 08] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML
Evaluation des données de mesure - Supplément 1 du “Guide pour l’expression de l’incertitude de mesure” - Propagation de distributions par une méthode de Monte Carlo, 2008
Disponible à l’adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf

[GUO 99] X. Guo, J. Graff, E. F. Schubert
Photon Recycling Semiconductor Light Emitting Diode
International Electron Device Meeting, p. 600, 1999
Disponible à l’adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Reprints/1999%20Guo%20et%20al%20(IEDM)%20Photon%20recycling%20semiconductor%20light%20emitting%20diode.pdf

[HAM] Hamamatsu
Photomultiplier tubes R928
Disponible à l’adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_R/R928.pdf

[HIL] J. Hiltunen - Université de Joensuu (Department of Physics, Department of Computer Science), Finlande
Facteurs spectraux de luminance de 1269 échantillons colorés (mat) de l’atlas de Munsell
Disponible à l’adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.cs.joensuu.fi/~spectral/databases/download/munsell_spec_matt.htm

[HOL 62] N. Holonyak Jr., S. F. Bevacqua
Coherent (visible) light emission from Ga($As_{1-x}P_x$) junctions
Applied Physics Letters, vol. 1, n°4, p. 82-83, 1962
Disponible à l’adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/More-reprints/More-reprints.htm

[ISO 94] Organisation internationale de normalisation
Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée
ISO 5725-2, 1994

[JUD 64] D. B. Judd, D. L. MacAdam, G. Wyszecki
Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature
Journal of the Optical Society of America, vol. 54, n°8, p. 1031-1040, 1964
Disponible à l’adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-54-8-1031

[KEL 63] K. L. Kelly
Lines of Constant Correlated Color Temperature Based on MacAdam’s (u,v) Uniform Chromaticity Transformation of the CIE Diagram
Journal of the Optical Society of America, Vol. 53, n° 8, p. 999-1002, 1963
Disponible à l’adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-53-8-999

[LI 01] C. Li, L. Ronnier, B. Rigg, R. W. G. Hunt
CMC 2000 chromatic adaptation transform: CMCCAT2000
Color research and application, vol. 27, n°1, p. 49-58, 2002
Disponible à l’adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www3.interscience.wiley.com/journal/88513283/abstract

[LEC 96] P. Lecollinet, J. Bastie
Mesure de la linéarité des détecteurs utilisés en radiométrie
Bulletin du BNM, vol. 106, p. 37-45, 1996

[LOS 27] O.V. Losev
Brevet soviétique n°12191, 1927

[LUM 04] Philips Lumileds Lighting Company
The emergence of LEDs - Luminance to illumination
Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), Annual Conference, 2004
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.philipslumileds.com/pdfs/TP40_IESNA_July%202004_LED_Paper.pdf

[LYN 06] P. J. Lynch, C. C. Jaffe
Lateral orbit anatomy 2
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Patrick_Lynch

[MAC 74] D. L. MacAdam
Uniform color scales, Journal of the Optical Society of America, vol. 64, n° 12, p. 1691–1702, 1974.
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-64-12-1691

[MAX] Maxim Integrated Products
High-Voltage, 350mA, High-Brightness LED Driver with PWM Dimming and 5V Regulator
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/5179

[McC 92] C. S. McCamy
Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates
Color Research and Application, vol. 17, p. 142-144, 1992
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www3.interscience.wiley.com/journal/114187159/abstract

[McC 93] C. S. McCamy
Errata : Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates
Color Research and Application, vol. 18, p. 150, 1993

[MEEDA] Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire.
Convention sur le retrait de la vente des ampoules à incandescence et la promotion des lampes basse consommation, 2008
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2-_Convention_ampoules_cle7ec3ee.pdf

[MEI] Photo du « Skyscreen » du centre commercial « The Place »
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.meiguoxing.com/Shopping/The_Place.html

[MET 49] N. Métropolis, S. Ulam
The Monte Carlo Method
Journal of the American Statistical Association, vol. 44, n° 247, p. 335-341, 1949
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www-stat.wharton.upenn.edu/~stroud/classics/MetropolisUlam49.pdf

[MON] B. Monteil
Schéma de principe d'une LED classique, de type 5 mm, vue en coupe
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.led-fr.net/caracteristiques_led.htm

[MON 06] E. D. Montag
Empirical formula for creating bars for the method of paired comparisons
Journal of electrical imaging, vol. 15, 2006
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.cis.rit.edu/people/faculty/montag/PDFs/JEI010502.pdf

[MOS 51] F. Mosteller
Remarks on the method of paired comparisons: III. A test of significance for paired comparisons when equal standard deviations and equal correlations are assumed
Psychometrika, vol. 16, n°2, p. 207-218, 1951
Disponible partiellement à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://books.google.fr ("Selected paper of Frederick Mosteller" p. 167-172)

[MRA] Bureau international des poids et mesures
Arrangement de reconnaissance mutuelle
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 ocotbre 2009) :
http://www.bipm.org/fr/cipm-mra/

[MUN 05] A. H. Munsell
A Color Notation, Boston 1905

[MUN 15] A. H. Munsell
The Atlas of the Munsell Color System, Boston 1915

[NAK 93a] S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai
P-GaN/n-InGaN/n-GaN double heterostructure blue light emitting diodes
Japanese Journal of Applied Physics, vol. 32, L8-L11, 1993
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://jjap.ipap.jp/link?JJAP/32/L8/

[NAK 93b] S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai
High power InGaN/GaN double heterostructure violet light emitting diodes
Applied Physics Letters, vol. 62, p. 2390-2392, 1993

[NAK 94] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh
Candela class high brightness InGaN/AlGaN double heterostructure blue light emitting diodes
Applied Physics Letters, vol. 64, p. 1687-1689, 1994
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/More-reprints/More-reprints.htm

[NAR 02a] N. Narendran, L. Deng
Performance characteristics of light-emitting diodes
Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) Annual Conference, p. 157-164, 2002
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.lrc.rpi.edu/resources/pdf/43-2002.pdf

[NAR 02b] N. Narendran, L. Deng
Colour Rendering Properties of LED Light Sources
Solid State Lighting II : Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE), 2002
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/pdf/CRIForLED.pdf

[NAR 04] N. Narendran, L. Deng, R. M. Pysar, Y. Gu, H. Yu
Performance characteristics of high-power light-emitting diodes
Third International Conference on Solid State Lighting, p. 267-275, 2004
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/pdf/LedPerformance.pdf

[NAR 07] N. Narendran, Y. Gu, L. Jayasinghe, J. P. Freyssinier, Y. Zhu
Long-term performance of white LEDs and systems
First International Conference on White LEDs and Solid State Lighting, p. 174-179, 2007
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/pdf/Narendran-WhiteLEDsTokyo2007.pdf

[NCS] Scandinavian Colour Institute - Natural Color System
Adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
www.ncscolour.com

[NEI/NIH] National Eye Institute, National Institutes of Health (NEI/NIH)
Eye diagram
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.nei.nih.gov/

[OBE 07] G. Obein, L. Gonzalez-Galvan, J. Bastie
Nouvelle réalisation de la candela au LNE-INM/Cnam
Revue française de métrologie, n°12, p. 19-28, 2007
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.metrologiefrancaise.fr/publications/revue_francaise_metrologie/2007-04/P19-28-RFM12-Obein-candela-photometres.pdf

[OECD 06] Organisation de coopération et de développement économiques - Agence internationale de l'énergie (OECD/IEA)
"Light's Labour's Lost : Policies for Energy-efficient Lighting", 2006 (ISBN : 92-64-10951-X)
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.iea.org/Textbase/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1695

[OHN 01] Y. Ohno
A numerical method for Color Uncertainty
Proceeding of the CIE Expert Symposium on Uncertainty Evaluation, 2001
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/OhnoCIEuncert2001.pdf

[OHN 04] Y. Ohno
Simulation Analysis of White LED Spectra and Color Rendering
CIE Expert Symposium on LED Light Sources, 2004
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/OhnoCIE2004.pdf

[OHN 05] Y. Ohno
A Flexible Bandpass Correction Method for Spectrometer
Proceedings of the International Colour Association, Part 1, p. 697-700, 2005
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/OhnoAIC2005.pdf

[OST 16] W. Ostwald
Die Farbenfibel, Leipzig 1916

[OST 17] W. Ostwald
Der Farbatlas, Leipzig 1917

[PAL 02] C. Palmer - Newport Corporation
Diffraction gratings handbook, 6th edition, 2005
Voir "9.3. Efficiency characteristics for sinusoidal-groove gratings"
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://gratings.newport.com/library/handbook/cover.asp

[PAN] Pantone
Adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.pantone.com

[PEF 93] S. Pefferkorn, F. Viénot, A. Chiron, H. Brettel
Problem of spectroradiometric calibration of polarized displays
Proceedings of the 13th International Display Research Conference, p. 443-446, 1993

[PHI] Philips Lumileds Lighting Company
All in one plug and play guide
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.philipslumileds.com/pdfs/PG01_KO.PDF

[PROC 07] J. M. Coutin
PROC - RD - 3 : Etalonnage des convertisseurs courant-tension
Document interne au LNE-INM/Cnam, 2007

[PROC 08] G. Obein
PROC - PH - 1 : Etalonnage des lampes en intensité lumineuse V3.0.
Document interne au LNE-INM/Cnam, 2008

[REA 96] J. Reader, C. J. Sansonetti, M. L. Salit
Wavelength of spectral lines in mercury pencil lamps
Applied Optics, vol. 35, n° 1, p. 74-77, 1996
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.uvp.com/pdf/wavelengths.pdf

[RON 07] P. Ronan
Electromagnetic spectrum
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://en.wikipedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg

[ROU 06] B. Rougié, J. Bastie
Réalisation de la référence d'éclairement à l'Institut national de métrologie
Revue française de métrologie, vol. 5, p. 31-40, 2006
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.metrologiefrancaise.fr/publications/revue_francaise_metrologie/2006-01/P31-40-RFM5-reference-eclairement.pdf

[ROU 08] B. Rougié
Etalonnage de la lampe halogène tungstène de référence en éclairement énergétique spectrique relatif
Communication privée, 2008

[ROU 07] H. J. Round
A note on carborundum
Electrical world, vol. 19, p. 309, 1907
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/More-reprints/More-reprints.htm

[RUN 10] P. O. Runge
Die Farbenkugel, Hamburg 1810

[SCH 01] J. Schanda, G. Schanda, K. Muray
Light emitting diode standards
2nd CIE Expert Symposium on LED Measurements, 2001
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.knt.vein.hu/staff/schandaj/SJCV-Publ-2005/438.doc

[SCH 03] J. Schanda, N. Sandor
Colour rendering, Past - Present - Future
Proceedings of the International Lighting and Colour Conference, p. 76-85, 2003
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.knt.vein.hu/staff/schandaj/SJCV-Publ-2005/493.pdf

[SCH 04] J. Schanda
Physical and visual requirements for LEDs to be used for future lighting system
Proceeding of CIE Symposium on LED Light Sources : Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment, 2004
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.knt.vein.hu/staff/schandaj/SJCV-Publ-2005/496.pdf

[SCH 07] J. Schanda (éditeur) : Ouvrage collectif
Colorimetry, understanding the CIE system
Editions Wiley, 2007 (ISBN : 978-0-470-04904-4)

[SCHU 07] F. Schubert
Light Emitting Diodes, Second Edition
Cambridge University Press, 2007 (ISBN : 978-0-521-86538-8)

[SEV 96] Physique de la couleur : de l'apparence colorée à la technique colorimétrique
Collection physique fondamentale et appliquée
Editions Masson, 1996 (ISBN : 2-225-85119-0)

[SI] Bureau international des poids et mesures
Système international d'unités
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/general.html

[SIM] R. Simmon, C. Mayhew, NASA GSFC
Earth at night
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://apod.nasa.gov/apod/ap001127.html
Plus récent : http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=36008

[SIM 63] J. L. Simonds
Application of Characteristic Vector Analysis to Photographic and Optical Response Data
Journal of the Optical Society of America, vol. 53, n° 8, p. 968-974, 1963
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-53-8-968

[SPE 59] N. I. Speranskaya
Determination of spectral color co-ordinates for twenty-seven normal observers
Optics and spectroscopy, vol. 7, p. 424 - 428, 1959

[STE 88] E. I. Stearns, R. E. Stearns
An Example of a Method for Correcting Radiance Data for Bandpass Error
Color Research and Application, vol. 13, n°4, p. 257-259, 1988
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www3.interscience.wiley.com/journal/114183462/abstract

[STE 07] R. V. Steele - Strategies unlimited
The worldwide market for High-Brightness visible and white LEDs : Review and outlook
Proceeding of the First International Conference on White LEDs and Solid State Lighting, 2007

[STI 59] W. S. Stiles, J. M. Burch
NPL colour matching investigation: Final report
Optica acta, vol. 6, n° 1, p. 1-26, 1959

[TAR 01] T. Tarczali, P. Bodrogi, J. Schanda
Colour rendering properties of LED sources
CIE Expert Symposium on LED measurement standard methods for specifying and measuring LED and LED cluster Characteristics, 2001
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.knt.vein.hu/staff/schandaj/SJCV-Publ-2005/442.doc

[THU 27a] L. L. Thurstone
Psychophysical analysis
American journal of psychology, 38, p. 368-389, 1927
Disponible partiellement à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.brocku.ca/MeadProject/Thurstone/Thurstone_1927g.html

[THU 27b] L. L. Thurstone
A law of comparative judgment
Psychological Review, 34, p. 273-286, 1927
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://wand.stanford.edu/courses/polisci350c/classonly/thurstone1927.pdf

[TOR 58] W. S. Torgerson
Theory and Methods of Scaling
New York, Wiley & Sons, 1958

[TOU 99] O. Touayar, J. M. Coutin, J. Bastie
Le radiomètre cryogénique : référence primaire du BNM-INM pour les mesures de rayonnements optiques
Bulletin du Bureau national de métrologie, n°117, vol. 1999-3, p. 36-44, 1999

[UNPP] United Nations Population Division - Department of Economic and Social Affairs
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://esa.un.org/unpp/

[USCB] United States Census Bureau
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.census.gov/ipc/www/worldhis.html

[UNFCCC] United Nations Framework Convention on Climate Change
Kyoto Protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount, p. 13, 2008
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/3145.php

[VIE 01] F. Viénot
Retinal distribution of the macular pigment and the cone effective optical density from colour matches of real observers
Color research and application, vol. 26, p. S264- S268, 2001
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www3.interscience.wiley.com/journal/76505303/abstract

[WAI 07] P. Waide - Agence internationale de l'énergie
Light's Labour's Lost : Policies for Energy-efficient Lighting, 2007
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.iea.org/Textbase/work/2007/cfl/Waide.pdf

[WRI 28] W. D. Wright
A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours
Transactions of the Optical Society of London, vol. 30, n°4, p. 141-164, 1928
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.iop.org/EJ/abstract/1475-4878/30/4/301

[WRI 29] W. D. Wright
A re-determination of the mixture curves of the spectrum
Transactions of the Optical Society of London, vol. 31, n°4, p. 201-218, 1929
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.iop.org/EJ/abstract/1475-4878/31/4/303

[ZIS 04] G. Zissis
Diodes électroluminescentes pour l'éclairage
Techniques de l'ingénieur, 2004

[ZIS 07] G. Zissis
Technologies des diodes électroluminescentes : les challenges pour l'avenir
Colloques sur les nouvelles technologies de l'éclairage, 2007
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 4 octobre 2009) :
http://www.led-fr.net/pdf/seminaire_ecrin-eclairage_2007.pdf

[ZUP 09] L. Zuppiroli, M. N. Bussac, C. Grimm
Traité de la lumière
Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009 (ISBN : 978-2-88074-801-2)

Annexe A

La métrologie en quelques mots

1 Histoire et définitions

L'unification des poids et mesures est un enjeu économique et social depuis longtemps, mais ce n'est que depuis le XVIII^{ème} siècle que nous bénéficions d'un système unifié de mesure. Les tous premiers systèmes de poids et mesures étaient fondés sur la morphologie humaine. Les noms d'unités faisaient référence aux parties du corps, et plus particulièrement, à ses dimensions : la brasse, la coudée, le pouce, la main, le pied,… Par conséquent, ces unités de mesures étaient très variables, d'une ville à l'autre, d'un métier à l'autre, et selon le type d'objet à mesurer [BIPM].

Avec le développement de l'industrie et des échanges commerciaux, le besoin d'harmonisation des poids et mesures était indispensable pour mettre fin aux litiges et aux fraudes. La figure A.1 représente un extrait des cahiers de doléances du tiers état de Vendôme (Loir-et-Cher) où la population demande une uniformisation des poids et mesures, en 1789.

Assemblée électorale le jeudi 5 Mars 1789, en la grande salle de l'Hôtel de Ville.

- Population : 1207 feux.

- Participants : les députés des compagnies, corps autorisés et communauté d'arts et métiers de la ville…

- Aubergistes : Daflon.
- Avocats : Ballyer, Bourreau.
- Boulangers : Londiveau.
- Chapeliers : Drouin.
- Couteliers et arquebusiers : Pasquier l'aîné.
- Habitants libres : Boutrais (bourgeois), Dehargne (bourgeois) etc... "

Le Tiers État de Vendôme demande :

50 - Qu'il soit réfléchi aux moyens de réduire [...] les coutumes, poids et mesures, en une seule coutume, un seul poids et une seule mesure.

Fig. A.1. - Extrait des cahiers de doléances du tiers état de Vendôme (Loir-et-cher).

Quelques années après cette demande des Vendômois, qui est représentatif des attentes d'une catégorie de Français de cette époque, il a été convenu d'adopter des unités se référant à des étalons matérialisés.

Une des premières unités à avoir été défini est le mètre, explicité dans le décret de l'Assemblée nationale française du 7 avril 1795 introduisant le système métrique décimal, comme la longueur égale à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre, évaluée à partir de la mesure de l'arc de méridien entre Dunkerque et Barcelone. Dans la même idée, le kilogramme a été défini à l'origine comme étant la masse d'un volume donné d'eau (1 dm^3).

Les premiers étalons prototypes du mètre et du kilogramme ont été déposés en 1799 aux Archives de la République de France, et dédiés « *À tous les temps, à tous les peuples* ». La diffusion de ces unités se faisait ensuite par la création de copies des étalons. Un exemple est toujours visible sur la façade du ministère de la justice, place Vendôme (place qui tire son nom de l'ancien emplacement de l'hôtel particulier des ducs de Vendôme), à Paris (fig. A.2).

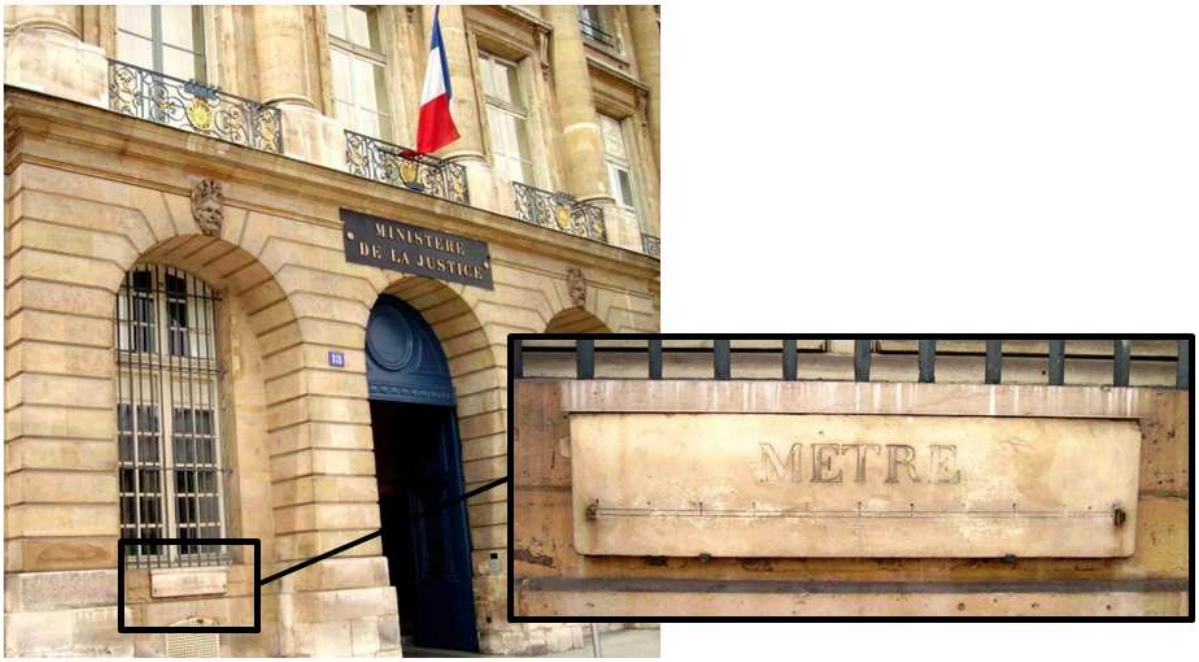


Fig. A.2. - Mètre étalon sur la façade du ministère de la justice, place Vendôme à Paris.

Le système métrique décimal développé en France s'est rapidement diffusé hors de nos frontières. Cependant, la dépendance des pays envers les étalons de mesure, et le manque d'uniformité dans la réalisation des copies limitèrent la normalisation internationale souhaitée. Pour résoudre ces difficultés, le Bureau international des poids et mesures (BIPM) fut fondé par la signature d'un traité diplomatique connu sous le nom de « Convention du Mètre », le 20 mai 1875.

Le BIPM a eu pour mission, dès 1875, d'établir et de diffuser le système métrique dans le monde par la conservation des prototypes internationaux du mètre et du kilogramme, par la fabrication de copies de ces prototypes, par la conservation des nouveaux prototypes, par la comparaison des différents systèmes d'étalons nationaux de mesure aux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme, et par le perfectionnement des méthodes de mesure, afin de promouvoir la métrologie et donc d'assurer l'unification mondiale des mesures [BIPM].

Le système métrique a été diffusé dans le monde pendant plusieurs décennies. Ce système a évolué en 1960, avec la 11ème Conférence générale des poids et mesures, qui adopta le Système international d'unités, le SI.

Les définitions des unités de base du SI ont été révisées au cours des années pour répondre à l'évolution des besoins et à l'accroissement de l'exactitude requise pour les mesures industrielles et commerciales.

Ainsi, la mise en pratique de la définition du mètre, comme unité de longueur, fondée sur une partie du quart du méridien terrestre était difficile à mettre en œuvre. Le mètre a été défini par un artefact jusqu'en 1960, date à laquelle sa définition a été modifiée pour être fondée sur la mesure de la longueur d'onde de la radiation orangée émise par des atomes excités d'un isotope de krypton.

Cette définition a ensuite été remplacée en 1983 par la définition actuelle, fondée sur la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide [SI] :

> *Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.*

De la même façon, toutes les unités de base du Système international d'unités ont été définies. Ce système compte sept grandeurs de base : la longueur (le mètre : m), la masse (le kilogramme : kg), le temps (la seconde : s), le courant électrique (l'ampère : A), la température thermodynamique (le kelvin : K), la quantité de matière (la mole : mol) et l'intensité lumineuse (la candela : cd). Par convention ces sept grandeurs sont considérées comme étant indépendantes mais en réalités elles ne le sont pas. Ainsi la définition du mètre fait appel à la seconde, la définition de l'ampère fait appel au mètre, au kilogramme et à la seconde, la définition de la mole fait appel au kilogramme, et la définition de la candela fait appel au mètre, au kilogramme et à la seconde [SI].

Les définitions des unités de base sont les suivantes [SI] :

- *La seconde*

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

- *L'ampère*

L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2.10^{-7} newton par mètre de longueur.

- *Le kilogramme*

Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

- *Le kelvin*

le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

- *La mole*

1. *La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ; son symbole est mol.*
2. *Lorsque l'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.*

- *La candela*

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

Les domaines d'application de la métrologie ne sont limités que par l'esprit humain, et au fur et à mesure que de nouveaux domaines d'étude deviennent accessibles à la connaissance, il faut établir de nouveaux instruments de mesure et parfois même définir de nouvelles unités de mesure.

2 Organisation de la convention du mètre

Au niveau international, le BIPM a été créé, comme nous l'avons vu, par la Convention du mètre en 1875. A cette date, dix sept états ont signé ce traité diplomatique afin d'assurer l'uniformité et la traçabilité des mesures. A ce jour, cinquante et une nations ont ratifié ce traité.

La convention du mètre confère au BIPM sous la surveillance du Comité international des poids et mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), le pouvoir d'agir dans le domaine de la métrologie mondiale en développant les étalons de mesures et en apportant la preuve de l'équivalence entre les étalons des différents pays par la mise en place d'intercomparaisons. Le CIPM s'appui sur dix comités consultatifs et travail en collaboration avec des organismes de normalisation ou faisant référence dans des domaines spécifiques telle que la Commission internationale de l'éclairage.

La figure A.3 offre une vision globale de l'organisation de la métrologie scientifique, au niveau mondial, qui découle de la Convention du Mètre.

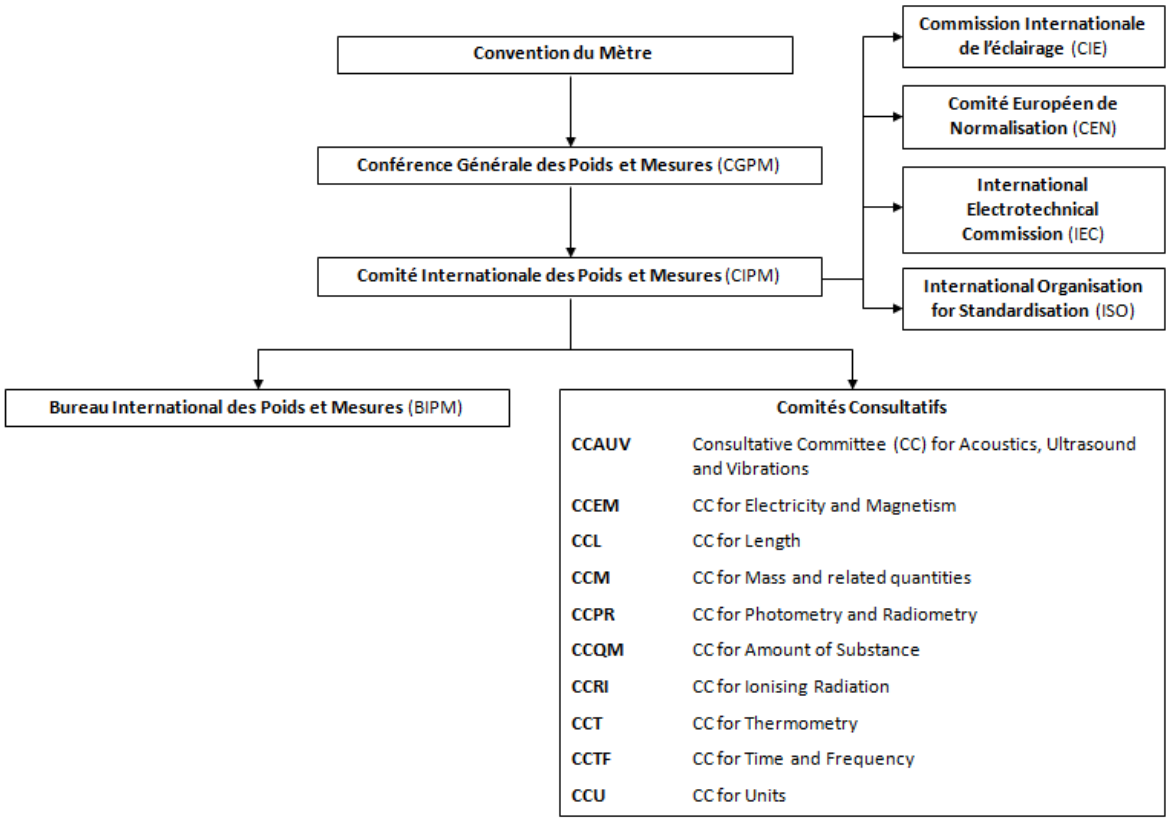


Fig. A.3. - Organisation de la métrologie scientifique [EUR 08].

3 La métrologie : science de la mesure

La science de la mesure et ses applications n'intéressent pas uniquement les milieux scientifiques. Elle est indispensable à tous les domaines de la vie dont nous dépendons (commerce, industrie, télécommunication, médical, militaire,…).

Toutes les mesures affectent notre environnement quotidien. Des mesures erronées ou inexactes peuvent entraîner de mauvaises décisions, et peuvent avoir de sérieuses conséquences sur le plan humain, environnemental, financier,... Il est donc important de mettre en œuvre des mesures fiables, agréées et approuvées, par les autorités compétentes. C'est pourquoi les métrologues mettent en œuvre de nouvelles techniques de mesure, conçoivent de nouveaux instruments et procédures, afin de satisfaire la demande, sans cesse croissante, d'améliorer l'exactitude, la fiabilité et la rapidité des mesures.

Afin que ceux qui ne sont pas directement impliqués dans le domaine scientifique aient confiance dans la fiabilité et l'exactitude des mesures faites par les métrologues, il est fondamental que les instruments utilisés dans le cadre des systèmes de mesure, au niveau local ou national, soient étalonnés, et que les étalonnages puissent être traçables à un système d'étalons ou de matériaux de référence accepté au niveau international. La figure A.4 présente la chaîne de raccordement des étalons.

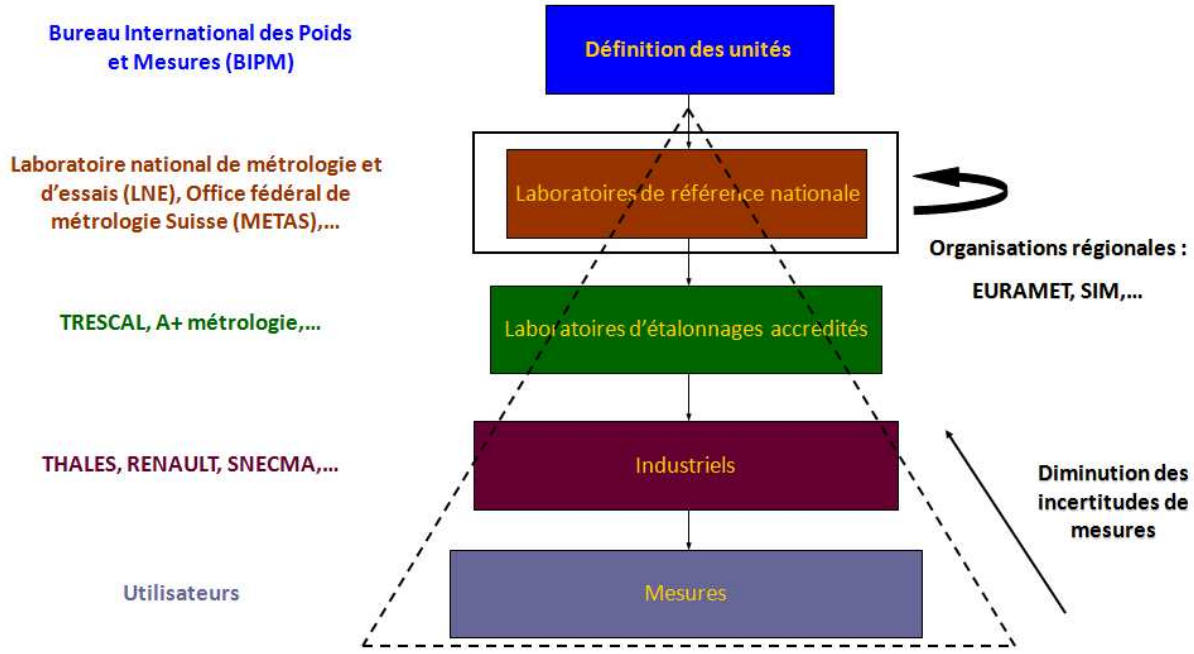


Fig. A.4. - Chaîne de raccordement des étalons [EUR 08].

A partir des définitions des unités de base du SI fixées par le BIPM, les laboratoires nationaux de métrologie ont a charge d'assurer leur réalisation, leur conservation, leur amélioration et leur transfère dans leur pays. Ces laboratoires sont regroupés au sein d'organisations découpées selon les régions du monde (EURAMET pour l'Europe, SIM pour l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud, AFRIMETS pour l'Afrique,…). Ces organisations ont a charge de coordonner la coopération des différents laboratoires nationaux de métrologie au travers de la mise en place de projets de recherche communs, d'intercomparaisons,…

Dans chaque pays, les laboratoires nationaux de métrologie (LNE, METAS, PTB, NPL,…) assurent le transfère des unités de base du SI vers des laboratoires de métrologie accrédités (TRESCAL, A+ Métrologie,…). Les laboratoires accrédités fournissent ensuite des prestations d'étalonnage à des clients industriels. Pour les laboratoires nationaux de métrologie, comme le LNE, les prestations d'étalonnage sont, en terme quantitatifs, de l'ordre de quelques milliers par an. Pour les laboratoires accrédités comme TRESCAL, les prestations sont plutôt de l'ordre de la centaine de milliers.

La métrologie est une science ancienne, qui a évolué au cours des siècles, et qui est aujourd'hui divisée entre la métrologie scientifique et la métrologie légale. Alors que la métrologie scientifique concerne essentiellement les mesures pour l'industrie, la métrologie légale concerne les mesures qui touchent directement les consommateurs.

Grâce à ce système de raccordement, les balances des supermarchés peuvent être étalonnées par rapport aux étalons nationaux de masse, lesquels sont étalonnés par comparaison au prototype international du kilogramme (l'étalon international de masse). Il est donc possible d'établir une chaîne d'étalonnage, qui assure la traçabilité des mesures des balances des supermarchés à une série d'étalons de mesure reconnus au niveau international. De la même façon, les pompes à essences sont étalonnées pour garantir que la quantité de carburant affichée à la pompe et bien celle que le client a dans le réservoir de son véhicule. Par l'intermédiaire de ces étalonnages, le consommateur peut donc avoir confiance dans le système des poids et mesures de son pays. Sa confiance est renforcée par la reconnaissance de l'équivalence, entre les poids et mesures de son pays, et ceux des autres pays, par la mise en place de l' « arrangement de reconnaissance mutuel » (CIPM MRA), depuis 1999 [MRA].

Annexe B

La Commission internationale de l'éclairage (CIE)

La Commission internationale de l'éclairage (CIE) a été fondée par la Commission internationale de photométrie (CIP) sous l'impulsion de son président, Théodore Vautier (1852-1931) (fig. B.1), lors de la 4ème session de la CIP qui eut lieu à Berlin du 27 au 30 août 1913.

L'idée de la création de la CIP a émergé en 1900 lors de l'exposition universelle de Paris. Elle ne s'est concrétisée officiellement quand 1903 où T. Vautier fût élu président de cette commission.



Fig. B.1. - Photo de T. Vautier [CIE 63].

En 1913, l'objet de la CIE fut défini dans la publication de ses premiers statuts comme suit [CIE 63] :

« La Commission a pour objet d'étudier toutes les questions ayant trait à l'industrie de l'éclairage et aux sciences qui s'y rapportent, et d'établir, par tous les moyens appropriés, des ententes internationales sur les questions d'éclairage. »

L'article 3 des statuts, stipulait que *« tous pays désirant prendre part aux travaux de la Commission pourra le faire en formant un comité national par la coopération des sociétés techniques représentant les industries du gaz et de l'électricité et les autres modes d'éclairage, ainsi que du Laboratoire du pays, s'il en existe un »*.

Depuis lors, et pour l'essentiel, la CIE est restée fidèle à ses premiers statuts. A l'origine elle était composé de neuf états membres (France, Allemagne, Grande-Bretagne, Autriche-Hongrie, Belgique,

Italie, Pays-Bas, Suisse et Etats-Unis d'Amérique). Aujourd'hui elle regroupe trente huit comités nationaux représentant les pays membres.

Les comités nationaux gèrent les intérêts de la Commission, de ses biens et de ses finances.

En France, la CIE est représentée par le CIE France (anciennement Comité national français de l'éclairage (CIE-CNFE/AFE)), domicilié au 17 rue de l'Amiral Hamelin, 75783 Paris Cedex 16.

La CIE est dirigée par une assemblée générale qui comprend les présidents des comités nationaux ou leurs représentants. Elle élit un bureau qui comprend un président, plusieurs vice-présidents, un secrétaire et un trésorier.

Aux vues des nombreuses missions de la CIE définies dans ses statuts [CIE], ses activités techniques ont été réparties dans sept divisions explicitées ci-dessous, et ayant chacune, une vingtaine de comités techniques (groupes d'experts ayant à charge de travailler sur des problématiques spécifiques à leur divisions). Les divisions couvrent chacune des domaines bien précis que ce soit des questions fondamentales ou des applications de l'éclairage. Tous les quatre ans, une session plénière passe en revue le travail des divisions et des comités techniques, en fait un rapport, et établit des projets pour l'avenir.

Division 1 : Vision et couleur

Etudier les réactions visuelles à la lumière et établir des fonctions de réponse normalisée, des modèles et des procédures de spécifications relatifs à la photométrie, à la colorimétrie, au rendu des couleurs, aux performances visuelles et à l'appréciation visuelle de la lumière et de l'éclairage.

Division 2 : Mesures physiques du rayonnement

Etudier des procédures normalisées pour l'évaluation : des radiations UV, visibles et IR, du rayonnement global, des propriétés optiques des matériaux et des luminaires, ainsi que des propriétés optiques et des performances des détecteurs physiques et d'autres dispositifs utilisés pour leur évaluation.

Division 3 : Environnement intérieur et conception de l'éclairage

Etudier et évaluer les paramètres visuels qui interviennent dans la satisfaction des occupants d'un bâtiment au sujet de leur environnement, l'interaction de ces paramètres avec les facteurs thermiques et acoustiques ; donner des directives sur les techniques appropriées, y compris les calculs correspondants pour l'éclairage intérieur des bâtiments ; faire la synthèse de ces données avec celles d'autres comités de la CIE, sous forme de guides : pour l'éclairage intérieur en général, pour des cas particuliers d'éclairage intérieur, ainsi que pour des problèmes rencontrés dans la pratique de l'éclairage intérieur.

Division 4 : Eclairage et signalisation pour les transports

Etudier l'éclairage et la signalisation visuelle et les informations nécessaires aux transports et au trafic ; éclairage des routes et des véhicules, marquages routiers, indications et signalisations pour toutes les classes de routes publiques pour tous les usagers et véhicules, aides visuelles pour les autres modes de transport que la route.

Division 5 : Eclairage extérieur et autres applications

Etudier des procédures et préparer des guides pour la conception de l'éclairage des aires de travail, de l'éclairage de sécurité, des illuminations et de l'éclairage de valorisation de l'environnement, de l'éclairage des zones piétonnes ou autres sans trafic motorisé, de l'éclairage des aires de sport et de loisirs, de l'éclairage des mines, ainsi que pour le contrôle de la lumière gênante et du halo lumineux.

Division 6 : Photobiologie et photochimie

Etudier et évaluer les effets des rayonnements optiques sur les systèmes biologiques (à l'exclusion de la vision) et chimiques (rayonnement UV).

Division 7 : Aspects général de la lumière

Cette division a cessé toute activité lors de la 24ème session de la CIE en juin 1999.

Division 8 : Technologie des images

Etudier les méthodes et préparer des recommandations et des normes, relatives aux aspects optiques, visuels et métrologiques de la communication, du traitement, et de la reproduction des images, applicables à tous les types de dispositifs d'acquisition, de conservation et de restitution, aussi bien analogiques que numériques.

De par son travail sur les différentes thématiques citées précédemment, et de par sa capacité à stimuler des recherches, à créer des groupes de travail internationaux, à diffuser l'information par ses publications et ses sessions, la CIE est reconnue comme la plus haute autorité en ce qui concerne tous les aspects de la lumière et de l'éclairage.

Annexe C

Programme de simulation Monte Carlo sous Matlab

CONSULTER L'AUTEUR :

Nicolas POUSSET

email : nicolas_pousset@neuf.fr
site web : nicolas_pousset.perso.neuf.fr

Annexe D

Schéma électronique du boitier de commande des éclairages à LED

Le boitier de commande des éclairages à LED développé pour l'expérience psychophysique est constitué essentiellement d'un microcontrôleur (composant logique programmable), modèle PIC18F258, fabriqué par Microchip.

Un programme développé en C, a été chargé, après compilation, dans le composant. L'architecture du programme développé est de type machine d'états (fig. D.1) et permet : la sélection des éclairages à LED, l'activation des éclairages par l'actionnement de relais, la commutation des éclairages par l'observateur, la validation du choix de l'observateur,… Ce type d'architecture offre de nombreux avantages parmi lesquels nous pouvons citer : la facilité de programmation (un programme autonome pour chaque état), une mise à jour du programme et une gestion des erreurs facilitée par une architecture modulaire.

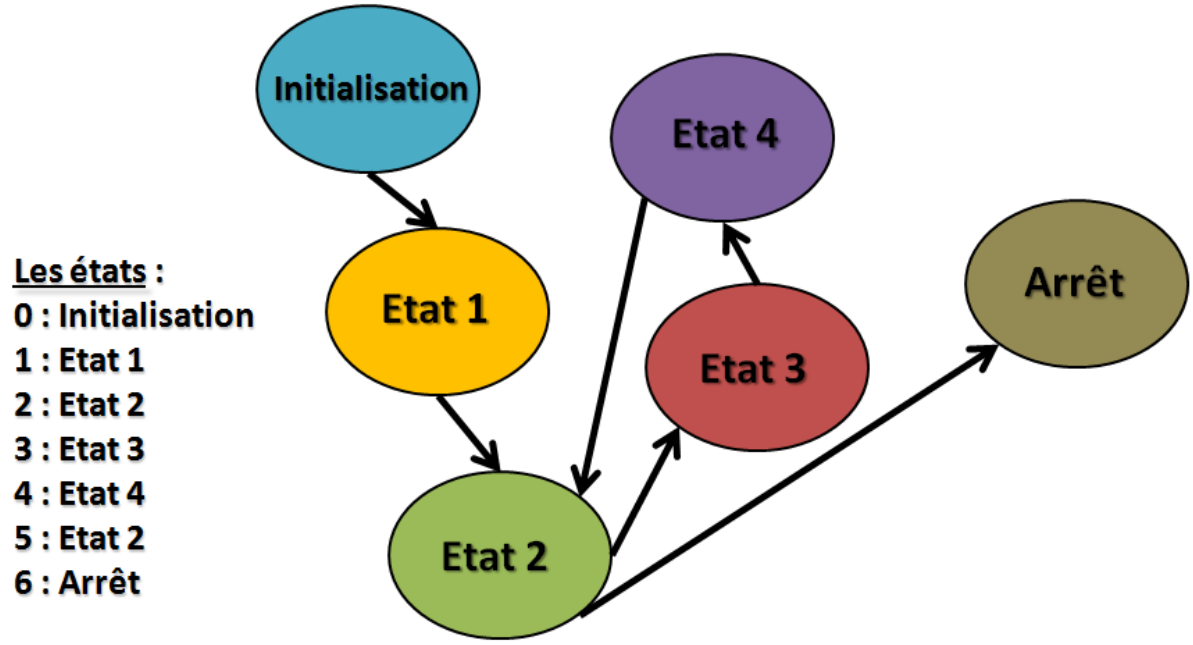
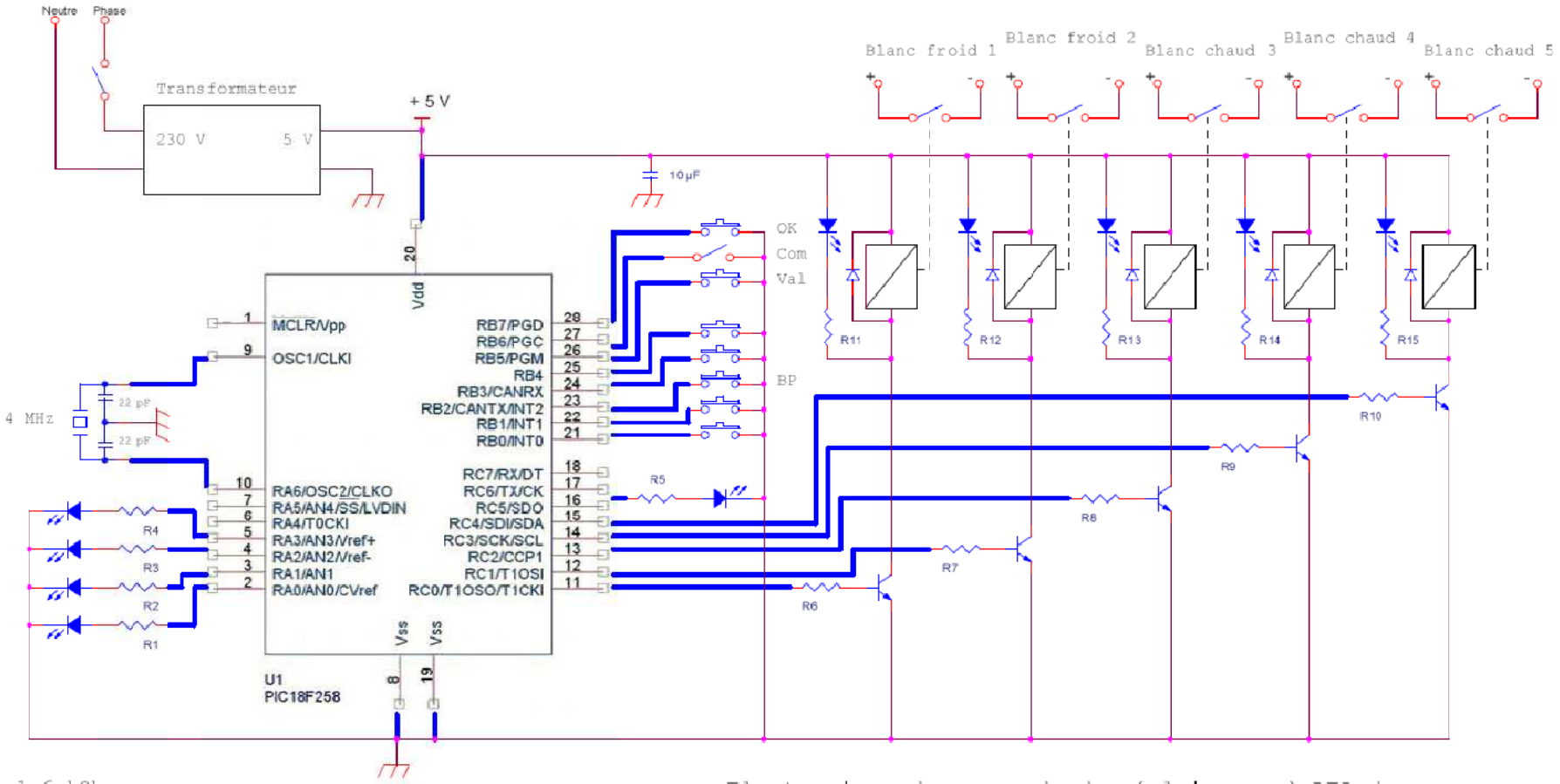


Fig. D.1. - Représentation schématique d'une structure de type Machine d'états.

Toutes les tâches sont cadencées à une fréquence d'horloge de 4 MHz grâce à l'implémentation dans le montage électronique d'un quartz.

L'ensemble du dispositif (microcontrôleur et relais) est alimenté en 5V par l'intermédiaire d'un transformateur.



R1 à R5 = 1,6 kOhms
R6 à R10 = 470 Ohms
R11 à R15 = 1,6 kOhms

Opérateur
BP : Bouton poussoir de choix des éclairages
Val : Bouton de validation des éclairages sélectionnés

Observateur
Com : Bouton de commutation entre les deux éclairages proposés
OK : Bouton de validation de l'éclairage retenu

Electronique de commande des éclairages à LED de la cabine à lumière du LNE-INM/Cnam.

Conception, réalisation et schéma : Stéphane AUBERT, Nicolas SANTIAGO et Nicolas POUSSET

Annexe E

Publications et communications de l'auteur

Publications

Revue internationale à comité de lecture

- *Uncertainty evaluation for measurement of LED colour by Monte Carlo simulations*
N. Pousset, B. Rougié, A. Razet
Metrologia, vol. 46, n° 6, p. 704-718, 2009
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 25 novembre 2009) :
http://stacks.iop.org/0026-1394/46/704

Metrologia est la revue internationale avec comité de lecture, de référence pour les métrologues. Son facteur d'impact en 2008 est de 1,780.

Revue nationale à comité de lecture

- *Colorimétrie des LED : incertitudes et paramètres d'influence*
N. Pousset, B. Rougié, A. Razet
Revue française de métrologie, **accepté**, 2009 (ISSN : 1772-1792)

- *Etalonnage de micromètres objet par microscopie optique*
N. Pousset, J. Salgado, G.-P. Vailleau
Revue française de métrologie, n°18, vol. 2009-2, 2009 (ISSN : 1772-1792)
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 11 septembre 2009) :
http://www.metrologiefrancaise.fr/fr/publications/revue-fr-metrologie.asp

Ouvrage faisant suite aux actes d'un congrès international

- *Metrology of appearance*
A. Razet, N. Pousset, G. Obein, J. Bastie, F. Viénot
Transverse Disciplines in Metrology - Proceedings of the 13th International Metrology Congress, 2007
Lille, France, ISTE, 2008 (ISBN : 9781848210486)
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 11 septembre 2009) :
http://www.iste.co.uk/index.php?f=a&ACTION=View&id=223

Communications

Orale

- *Métrologie de l'apparence*
A. Razet (conférencier), N. Pousset, G. Obein, J. Bastie, F. Viénot
Actes des conférences Métrologie 07, éditions poisson-soluble (ISBN : 2-915416-06-0)
13ème Congrès International de Métrologie, 18-21 juin 2007, Lille, France
Disponible à l'adresse internet :
http://nicolas_pousset.perso.neuf.fr/Recherche/Article/Apparence.pdf

Poster

- *Visual experiment on LED lighting quality with "Color quality scale" colored samples*
N. Pousset, G. Obein, A. Razet
CIE 2010 : « Lighting quality and energy efficiency », 14-17 mars 2010, Vienne, Autriche, **accepté**

- *LED de puissance blanches : sources de lumières de demain*
N. Pousset, B. Rougié, S. Aubert, A. Razet
Actes des conférences Métrologie 09, éditions poisson-soluble (ISBN : 2-915416-08-7)
14ème Congrès International de Métrologie, 22-25 juin 2009, Paris, France
Disponible à l'adresse internet :
http://nicolas_pousset.perso.neuf.fr/Recherche/Article/LED2.pdf

- *Application des LED à la détermination de linéarité à faible flux*
G. Ged (conférencier), A. Richard, N. Pousset, A. Razet
Actes des conférences Métrologie 09, éditions poisson-soluble (ISBN : 2-915416-08-7)
14ème Congrès International de Métrologie, 22-25 juin 2009, Paris, France
Disponible à l'adresse internet :
http://nicolas_pousset.perso.neuf.fr/Recherche/Article/Linearite.pdf

- *Etalonnage de micromètres objet par microscopie optique en utilisant labVIEW et IMAQ Vision*
N. Pousset
NIDays 2009, 3-4 février 2009, Port-Marly, France
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 11 Septembre 2009) :
http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11807

- *Métrologie des diodes électroluminescentes*
N. Pousset, A. Razet, G. Obein, A. Richard, J. Bastie
Actes des conférences Métrologie 07, éditions poisson-soluble (ISBN : 2-915416-06-0)
13ème Congrès International de Métrologie, 18-21 juin 2007, Lille, France
Disponible à l'adresse internet :
http://nicolas_pousset.perso.neuf.fr/Recherche/Article/LED.pdf

En ligne

- *Cnam Launched Research Project on Characterization of Colour Rendering of LED Light Sources*
LED Professional Review, janvier 2008
Disponible à l'adresse internet (lien vérifié le 11 septembre 2009) :
http://www.led-professional.com/research/33/886-cnam-lounched-research-project-on-characterization-of-colour-rendering-of-led-light-sources.html

Rapports

- *Rapport de recherche pour le comité technique TC 1-69 de la Commission internationale de l'éclairage (CIE)*
N. Pousset, G. Obein, A. Razet, 19 pages, septembre 2009

Documents d'enseignement universitaire

- *Cours d'initiation au logiciel labVIEW*
N. Pousset
Support de cours de plus de 300 diapositives, Cnam (Paris), Université Paris VII Jussieu (Paris), 2006-2010
Disponible en ligne :
Développez.com : *http://labview.developpez.com/tutoriel/initiation/index.php*
Cnam : *http://www.cnam.fr/instrumesure/html/sup_instru.htm*
Site personnel : *http://nicolas_pousset.perso.neuf.fr/Enseignement.htm*

Résumé

Le développement des LED de forte puissance, au début des années 2000, a engendré un besoin de caractérisation des propriétés radiométrique, photométrique et colorimétrique de ces sources, essentiellement pour des applications d'éclairage général. L'équipe « Rayonnements optiques » de l'Institut national de métrologie a étudié ces trois aspects en travaillant sur la thématique de la qualité de la lumière par le biais du rendu des couleurs lié à la perception visuelle. Des études ont été effectuées à partir de mesures physiques et visuelles sur des échantillons colorés éclairés par des LED montées dans une cabine à lumière. Les mesures physiques ont porté sur les répartitions spectrales des éclairages à LED à partir desquelles des paramètres colorimétriques (coordonnées chromatiques, température de couleur proximale, indices de rendu des couleurs) ont pu être évalués. L'analyse métrologique de ces données expérimentales a été réalisée à l'aide d'une méthode numérique de type Monte Carlo. Les mesures visuelles ont été obtenues à partir d'une expérience psychophysique reposant sur une méthode de comparaison par paires permettant de quantifier la qualité des éclairages à LED sur plusieurs échantillons colorés. Pour chaque échantillon, un classement des éclairages à LED, du meilleur au moins bon, a pu être proposé.
La confrontation des résultats issus des mesures physiques et des mesures visuelles a conduit à présenter des pistes de quantification du rendu des couleurs des LED. Les résultats obtenus ont été transmis au comité technique TC 1-69 de la Commission internationale de l'éclairage (CIE), qui a pour rôle de définir une nouvelle recommandation pour l'évaluation des propriétés de rendu des couleurs des sources lumineuses d'ici à la fin 2010.

Mots-clés : Métrologie, instrumentation, mesures physiques, incertitudes, Monte Carlo, rayonnements optiques, colorimétrie, photométrie, radiométrie, spectroradiométrie, mesures visuelles, psychophysique, diodes électroluminescentes (LED), coordonnées chromatiques, température de couleur, indice de rendu des couleurs.

Abstract

The development of high power LEDs in the early 2000s have generated a need for characterization of radiometric, photometric and colorimetric properties of light sources, essentially oriented towards general lighting applications. The optical radiation team from the « Institut national de métrologie » leaned over these three aspects while working on the quality of light through colour rendering related to visual perception. Studies were conducted from physical and visual measurements on samples illuminated by LED lightings mounted in a light booth. Physical measurements focused on spectral distribution from which colorimetric parameters (chromaticity coordinates, correlated colour temperature, colour rendering indexes) have been evaluated. The metrological analysis of the experimental data was performed using a numerical method of Monte Carlo. Visual measurements were obtained from a psychophysical experiment based on a pair comparisons method. It allowed to quantify LED lightings quality over colored samples. For each sample, a classification of the LED lightings, from best to worst, could be proposed.
Confrontation between results issued from physical and visual measurements led to propose some ideas to quantify the colour rendering of LED lightings. Obtained results were submitted to the technical committee TC 1-69 of the international commission on illumination (CIE), whose task is to define a new recommendation for the evaluation of the colour rendering properties of light sources within the year 2010.

Key words: Metrology, instrumentation, physical measurements, uncertainties, optical radiations, colorimetry, photometry, radiometry, spectroradiometry, visual measurements, psychophysic, light-emitting diodes (LED), chromaticity coordinates, correlated colour temperature, colour rendering index, Monte-Carlo.