



HAL
open science

Optimisation des systèmes d'éclairage des bâtiments de l'Université Paul Sabatier basé sur un réseau novateur de type bus continu/basse tension

Angel Barroso

► **To cite this version:**

Angel Barroso. Optimisation des systèmes d'éclairage des bâtiments de l'Université Paul Sabatier basé sur un réseau novateur de type bus continu/basse tension. Energie électrique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30345 . tel-02004352

HAL Id: tel-02004352

<https://theses.hal.science/tel-02004352>

Submitted on 1 Feb 2019

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)



Présentée et soutenue par :

Angel BARROSO

le Vendredi 13 Janvier 2017

Titre :

Optimisation des systèmes d'éclairage des bâtiments de l'Université Paul Sabatier basé sur un réseau novateur de type bus continu/basse tension

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED GEET : Génie Electrique



Unité de recherche :

LAPLACE - équipe LM / LAAS équipe ISGE

Directeur/trice(s) de Thèse :

Georges Zissis - Professeur des Universités
Corinne Alonso - Professeur des Universités

Jury :

Georges Zissis - Directeur de thèse - LAPLACE
Corinne Alonso - Co-Directrice de thèse - LAAS
Manuela Sechilariu - Rapporteur - UTC
Hubert Razik - Rapporteur - Laboratoire Ampère
Marie-Pierre Gleizes - Examinatrice - IRIT
Marcos Alonso - Examineur - Université d'Oviedo
Pascal Dupuis - Examineur - LAPLACE
Pierre-Yves Le Breton - Examineur - Oshino Lamps France

Résumé

Les diodes électroluminescentes (LEDs) constituent de nouvelles solutions pour créer des luminaires plus robustes, ayant un meilleur rendement de conversion et plus respectueuses de l'environnement. Malgré les avantages indiscutables déjà obtenus aujourd'hui, ce type de luminaire présente encore quelques optimisations possibles et offre des possibilités de fonctionnalités multiples. À travers plusieurs campagnes de tests, l'auteur montre sur des LEDs du commerce, que les points d'optimisation non encore exploités dans les luminaires commerciaux. Ces LEDs ont ainsi été testés sur de larges plages de fonctionnement du point de vue photométrique, électrique mais aussi thermique pour connaître la reproductibilité des résultats obtenus. Ainsi les influences des conditions d'utilisation notamment en température de fonctionnement et niveaux de courant d'alimentation ont été étudiées. Pour dimensionner au mieux une alimentation électrique spécifique, une recherche de modèles de LED élémentaires a été effectuée. L'objectif est que les modèles tiennent compte des principaux paramètres mais soient suffisamment simples pour être inséré dans un environnement système afin de simuler le luminaire dans son environnement complet. Ainsi, l'étude comparative de plusieurs associations de LEDs a été effectuée permettant d'en déduire des compromis pour proposer de nouvelles solutions faibles consommatrices d'énergie à coût réduit incluant de nouveaux types d'alimentation.

Mots clés : Économie d'énergie – Diodes électroluminescentes – LED – Caractérisation – Association de LEDs — Modélisation – Alimentation DC/DC – Eclairage

Abstract

Light-emitting diodes (LEDs) bring new possibilities to get luminaries robuster with an improved efficiency and more environmentally respectful. Despite the benefits already achieved today, this type of luminary still presents some possible optimisations and provides opportunities for multiple features. Through several tests, the author shows on LED in market that optimisation points are not operated in commercial luminaries. These LEDs have been tested over a wide range of operations in photometric, electrical but also thermal to know the reproducibility of the results. Thus, the influences of operating conditions including operating temperature and supply current levels were studied. To design a specific power supply for each LED type, a search of elementary LED models was performed. The objective is to take into account the main parameters of the models, but also to be simple enough to be inserted into a system environment to simulate the luminary in the whole environment. Thus, the comparative study of several associations of LED was conducted to deduce the best compromise and propose new solutions to reduce energy consumptions and production costs, including new types of power supply.

Keywords: Energy savings – LED – Light-Emitting Diodes – Characterisation – Modelling – Power DC/DC – Lighting

« Comme les hommes aiment avant tout la lumière, ils ont inventé le feu »

G. Apollinaire

C'est avec plaisir que je me consacre à l'écriture des traditionnels remerciements de thèse. La thèse est un exercice qui demande une sacrée dose de courage et de ténacité. Avec du recul, je peux affirmer que le jeu en valait la chandelle, car je mesure aujourd'hui la chance qui m'a été offerte de travailler avec des personnes aux connaissances multiples et venant de tous horizons.

Les travaux de thèse rapportés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein du Laboratoire de Plasma et Conversion de l'Énergie (LAPLACE), dans l'équipe Lumière & Matière (LM). Ainsi qu'au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS), dans l'équipe Intégration de Système de Gestion de l'Énergie (ISGE) et en lien avec l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Ils ont fait l'objet de plusieurs présentations dans le cadre de l'initiative NeoCampus et de plusieurs congrès en génie électrique (Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, Industry Applications Society, Light Sources).

Avant toute chose, je tiens à dire que puisque l'ordre d'apparition dans un discours oral ou écrit reflète une certaine hiérarchie dans l'importance accordée à chacune des personnes, dans mon cas, il faudrait TOUS vous placer au rang 1.

Merci à chacun. Sans vous, cette page n'existerait certainement pas.

Pour commencer, je tiens à remercier infiniment mes deux directeurs de thèse, le professeur Georges Zisis et le professeur Corinne Alonso, pour avoir proposé un sujet aussi intéressant, et surtout pour leur soutien, leur confiance et tout le savoir qu'ils m'ont transmis au cours de ces trois ans de thèse.

Je remercie vivement Monsieur Pascal Dupuis, pour son suivi, sa très grande patience, son implication et son expertise tout au long de mes expériences.

Tout au long de ce parcours, j'ai eu la chance de pouvoir compter sur l'aide d'un très grand nombre de personnes. C'est pourquoi je suis reconnaissant à Monsieur Bruno Jammes, Monsieur David Buso, Monsieur Marc Ternisien et Monsieur Gerald Ledru pour avoir répondu présent lorsque j'avais une question, un problème dans la salle de manip' ou tout simplement pour leur bonne humeur.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Monsieur Lionel Segulier, pour son investissement, son recul sur mon travail et plus généralement pour toutes les plaisanteries.

Plus généralement, je remercie aussi les doctorants (ou docteurs maintenant) qui étaient présents durant ces trois années : Michael Bressan, Benoit Blondel, Jérémy Dulout, Benjamin Ramos, Ilias Papas, Christophe Catalano ou encore Kolja Neuhaus pour leur bonne humeur, les connaissances qu'ils m'ont transmis dans leur domaine respectif ou pour tous les échanges que nous avons eu durant ces 3 années.

Pour terminer, je souhaiterais remercier Madame Manuela Sechilariu et Monsieur Hubert Razik pour avoir accepté de parcourir et analyser mon travail. Et enfin, je remercie chaleureusement Madame Marie-Pierre Gleizes, pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Merci encore de m'avoir donné cette chance.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Introduction générale	1
Chapitre 1 : La lumière, les moyens de la produire, de la mesurer	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Généralités sur le rayonnement.....	3
1.3 Impacts du phénomène lumineux sur l'être humain	7
1.4 La fonction visuelle.....	8
1.5 Différentes définitions servant à qualifier un flux lumineux.....	12
1.5.1 La notion de spectre lumineux	12
1.5.2 La notion de flux spectral énergétique et flux lumineux.....	14
1.5.3 Efficacité des rayonnements et des sources	16
1.5.4 Colorimétrie et température de couleur.....	16
1.6 Les sources de lumière artificielles.....	20
1.6.1 Rappels des deux phénomènes physiques permettant la création de la lumière	21
La thermorayonnance	21
La luminescence	22
1.6.2 Les différentes sources incandescentes.....	22
La chandelle.....	22
La lampe à incandescence.....	22
La lampe à halogène.....	23
1.7 Sources lumineuses luminescentes.....	24
La lampe fluorescente	24
Le tube fluorescent.....	25
La source fluocompacte	26
Lampe à vapeur de mercure	26
Lampe à vapeur de sodium	27
Lampe à induction	28
Les lampes à haute pression	28
Diode électroluminescente organique	28
Transistor organique émetteur de lumière.....	29

1.8 L'électroluminescence.....	30
1.9 Conclusion.....	31
Références.....	33
Chapitre 2 : Les diodes électroluminescentes	37
2.1 Introduction.....	37
2.2 Le principe de fonctionnement d'une LED.....	37
2.3 Problématique des LEDs.....	39
2.3.1 Les matériaux utilisés	39
2.3.1.1 La création de LEDs émettant de la lumière bleue	41
2.3.1.2 Création de LEDs émettant de la lumière blanche.....	42
2.3.2 Critères d'évaluation des performances d'une LED.....	44
2.3.2.1 Mesures de rendements et d'efficacités d'une LED.....	44
2.3.2.2 Notions permettant d'évaluer les performances d'une LED.....	45
2.3.2.3 L'impact de la température sur les LEDs.....	47
2.4 Caractéristiques d'une LED fournies par les constructeurs	49
2.5 Campagne de tests effectuée en laboratoire.....	50
2.5.1 Rappels des caractéristiques électriques issues de la littérature et connues.....	52
2.5.2 Rappels des caractéristiques lumineuses issues de la littérature	54
2.5.3 Rappels des caractéristiques thermiques issues de la littérature.....	54
2.6 Modélisation d'une LED	55
2.6.1 Modèle par spectroscopie d'impédance.....	55
2.6.2 Modèle obtenu avec l'équation d'une Gaussienne pour l'ajustement.....	57
2.6.3 Modèle obtenu avec l'équation de Shockley pour l'ajustement	58
Influence de la température pour la modélisation :	60
Comparaison des modèles avec les mesures :	60
2.7 Conclusion	61
Référence	63
Chapitre 3 : Caractérisation, modélisation et impact des topologies	67
3.1 Introduction.....	67
3.2 Les luminaires.....	68
3.4.1 La topologie série	71
3.4.2 La topologie matrice non-connectée	71
3.4.3 Matrice connectée	72
3.4.4 Première synthèse comparative.....	73

3.5	Mise en œuvre d'études comparatives expérimentales des trois topologies choisies	73
3.5.1.	La mise en place des tests	74
3.5.2.	Etude du rendement lumineux selon les topologies.....	74
3.5.1	Les différentes variantes des matrices connectées	79
3.6	Etude de la dispersion en courant des LEDs.....	81
3.6.1	Conditions d'essais	81
3.6.2	Essais sur 5 LEDs en parallèle	82
3.6.3	Matrice non connectée	84
3.6.4	Matrice non connectée équilibrée	85
3.6.5	Matrice connectée	87
3.6.6	Etude de la disparité de la tension sur les caractéristiques I(V) de l'ensemble des LEDs de la platine de LEDs Lumileds	90
3.7	Établissement de modèles de groupements de LED en vue de la conception de l'alimentation .	91
3.7.1	Identification d'une LED de type Lumileds.....	92
3.7.2	Modélisation de la topologie série	93
3.7.3	Modélisation de la matrice non connectée.....	93
3.7.4	Modélisation de la matrice connectée.....	94
	L'erreur relative entre la mesure et les résultats de simulation est comprise entre -2,2 et 2,1 % pour un courant entre 1 et 100 mA par LED.	94
3.7.5	Synthèse	94
3.8	Evolution des modèles en fonction du nombre de LED et de la topologie	95
3.8.1	Etude de la modélisation de LEDs en série.....	95
3.8.2	Modélisation de LEDs en parallèle	97
3.8.3	Modélisation de LEDs en matrice connectée	98
3.9	Homogénéité lumineuse	99
3.9.1	Matériel et méthode utilisés :	99
3.9.2	Etude de la luminance pour la matrice non connectée	100
3.9.3	Etude de la luminance pour la matrice connectée.....	103
3.9.4	Etude de la luminance pour la topologie série.....	106
3.9.5	Sensibilité des topologies :	107
3.10	Contraste de lumière et uniformité	108
	Contraste de lumière à l'émission des LEDs :	108
	Etude du contraste pour la matrice non connectée	109
	Etude du contraste pour la matrice connectée.....	110
3.10.1	Etude de l'uniformité théorique pour les matrices :	110

3.11 Conclusion	111
Références.....	113
Chapitre 4 : Prototype de luminaire à LED	115
4.1 Introduction.....	115
4.2 Conception d'un prototype de luminaire à LED	115
4.2.1 Contexte des tests comparatifs.....	115
Analyse du luminaire original	116
Caractéristiques théoriques du prototype	117
4.2.2 Choix des LED utilisées dans le prototype.....	118
4.2.3 Études des gains d'efficacité et pertes de flux lumineux:	120
4.2.4 Les convertisseurs statiques.....	121
Convertisseur Buck.....	122
4.2.5 Dimensionnement des composants passifs	122
Calcul du rapport cyclique moyen :.....	122
Inductance :.....	123
Courant max dans l'inductance :.....	123
Capacité de sortie :.....	123
4.2.6 Contraintes sur les interrupteurs :	123
Pilotage des LEDs :.....	124
4.2.7 Asservissement de courant :	125
4.2.8 Modèle utilisé pour mettre au point le prototype.....	126
4.2.9 Modélisation sous Psim :.....	127
4.2.10 Comparaison des simulations Psim et des mesures :.....	128
Test électrique de l'alimentation :	129
4.3 Modélisation thermique.....	130
4.3.1 Analogie thermique :.....	130
4.3.2 Simulations thermiques effectuées avec COMSOL Multiphysics :.....	131
Paramètres utilisés pour les simulations :.....	132
Impact sur la durée de vie du luminaire :.....	136
4.4 Etude photométrique du luminaire	137
4.4.1 Mesure du flux avec la sphère intégratrice	137
4.4.2 Mesure du flux avec le luminancemètre.....	139
4.5 Etude optique du luminaire.....	141
4.5.1 Etude sur la répartition de la lumière émise par les LEDs.....	141

4.5.2	Évaluation de l'impact de la distance entre la source de lumière et le plexiglas.....	144
4.6	Simulation d'éclairage	146
	Dialux :	147
	Scène d'éclairage :	147
4.7	Analyse économique de la solution développée :	149
4.7.1	Comparaison avec la solution fluorescente actuelle :	149
4.7.2	Prévision de la consommation :	151
4.7.3	Consommation en fonction des pays :	153
4.8	Conclusion	155
	Références.....	157
	Conclusion générale et Perspectives	159
	Conclusion générale	159
	Perspectives.....	161
	Annexes	163
	Matériel utilisé pour la caractérisation photométrique	163
	Protocole de caractérisation des LEDs pour la modélisation.....	166
	Premiers prototypes.....	168

Table des figures

Figure 1 : Le spectre électromagnétique

Figure 2 : Transmission d'énergie lors d'une collision

Figure 3 : Illustration du rythme circadien lié au sommeil

Figure 4 : Coupe de l'œil

Figure 5 : Structure de la rétine

Figure 6 : Courbe de densité des photorécepteurs

Figure 7 : Principe de détection de la lumière par un œil humain

Figure 8a : Spectre de la lumière solaire

Figure 8 b : Spectre typique de la lumière naturelle reçue au sol

Figure 9a : Spectre typique d'une lampe incandescente ou issue d'une bougie

Figure 9 b : Spectre typique d'une lampe fluorescente

Figure 9c : Spectre typique d'une LED froide

Figure 9d : Spectre typique d'une LED chaude

Figure 10 : Fonctions d'efficacités lumineuses spectrales photopique et scotopique en fonction des longueurs d'onde

Figure 11 : Triangle des couleurs

Figure 12 : Description de la théorie des corps noirs

Figure 13 : Température de couleur proximale

Figure 14 : Les méthodes de production de lumière

Figure 15 : Chandelle en silicone

Figure 16 : Une ampoule à incandescence

Figure 17 : Lampe à halogène

Figure 18 : Description du fonctionnement

Figure 19 : Principe de la fluorescence et de la phosphorescence

Figure 20 : Tube fluorescent sans poudre en fonctionnement

Figure 21 : Schéma de montage d'un luminaire à tube fluorescent

Figure 22 : Lampe fluocompacte

Figure 23 : Émission de lumière avec une décharge

Figure 24 : Lampe à vapeur de mercure

Figure 25 : Lampe à vapeur de sodium

Figure 26 : Lampe à induction

Figure 27 : Architecture d'une OLED

Figure 28 : Architecture d'un OFET

Figure 29 : Illustration de la loi de Haitz

Figure 30 : Une jonction PN pour une diode

Figure 31 : Une jonction PN pour une LED

Figure 32 : La nature des matériaux

Figure 33 : Représentation du diagramme énergétique en fonction de k pour un matériau à gap direct (a) et à gap indirect (b)

Figure 34 : Production de lumière blanche

Figure 35 : Effet Stokes pour la production de lumière

Figure 36 : Proportion d'émission de "bleu" dans des LEDs chaude et froide

Figure 37 : Appareils utilisés lors des mesures sur les LEDs

Figure 38 : Rendement quantique interne en fonction de la densité de courant à 22 °C

Figure 39 : Exemple d'efficacité quantique typique normalisée en fonction de la densité de courant dans une LED [84]

Figure 40 : Exemple de wafer servant à la conception de 20 000 LEDs avant découpe

Figure 41 : Rendement lumineux en fonction de la puissance pour toutes les principales LEDs testées

Figure 42 : Caractéristiques courant tension d'une LED pour différentes couleurs

Figure 43 : Caractéristique typique d'une LED à 40 °C

Figure 44 : La résistance thermique de plusieurs modèles de LED

Figure 45a : Comportement capacitif de la LED

Figure 45 b : Comportement RC de la LED

Figure 45c : Comportement résistif de la LED

Figure 46 : Modèle électrique équivalent d'une LED

Figure 47 : Caractéristique d'une diode

Figure 48 : Erreur relative de la tension simulée pour le modèle

Figure 49 : Les différentes fonctions élémentaires d'un luminaire

Figure 50 : Les différentes classes de luminaire

Figure 51 : Deux exemples d'association de LEDs présentes dans des luminaires complets du commerce assemblées en matrice non connectée

Figure 52 : Schéma de connexion de LEDs en série

Figure 53 : Schéma de connexion de LEDs agencées en matrice non connectée

Figure 54 : Schéma de connexion des LEDs en matrice connectée

Figure 55 : Platine de LED à configuration variable réalisée au LAAS pour effectuer les tests comparatifs expérimentaux

Figure 56 : Rendement lumineux mesuré en fonction de la puissance consommée pour la platine de 25 LEDs de référence XPG-G2 pour plusieurs topologies

Figure 57 : Rendement lumineux en fonction de la puissance pour les différentes LEDs étudiées entre 0 à 10 W

Figure 58 : Rendement lumineux en fonction de la puissance pour les différentes LEDs étudiées entre 0 à 30 W

Figure 59a : Exemple de topologie de LEDs de type matrice connectée rectangulaire (2*8)

Figure 59 b : Exemple de topologie de LEDs de type matrice connectée carrée (4*4)

Figure 60 : Comparaison des deux types de matrices connectées avec les LEDs de type Osram (LED 1) et Lumileds (LED 2)

Figure 61 : Connexion des 5 LEDs XPG-G2 testées en parallèle

Figure 62 : Répartition des 5 courants des LEDs XPG-G2 en parallèle

Figure 63 : Topologie de type matrice non connectée 5*5 utilisée pour les tests en courant

Figure 64 : Représentation de la dispersion des courants pour les 5 LEDs fonctionnant dans la topologie matrice non-connectée à différents courants injectés

Figure 65 : Topologie de type matrice non connectée équilibrée

Figure 66 : Exemple de réglette à LEDs pour application domotique avec les résistances d'équilibrage

Figure 67 : Dispersion du courant pour 5 LEDs en matrice non connectée équilibrée à différents courants injectés

Figure 68 : Topologie de type matrice connectée

Figure 69 : Dispersion du courant pour 5 LEDs en matrice connectée à différents niveaux de courants injectés

Figure 70 : Dispersion des caractéristiques $I(V)$ pour une même rampe en courant sur 25 LEDs XPG-G2

Figure 71 : Courbe $I(V)$ expérimentale et la courbe $I(V)$ simulée dans Psim pour une LED Lumileds

Figure 72a : Courbe $V=f(I)$ mesurée et sa courbe simulée dans Psim pour une LED

Figure 72 b : Erreur relative entre la tension mesurée et simulée dans Psim pour une LED

Figure 73a : Courbe $V=f(I)$ mesurée et sa courbe simulée dans Psim pour 25 LEDs en série

Figure 73 b : Erreur relative entre la tension mesurée et simulée dans Psim pour 25 LEDs en série

Figure 74a : Courbe $V=f(I)$ mesurée et sa courbe simulée dans Psim pour 25 LEDs en matrice non connectée

Figure 74 b : Erreur relative entre la tension mesurée et simulée dans Psim pour 25 LEDs en matrice non connectée

Figure 75a : Courbe $V=f(I)$ mesurée et sa courbe simulée dans Psim pour 25 LEDs en matrice connectée

Figure 75 b : Erreur relative entre la tension mesurée et simulée dans Psim pour 25 LEDs en matrice connectée

Figure 76 : Schéma équivalent d'une LED avec sa résistance série

Figure 77 : Exemple de carte de luminance après exploitation des mesures dans le cas de la platine de Lumileds connectées en topologie série

Figure 78 : Carte de luminance de la topologie matrice non connectée pour 25 LEDs Lumileds

Figure 79 : Carte de luminance en 3D de la matrice non connectée

Figure 80 : Représentation de la puissance consommée et de la luminance émise pour chaque branche de la matrice non connectée

Figure 81 : Carte de luminance de la topologie matrice connectée pour 25 LEDs Lumileds

Figure 82 : Carte de luminance en 3D de la matrice connectée

Figure 83 : Luminance émise en matrice connectée pour 25 LEDs Lumileds

Figure 84 : Puissance consommée en matrice connectée pour 25 LEDs Lumileds

Figure 85 : Carte de luminance en 3D de la topologie série pour 25 LEDs Lumileds

Figure 86 : Luminance émise pour chaque ligne de la topologie série

Figure 87 : Contraste de lumière dans la matrice non connectée

Figure 88 : Contraste de lumière dans la matrice connectée

Figure 89 : Photo mise en place en plafonnier du luminaire original Lucipannel

Figure 90 : Diagramme des intensités lumineuses

Figure 91 : Description de la fonction Lambertienne

Figure 92 : CREE XPGWHT-01-0000-00FE5

Figure 93 : Rendement lumineux en fonction de la puissance de la LED CREE XPGWHT-01-0000-00FE5 mesuré en laboratoire à 35 °C

Figure 94 : Spectre énergétique de la LED CREE XPGWHT-01-0000-00FE5

Figure 95 : Analogie électrique du modèle thermique utilisé

Figure 96 : Représentation en 3D sous Autocad du prototype complet

Figure 97 : Représentation en 2D sous Autocad d'une barre de LED du prototype

Figure 98 : Section simplifiée de la barre de LED

Figure 99 : Résultats de la répartition de la chaleur simulée dans Comsol sur une barre de LED

Figure 100 : Détail de la répartition de la chaleur simulée avec l'outil Comsol dans une section de la barre de LED

Figure 101 : Mesure de la température sur une barre de LED pendant 8 h de fonctionnement à courant optimal

Figure 102 : Température mesurée dans le prototype et dans l'environnement sur 8 h de fonctionnement

Figure 103 : Impact de la température sur la durée de vie pour une LED CREE d'après [110]

Figure 104 : Schéma de connexion des 25 LEDs par barre du luminaire à LED

Figure 105 : Dispersion Lambertienne

Figure 106 : Illustration de la loi du carré inverse des distances

Figure 107 : Carte de luminance d'une des anciennes LEDs

Figure 108 : Carte de luminance après transformation

Figure 109 : Carte de luminance après transformation d'une des nouvelles LEDs

Figure 110 : Montage de l'expérience pour étudier le plexiglas

Figure 111 : Vue de côté du montage de l'expérience pour étudier le plexiglas

Figure 112 : Carte de luminance de la répartition de la lumière avec la lampe SHP à 15 cm du plexiglas

Figure 113 : Carte de luminance de la répartition de la lumière après transformation

Figure 114 : La nature du courant électrique et les méthodes de transformation

Figure 115 : Schéma électrique du Buck

Figure 116 : Schéma de principe du Buck

Figure 117 : Caractéristique courant tension d'une LED

Figure 118 : Impact de la température sur la tension

Figure 119 : Schéma bloc du Buck asservi

Figure 120 : Schéma électrique du Buck

Figure 121 : Comparaison du modèle inséré dans Psim avec les mesures sur le prototype

Figure 122 : Schéma électrique de l'alimentation avec son asservissement

Figure 123 : Réponse en tension V_{led} pour une consigne en courant I_{led} du Buck

Figure 124 : Erreur relative sur la tension simulée dans Psim pour un courant injecté autour du courant nominal

Figure 125 : Convertisseur Buck

Figure 126 : Modélisation Dialux d'une scène d'éclairage

Figure 127 : Vue de dessus de la scène d'éclairage avec délimitation des zones à étudier en particulier

Figure 128 : Consommation théorique des 3 solutions

Figure 129 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relampage de 3 ans

Figure 130 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relampage de 5 ans

Figure 131 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relampage de 3 ans dans les pays à faible coût de l'énergie

Figure 132 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relampage de 3 ans dans les pays à coût moyen de l'énergie

Figure 133 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relampage de 3 ans dans les pays à fort coût de l'énergie

Table des tableaux :

Tableau 1 : Les différentes ondes et leurs longueurs d'onde associées

Tableau 2 : Efficacité lumineuse spectrale relative $V(\lambda)$ en vision photopique

Tableau 3 : Les largeurs de bandes interdites pour des matériaux à gap direct ou indirect à 0 °K66

Tableau 4 : Lien entre le type de matériau et la couleur émise pour les LEDs

Tableau 5 : Résumé des principales caractéristiques techniques des LEDs étudiées

Tableau 6 : Caractéristiques mesurées des LEDs étudiées à 350 mA

Tableau 7 : Caractéristique de l'ajustement avec une Gaussienne

Tableau 8 : Caractéristique de l'ajustement

Tableau 9 : Caractéristique des topologies

Tableau 10 : Grandeur électriques pour une platine de 25 LEDs XPG-G2 pour chaque topologie

Tableau 11 : Bilan des rendements lumineux à 350 mA et à courant optimal

Tableau 12 : étude de la dispersion entre les LEDs XPG-G2

Tableau 13 : Ecarts de courant mesurés pour différents courants injectés en topologie matrice non connectée

Tableau 14 : Ecarts de courant mesurés pour différents courants injectés en topologie matrice non connectée équilibrée

Tableau 15 : Ecarts de courant mesurés pour différents courants injectés en topologie matrice connectée

Tableau 16 : Ecart type des tensions à différents niveaux de courant pour 25 LEDs LX18-P130-Y

Tableau 17 : Evolution des coefficients du modèle de Shockley en fonction du nombre de LED connectée en série

Tableau 18 : Evolution des coefficients en fonction du nombre de LED en matrice non connectée

Tableau 19 : Evolution des coefficients en fonction du nombre de LED en matrice connectée

Tableau 20 : Ecart type de luminance et luminance moyenne pour la matrice non connectée

Tableau 21 : Ecart type de luminance et luminance moyenne en matrice connectée pour 25 LEDs Lumileds

Tableau 22 : Sensibilité de la luminance aux répartitions de courant pour les deux matrices

Tableau 23 : Eclairage minimum, moyen et uniformité de la lumière pour les deux matrices à 2 m

Tableau 24 : Caractéristiques du luminaire avant optimisation

Tableau 25 : Caractéristiques théoriques du prototype

Tableau 26 : Principales caractéristiques constructeur des LEDs référencées CREE XPGWHT-01-0000-00FE5

Tableau 27 : Rendement lumineux et gain de rendement lumineux en utilisant les LEDs à efficacité maximale

Tableau 28 : Nombre de LEDs nécessaire pour compenser la perte de flux à efficacité maximale

Tableau 29 : Analogie entre les grandeurs électriques et thermiques

Tableau 30 : Les différents matériaux composant le prototype

Tableau 31 : Rendement lumineux en fonction du courant pour la barre de LED optimisée

Tableau 32 : Rendement lumineux en fonction du courant pour le prototype

Tableau 33 : Comparaison des flux pour les luminaires

Tableau 34 : Caractéristiques électriques de l'alimentation

Tableau 35 : Résumé des principales grandeurs simulées sur les quatre zones

Tableau 36 : Caractéristiques des luminaires utilisés dans Dialux

Tableau 37 : Puissance installée et flux théorique en fonction du type de LED et de la manière des associer

Tableau 38 : Consommation et coût annuel en fonction du type de LED et de la manière des associer

Tableau 39 : Coût de l'énergie électrique dans plusieurs pays

Valorisation des travaux de thèse :

Conférence sans acte :

IAS2014, Vancouver du 5 au 9 octobre 2014

Publication: Lighting – Reduce the consumption and increase the comfort of the users

Auteurs: Angel Barroso, Pascal Dupuis, Corinne Alonso, Georges Zissis

IAS2016, Portland du 2 au 6 octobre 2016

Publication: Methodology to find the optimal current to supply a LED string lighting

Auteurs: Jérémy Dulout, Angel Barroso, Bruno Jammes, Georges Zissis, Corinne Alonso

Conférence avec acte :

Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, Saint Louis du 4 à 6 juin 2014

Publication : L'éclairage — Réduire les consommations énergétiques et augmenter le confort

Auteurs : Angel Barroso

Présentation poster

Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, Cherbourg le 10 et 11 juin 2015

Publication : Optimisation de l'efficacité des LED grâce à la topologie et du niveau de courant

Auteurs : Angel Barroso, Pascal Dupuis, Corinne Alonso, Georges Zissis

Présentation orale, publication revue 3EI

IAS2015, Dallas du 18 au 22 octobre 2015

Publication: A characterization framework to optimize LED light fixtures luminous efficacy

Auteurs : Angel Barroso, Pascal Dupuis, Corinne Alonso, Georges Zissis

Présentation orale

LS15, Kyoto du 22 au 27 mai 2016

Publication: Impact of current sharing issue on luminance and uniformity

Auteurs : Angel Barroso, Pascal Dupuis, Corinne Alonso, Georges Zissis

Présentation poster

Journée Néo Campus, Université Paul Sabatier de Toulouse, juillet 2014/2015/2016

Présentation poster et o

Introduction générale

Dans un contexte mondial de transition énergétique, selon l'agence française de l'éclairage, estime à 12 % [1] de notre production nationale électrique utilisé pour l'éclairage public. Cela représente une consommation conséquente sur laquelle des réductions massives sont possibles sachant que beaucoup de sources de lumière énergivores sont encore en utilisation. L'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie [2] évalue ainsi le potentiel d'économie d'énergie entre 40 et 80 % des 56 TWh de consommation annuelle d'énergie.

Chaque jour dans le monde, 33 milliards de sources nous éclairent en utilisant 19 % de la production mondiale d'électricité. Cette consommation atteint le chiffre de 3 140 TWh annuellement. Tous les pays ne consacrent pas la même quantité d'énergie à l'éclairage, par exemple, l'Allemagne n'utilise que 9 %, ou la France qui utilise 12 %. Parallèlement, les États unis ont de leur côté 21 % de leur production qui est allouée à l'éclairage, ce qui équivaut à la production totale d'électricité de la France et de l'Italie.

En prenant le cas de France plus en détail, et en observant uniquement l'éclairage extérieur. Il y a un peu moins de 9 millions de sources qui illuminent nos routes. La puissance équivalente à toutes ces sources est d'environ 1 260 MW (une tranche de centrale nucléaire de puissance moyenne). En outre, l'analyse de l'état des lieux des installations d'éclairage, confirmée par le Grenelle Environnement, fait apparaître d'importants besoins de rénovation de notre parc d'éclairage ; plus de la moitié de ce dernier est composé de matériels obsolètes et énergivores : boules diffusantes, lampes à vapeur de mercure (environ un tiers du parc), et 40 % des luminaires en service ont plus de 25 ans ou ne sont plus conformes.

Divers usages peuvent être étudiés concernant l'éclairage artificiel pour pallier l'absence de soleil. Celui utilisé en intérieur de locaux, celui externe dit éclairage sur la voie publique et celui dit nomade assurant une meilleure vision en cas de déplacement pédestre ou avec tout type de véhicule. Au fil de l'histoire, plusieurs inventions ont permis d'améliorer ces divers besoins.

Bien que l'éclairage public à ses débuts devait répondre avant tout à la fonction « éclairer », son évolution avec le temps a mis en avant d'autres objectifs comme la sécurité ou encore la qualité des ambiances lumineuses devenues au fil du temps les principales exigences demandées dans l'espace public. Par contre depuis quelque temps, ces critères de sécurité et de confort visuel sont associés aux performances visant à mieux cibler les points à éclairer et ceux à laisser dans l'ombre pour préserver la faune, la flore environnante et les autres usagers ainsi qu'aux économies d'énergies. Les enjeux des avancées potentielles dans ce domaine se focalisent ainsi sur deux catégories :

- 1) Les enjeux économiques en lien avec la consommation énergétique annuelle pour l'éclairage public s'élèvent à 5,35 TWh tout confondu qui représente 1 % de la consommation d'énergie française annuelle. Cependant, comme ce chiffre correspond à 41 % [3] des consommations d'électricité des collectivités territoriales, soit 16 % de leurs consommations toutes énergies confondues, ce service public pèse pour environ 37 % dans la facture d'électricité des communes et donc toute économie potentielle est la bienvenue.

- 2) Les enjeux écologiques liés au type de production de lumière qui impacte à la fois les ressources naturelles et l'environnement. La pollution lumineuse qui perturbe chaque nuit un peu plus notre biodiversité est désormais étudiée et à prendre en compte dès le début de la conception des nouveaux luminaires. De même concernant le recyclage des sources de lumière après plusieurs milliers d'heures de fonctionnement. Les enjeux sociétaux concernant la sécurité des biens et des personnes qui reste la première des priorités qu'elle soit immédiate ou à long terme. Elle s'accompagne d'une bonne qualité d'ambiance lumineuse ouvrant de nouvelles études de l'impact des luminaires sur notre santé. De plus, de nouveaux besoins sont désormais à prendre en compte selon les catégories de population comme les personnes malvoyantes, les personnes âgées.

Dans ce contexte, les diodes électroluminescentes (LEDs) constituant des luminaires plus flexibles que ceux conçus jusque-là offrent une formidable opportunité de réduction de consommations et répondent à plusieurs critères faisant de ce type d'éclairage un des enjeux de demain concernant son déploiement massif, quels que soient les usages. Cependant, malgré les avantages indiscutables, il présente encore quelques optimisations possibles pouvant être effectuées avec une meilleure connaissance des conditions de fonctionnement comme la température et le courant d'alimentation dans un objectif de réduire drastiquement le coût de ce type de luminaires. Dans le contexte de l'initiative Néo Campus visant à réaménager le campus de l'Université Paul Sabatier de Toulouse en campus vert exemplaire et la fédération SH & HD regroupant les chercheurs de plusieurs disciplines que se sont effectués ces travaux de recherche conjointement encadrés par le LAPLACE et le LAAS afin d'étudier les interactions des usagers et des usages.

Ce manuscrit est composé de 4 chapitres. Le premier chapitre traitera la nature de la lumière, des méthodes de productions pour la produire et des grandeurs de base pour la caractériser. Le second chapitre s'attachera aux LEDs, leur fonctionnement ou encore les problématiques associés. Le troisième chapitre présentera les structures de LED étudiées, leur caractérisation et leur modélisation. Le dernier chapitre concernera l'application à travers l'étude du prototype mis en place pour remplacer les solutions à luminaire à fluorescence standard. Pour finir, en annexe seront présentés les projets d'éclairage effectué durant la thèse.

Chapitre 1 : La lumière, les moyens de la produire, de la mesurer

1.1 Introduction

Avant d'exposer les principaux résultats scientifiques, il nous est apparu nécessaire d'effectuer un rappel historique sur les études des phénomènes lumineux, les créations de lumières artificielles et les diverses notions de physique qui nous ont été nécessaires pour effectuer les tests dans les conditions de mesure les plus précises possible. La lumière est quelque chose de très familier, car elle nous accompagne depuis le premier jour de notre venue au monde. Cependant, il a fallu attendre un très grand nombre d'années avant qu'il y ait une étude la concernant. Une fois, ce point de départ initié, des grands hommes, tels que Newtown, Einstein ou d'autres ont apporté leur contribution. Au fur et à mesure de son étude, la lumière s'est révélée comme n'étant qu'une partie de ce qui est aujourd'hui appelé le spectre électromagnétique. Les études révélèrent sa nature et deux nouvelles sciences apparues : l'étude des rayonnements invisibles, la radiométrie et celle la concernant pour les radiations visibles : la photométrie. Dans le but de pouvoir la recréer, elle fut générée dans un premier temps par combustion et ensuite en utilisant l'électricité dans des ampoules. Ensuite, une grande série de progrès ont été faits. Partant du principe de l'incandescence, en continuant par l'émission de lumière dans des gaz avant d'arriver aujourd'hui à la génération de photon à partir d'un matériau solide.

1.2 Généralités sur le rayonnement

Dans le domaine scientifique, la lumière fait désormais partie des phénomènes physiques rassemblés sous la dénomination « rayonnement électromagnétique » véhiculant de l'énergie dans l'espace.

Il existe une dualité sur l'explication physique de la lumière qui s'est établie au fil de l'histoire où les aspects purement ondulatoires puis corpusculaires ont été tour à tour privilégiés. Une première théorie complète de la lumière a ainsi été établie par le physicien néerlandais Christian Huygens au XVIIe siècle [4]. Il proposait une théorie ondulatoire de la lumière et a en particulier démontré que les ondes lumineuses pouvaient interférer de manière à former un front d'onde se propageant en ligne droite. Toutefois, sa théorie ne pouvait pas expliquer certains phénomènes lumineux. Elle fut alors éclipsée par la théorie corpusculaire de la lumière établie à la même époque par Isaac Newton. Ce physicien proposait une autre explication de la lumière qu'il concevait constituée de corpuscules. Ce qui avait pour avantage d'expliquer simplement les phénomènes de réflexion optique. Au prix d'explications complexes, cette théorie pouvait également expliquer les phénomènes de réfraction à travers une lentille et de dispersion d'un faisceau lumineux à travers un prisme. Par contre, au début du XIXe siècle, les expériences de diffraction faites par Thomas Young et Augustin Fresnel démontraient la pertinence des théories de Christiaan Huygens. En effet, ces expériences prouvèrent que quand la lumière était envoyée sur un réseau de diffraction, il était possible d'observer un motif d'interférences caractéristique, très semblable aux motifs résultant de l'interférence d'ondulations sur l'eau. La longueur d'onde de la lumière peut ainsi être calculée à partir de tels motifs. La vision ondulatoire de la lumière s'est alors réimposée peu à peu à la communauté scientifique au cours du

XIXe siècle, surtout grâce à l'explication en 1821 par Augustin Fresnel du phénomène de polarisation de la lumière que ne pouvait expliquer l'approche corpusculaire. À la suite de l'expérience menée en 1850 par Léon Foucault sur la vitesse de propagation de la lumière, les équations proposées par Huygens furent vérifiées par de multiples expériences imposant alors la vision ondulatoire comme largement admise. Dans la seconde moitié du XIXe siècle, James Maxwell expliqua alors la lumière en tant que propagation d'ondes électromagnétiques avec ses équations connues aujourd'hui sous le nom d'équations de Maxwell. Le débat s'est rouvert au XXe siècle notamment en 1905 lorsqu'Albert Einstein utilisa le concept de particules de lumière mis en évidence par l'effet photo-électrique pour appuyer la nature corpusculaire de la lumière. Il utilisa la notion de quantum d'énergie initialement introduit par Max Planck en 1900 dans le cadre de l'explication qu'il proposa lui-même pour l'émission du corps noir. Einstein a ainsi expliqué que ce phénomène était provoqué par l'absorption de photons alors nommés « quanta de lumière » lors de l'interaction du matériau avec la lumière.

Ces deux visions ayant été étayées par des expériences scientifiques répétées mais n'expliquant chacune qu'une partie du phénomène lumineux, il en a été déduit que les deux points de vue sont exacts mais ne montrent par l'expérience qu'une partie du phénomène lumineux comme si nous faisons l'analogie avec l'observation d'une forme géométrique ayant un certain volume dans l'espace 3D et dont la vision se réduit à une surface quand nous réduisons le point d'étude à 2 D. En fonction du point de vue, le volume n'est alors « vu » que par son ombre projetée. Cela a ainsi donné naissance à la théorie de dualité onde-corpuscule de la lumière qui est devenue un principe fondamental de la théorie de la mécanique quantique. Ainsi, la lumière se comporte soit comme une onde, soit comme une particule. Le choix de l'angle d'étude et des équations à utiliser pour expliquer les phénomènes dépend donc des études menées et des conditions expérimentales de l'expérience.

Par exemple, prenons d'abord l'aspect ondulatoire de la lumière. Cette dernière peut être considérée comme un rayonnement constitué d'un ensemble de radiations comprises entre 380 et 780 nm (le spectre visible). Chacune d'entre elles peut être caractérisée en tant que phénomène périodique de période (T) et de longueur d'onde (λ). Il est possible de relier la fréquence (ou la période) à la longueur d'onde grâce à la grandeur c qui correspond à la célérité de la lumière s'élevant à 300 000 km/s dans le vide par la formule :

$$\lambda = c * T \quad (1. 1)$$

Historiquement, les premières longueurs d'onde étudiées furent celles qui appartenaient au spectre visible, car c'était les seules mesurables à cette époque. En effet, notre sens de la vision résulte de la détection spécifique d'une partie du spectre électromagnétique, soit entre 380 et 780 nm qui est la partie sensible de l'œil humain. Cette partie du spectre est connue sous le nom de « lumière » (figure 1). Dans notre environnement, cette lumière est produite par le soleil ou les étoiles en vision directe, elle peut aussi nous arriver par vision indirecte à travers le ciel, les nuages ou la réflexion de la lune. Cependant, ce spectre comprend bien d'autres longueurs d'onde non visibles par l'œil humain. Avec l'évolution des instruments de mesure, la découverte d'un spectre électromagnétique bien plus large provenant du soleil a été complétée avec tout d'abord la découverte des Infrarouges (en 1800 par W. Herschell) et des ultraviolets (en 1801 par J. W. Ritter). Aujourd'hui, il est possible de mettre en évidence des phénomènes ondulatoires de la lumière allant des rayonnements cosmiques aux ondes radioélectriques. La figure 1 et le tableau 1 illustrent ainsi pour chaque longueur d'onde la partie du spectre concerné.

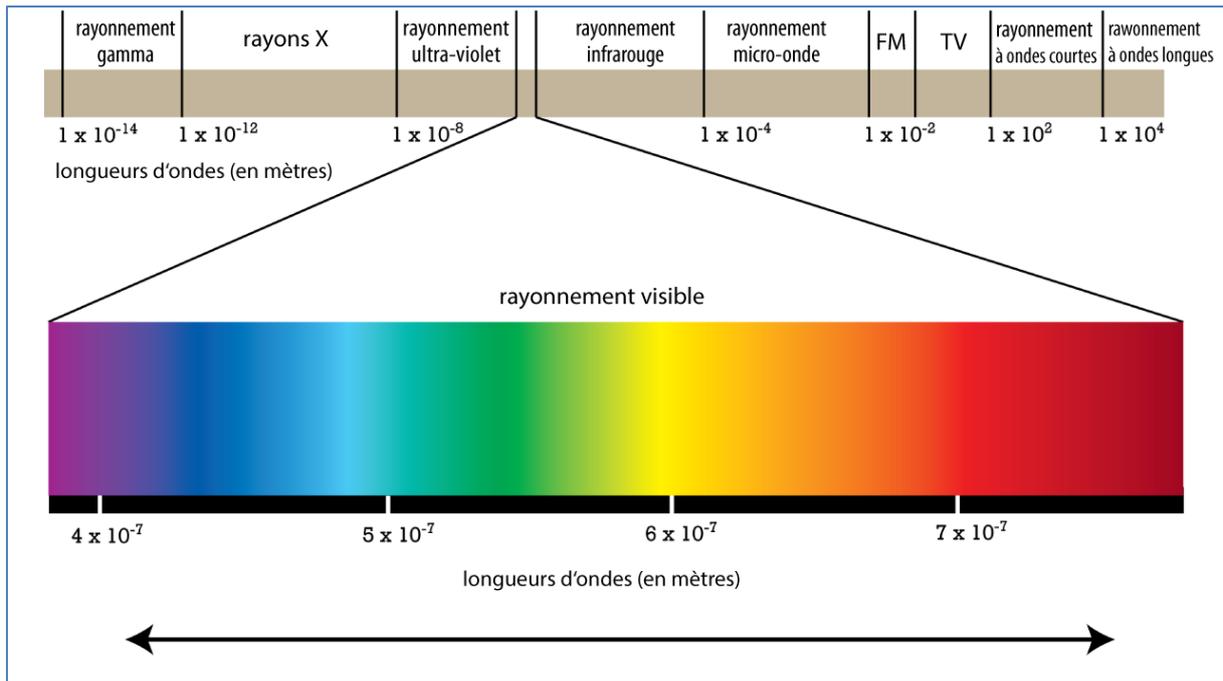


Figure 1 : Le spectre électromagnétique [5]

Nom de l'intervalle de rayonnement	Intervalle en longueur d'onde (nm)
Rayons gamma	< 0,01
Rayons X	0.01 – 10
Ultra-violets	10 – 380
Lumière	380 – 780
Infra-rouges	780 – 10^6
Micro-ondes	10^6 – 10^9
Ondes radioélectriques	10^9 – 10^{14}

Tableau 1 : Les différentes ondes et leurs longueurs d'onde associées [6]

Maintenant, prenons l'autre approche de la lumière dite corpusculaire. Dans cette vision, le rayonnement lumineux n'est pas émis ou absorbé par la matière de manière continue, mais de façon discontinue. Dans cette théorie, on considère que le rayonnement est composé de particules nommées « photons » et qu'elles transportent une quantité d'énergie. Lorsqu'un photon rencontre un électron, il se produit une collision dite élastique. Après la collision, le photon voit son énergie diminuer au profit de l'électron comme illustré dans la figure 2.

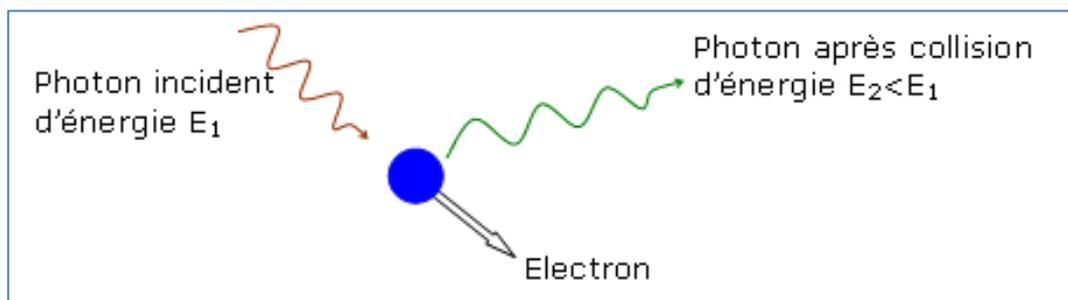


Figure 2 : Transmission d'énergie lors d'une collision [7]

Albert Einstein montra que la fréquence du rayonnement ν est liée à l'énergie E grâce à la relation de Planck :

$$E = h * \nu \quad (1,2)$$

$$\text{Avec } \nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1,3)$$

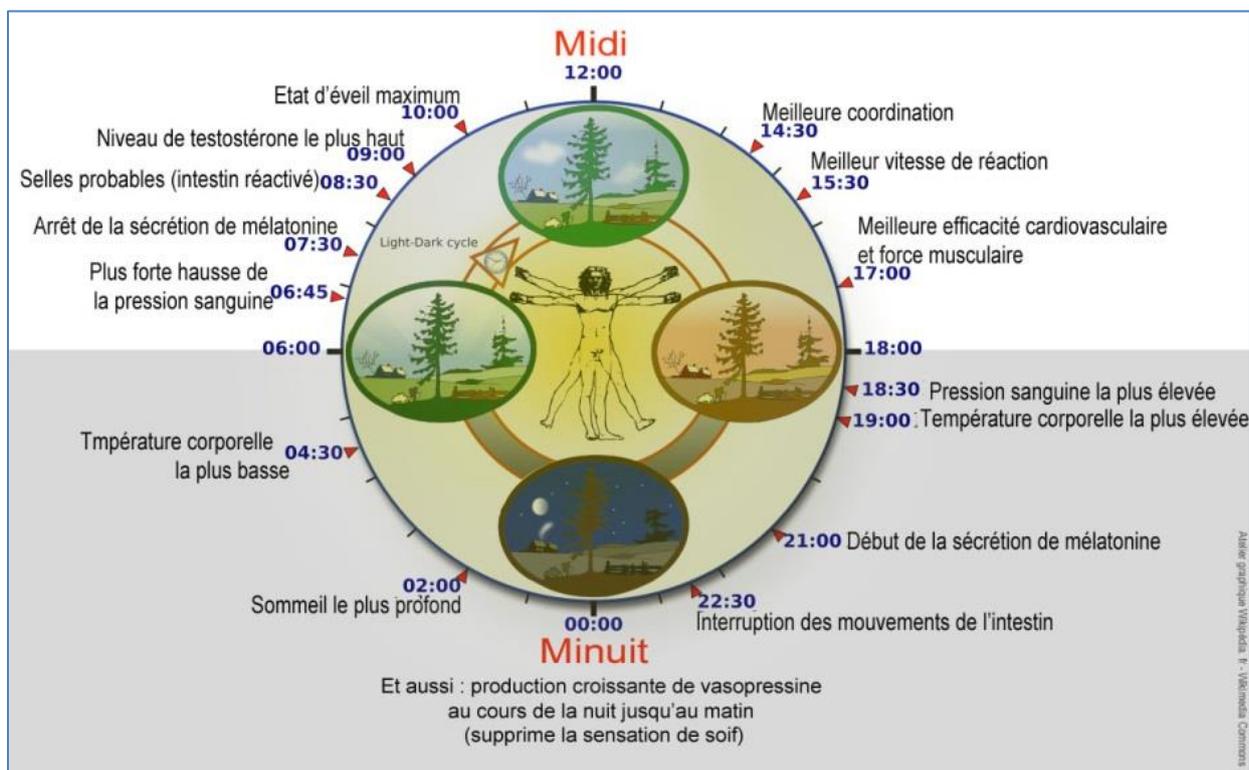
h correspond à la constante de Planck (6.626×10^{-34} J.s), c , la célérité de la lumière dans le vide (300×10^6 m/s), et λ la longueur d'onde de la radiation.

Cette relation montre en outre que les photons ayant de courtes longueurs d'onde sont beaucoup plus énergétiques que ceux ayant des longueurs d'onde plus importantes. Pendant très longtemps, ces aspects n'ont pas réellement été exploités pour la création d'un luminaire comme nous avons détaillé dans les parties suivantes selon les phénomènes physiques utilisés notamment à partir de l'incandescence. Cependant, depuis la découverte qu'un composant à base de matériau semi-conducteur peut selon certaines utilisations émettre de la lumière, il est judicieux de choisir et optimiser ce phénomène en fonction des longueurs d'onde à restituer dans le spectre du visible.

Avant d'effectuer un rappel sur le phénomène de l'électroluminescence, il nous semble important de bien comprendre l'impact de l'environnement lumineux dans lequel nous vivons sur notre corps et le fonctionnement de l'organe visuel humain servant de référence. C'est l'objet des deux paragraphes ci-dessous qui représente la synthèse minimale qui nous a été nécessaire pour la prise en compte d'un certain nombre de contraintes liées à l'œil humain.

1.3 Impacts du phénomène lumineux sur l'être humain

Sur l'être humain, la lumière a un impact à plusieurs niveaux. Du point de vue physiologique, la lumière est considérée comme source de vie pour beaucoup d'espèces végétales et animales. En liant aux notions de rythmes biologiques et notamment les rythmes circadiens de l'être humain comme celui du sommeil illustré en figure 4, nous pouvons voir que la présence ou l'absence de lumière influence le métabolisme humain.



Les rythmes circadiens sont décrits par le corps médical [9] comme étant endogènes, c'est-à-dire générés à l'intérieur de notre corps par un mécanisme temporel interne nommé horloge circadienne. Cependant, plusieurs rythmes circadiens peuvent être influencés par la luminosité au cours d'une journée comme la température corporelle, le rythme du sommeil, le rythme cardiaque, les niveaux d'éveil et de l'humeur, de la vigilance, ou bien même de la mémoire.

Chez l'homme, la période de chaque cycle est un peu supérieure à 24 h pouvant prendre jusqu'à une heure de retard tous les 5 jours selon l'étude [10]. La lumière est l'élément clé qui empêche ce phénomène de décalage de se produire en temps normal. En effet, chaque jour, l'information lumineuse de l'environnement transmise à partir de la rétine jusqu'aux deux noyaux suprachiasmatiques (NCs) [11] via des connexions neuronales directes remet l'horloge circadienne à l'heure de la Terre. Par exemple, l'exposition à la lumière en fin de soirée retarde les rythmes circadiens entraînant une tendance à s'endormir et à s'éveiller retardée. L'exposition à la lumière tôt le matin avance les rythmes circadiens et par conséquent, la tendance à s'endormir et à s'éveiller plus tôt.

Du point de vue psychologique, l'impact de la lumière agissant sur notre humeur a été démontré comme non négligeable qu'elle soit d'origine naturelle ou artificielle. Elle joue par exemple sur la

notion du sentiment de sécurité dans notre environnement. Par exemple, une étude [12] réalisée par l'Université de Grenade avec un échantillon de 270 personnes démontre l'impact positif de l'éclairage pour les piétons circulant. Bien qu'il ne soit pas possible de se prémunir des agressions ou des cambriolages, la qualité d'éclairage extérieur a un impact certain sur ce type d'évènement. L'Agence Française de l'Eclairage (AFE) [13] a noté que dans les pays comme les États unis ou la Belgique, que lorsque l'éclairage venait à être coupé, les problèmes de délinquance augmentaient. Cependant, il est important de noter qu'allumer des luminaires a surtout un impact dissuasif.

Artistiquement, la lumière apporte à certaines œuvres architecturales ou picturales un regard différent selon la matière à sculpter. En 1923 [14], Le Corbusier défendait une philosophie dans son ouvrage sur l'architecture : "L'architecture est le jeu savant, correct et magnifique des volumes assemblés sous la lumière" et "Les éléments architecturaux sont la lumière et l'ombre, le mur et l'espace". Dans ces cas d'architecture, la lumière naturelle était l'un des matériaux de base à toute conception architecturale. La lumière artificielle permettait après la lumière naturelle d'apporter une nouvelle vision, cette dernière étant contrôlable et adaptable à souhait. Cela en fait un moyen privilégié par les architectes pour la mise en valeur d'un bâtiment [15].

D'autre part, la qualité de la lumière est également importante [16]. Ainsi, un éclairage avec une lumière blanche sera plus rassurant qu'avec une lumière jaunâtre (type sodium) [17]. La perception est sans doute l'un des sens les plus importants chez l'être humain. Cependant, lorsqu'il s'agit de travailler ou de se reposer dans une pièce, la qualité de la lumière et plus généralement, la qualité des ambiances lumineuses est très importante [18]. Cela peut avoir des impacts inattendus sur l'être humain que cela soit en bien ou en mal. Une lumière trop intense peut engendrer des éblouissements ou des difficultés à lire un écran ou un document. Un éclairage rayonnant une lumière froide (avec une majorité de rayonnements bleus) entraîne une stimulation des personnes [19]. À l'opposé une lumière chaude entraîne un accroissement des hormones du sommeil. Et pour une partie de la population, la lumière peut aussi être une des causes des migraines [20] [21].

Au-delà des aspects économie d'énergie qui sont les premières demandes d'amélioration des éclairages intérieurs et extérieurs, il est indispensable de tenir compte de ces aspects pour la conception de nouveaux luminaires pour satisfaire des demandes souvent non formulées. Pour aller plus loin, nous donnons les bases de fonctionnement de notre capteur assurant la fonction « vision ».

1.4 La fonction visuelle

90 % de notre environnement est perçu grâce au sens de la vision et plus particulièrement par notre œil, plus exactement notre « organe visuel » qui comprend l'œil, le nerf optique et les parties du cerveau associées.

La fonction visuelle permet d'acquérir des informations sur le degré de luminosité et sur la couleur. Un œil tel que celui décrit en figure 5 est dit « impressionné » par un rayonnement électromagnétique appelé par les physiologistes « stimulus ». Il en résulte une sensation et une perception. En effet, l'œil humain ressent l'intensité du stimulus qui peut être plus ou moins forte. Mais cet organe récepteur perçoit également la couleur liée au stimulus.

La fonction visuelle s'avère très complexe dans la mesure où elle englobe beaucoup plus de notions que la lumière, notamment les dimensions, les formes et les mouvements de tout ce qui peut se trouver dans notre champ de vision. C'est l'ensemble de toutes ces interactions qui permettent de « voir », c'est-à-dire, utiliser un photorécepteur apte à détecter, localiser et identifier un objet éclairé par une source de lumière traiter et transmettre cette information jusqu'au cerveau.

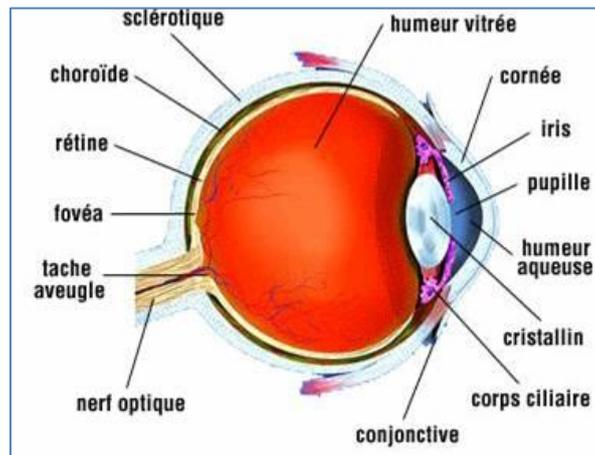


Figure 4 : Coupe de l'œil [22]

Si nous considérons en détail la composition de l'œil humain, il est composé d'un cristallin agissant comme une lentille à focale variable, d'une pupille, commandée par l'iris qui joue le rôle de diaphragme. Deux milieux réfringents remplissent l'œil, le corps vitré entre le cristallin et la rétine et l'humeur aqueuse entre la cornée et le cristallin. La rétine tapissant le fond de l'œil constitue l'élément photosensible permettant d'assurer la fonction « voir ».

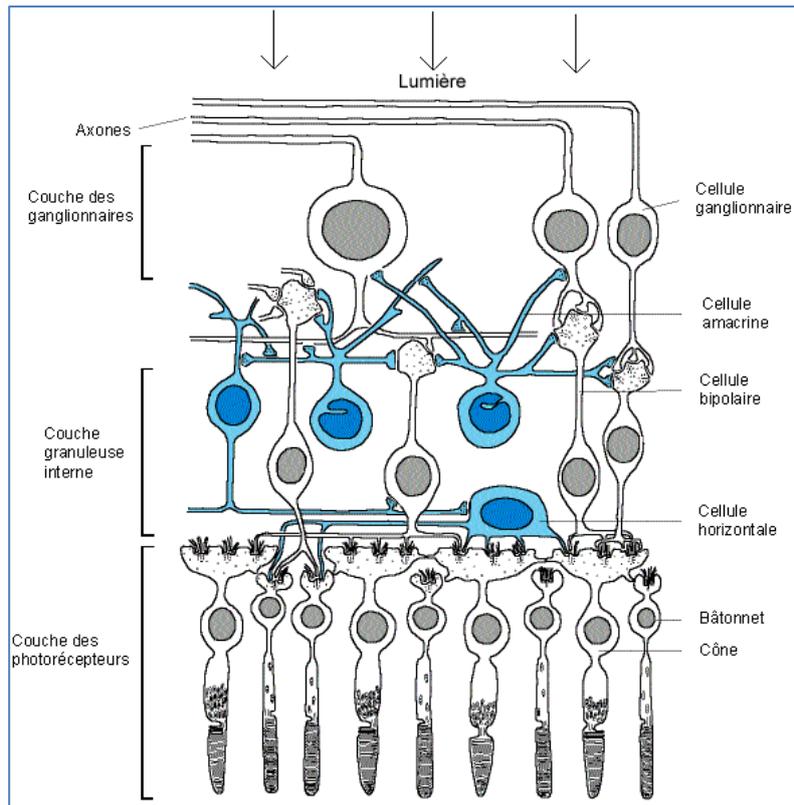


Figure 5 : Structure de la rétine [23]

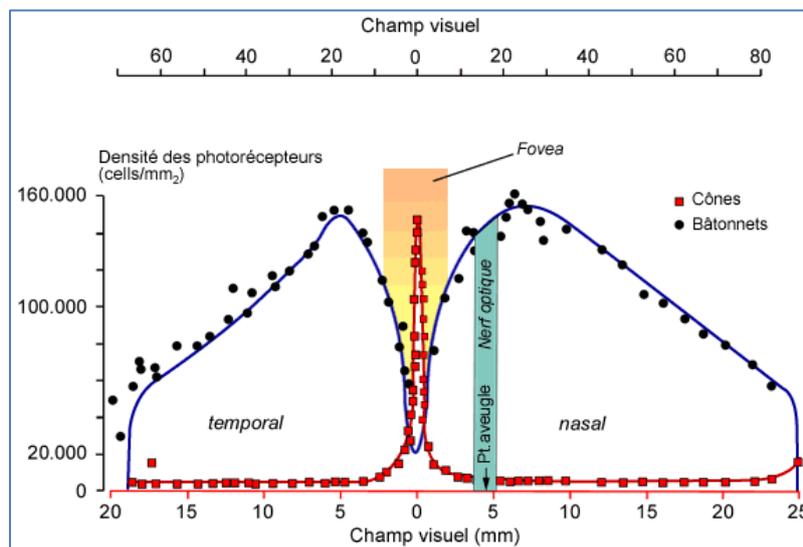


Figure 6 : Courbe de densité des photorécepteurs [24]

Une multitude de connexions nerveuses placées dans l'œil permet de transmettre l'information. La rétine est constituée de plusieurs types de cellules comme illustré en figure 5 mais seuls deux types sont réceptrices parmi lesquelles les cônes et les bâtonnets. Ces derniers doivent leur nom à leur forme approximative. Les cônes occupent la partie centrale de la fovéa (la zone centrale de la macula, la zone de la rétine où la vision des détails est la plus précise) très regroupée.

En s'éloignant du point fovéal, les bâtonnets sont de plus en plus nombreux comme décrits en figure 6. Au total, 110 à 115 millions de bâtonnets occupent l'œil contre 6,5 millions de cônes.

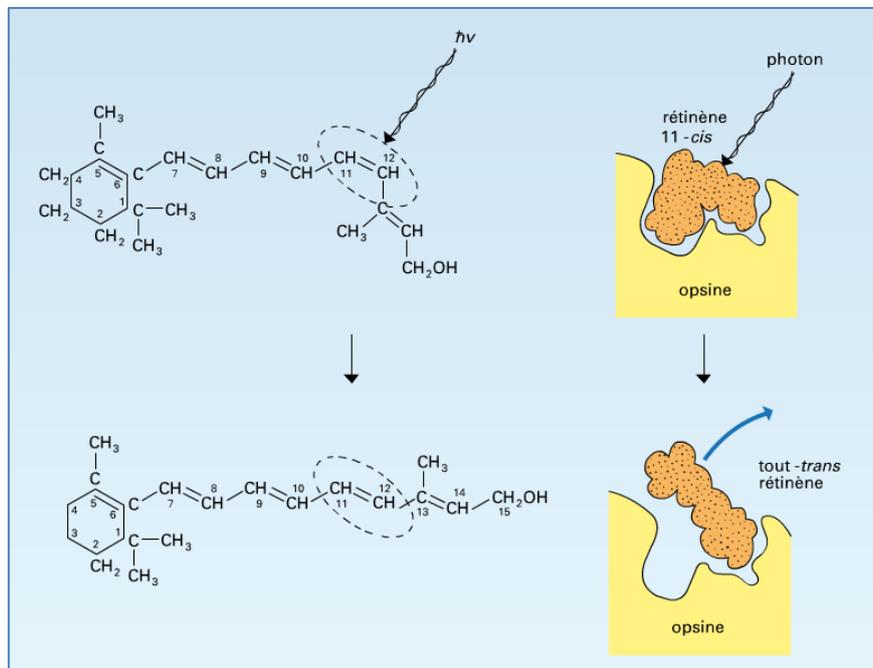


Figure 7 : Principe de détection de la lumière par un œil humain [25]

En pénétrant dans l'œil, la lumière a une action de type physico-chimique au sein de la rétine comme l'illustre la figure 7. Selon les conditions (de jour, de nuit, lumière blanche ou colorée), les pigments sensibles au rayonnement réagissent. Le processus de vision [26] est initié avec l'absorption de photons par un pigment photosensible appelé opsine. Dans le cas des bâtonnets, il s'agit d'une protéine appelée rhodopsine, et dans le cas des cônes, des iodopsines. Une molécule dérivée de la vitamine A appelée rétine (ou rétinol) est attachée au milieu du septième domaine transmembranaire de la rhodopsine. Plus précisément, il s'agit de la forme « 11-cis » du rétine qui, lorsqu'elle absorbe la lumière, subit un changement de conformation vers la forme « tout-trans ». C'est ce changement de forme, appelé aussi isomérisation, qui fait passer la rhodopsine à sa forme active, la metarhodopsine II. Chacun de ces derniers active autour d'une centaine de protéines G, et chaque molécule de phosphodiesterase va permettre l'hydrolyse d'environ un millier de molécules de GMPc en GMP. C'est ce phénomène d'amplification qui permet aux bâtonnets de détecter la présence de chaque photon lumineux. Nous n'allons pas plus loin dans la description de notre organe sensoriel de vision étant donné le changement de domaine scientifique allant plus vers les neurosciences et la base de connaissances nécessaires pour cela. D'autre part, comme les travaux se focalisent sur la création de luminaires artificiels de qualité lumineuse équivalente à l'existant et de meilleure efficacité, nous laissons au lecteur curieux le soin de se référer à d'autres ouvrages spécialisés comme [40].

1.5 Différentes définitions servant à qualifier un flux lumineux

Pour étudier la lumière et comment nous la ressentons, il nous a semblé important de rappeler les principales grandeurs physiques que nous avons utilisées. Nous sommes partis d'une base de comparaison communément admise dans la communauté des physiciens.

1.5.1 La notion de spectre lumineux

Si nous reprenons les aspects théoriques de la lumière, une source de lumière est composée de photons qui rayonnent à différents niveaux énergétiques comme le montre l'exemple du spectre du soleil (figure 8 b) reçu au niveau du sol.

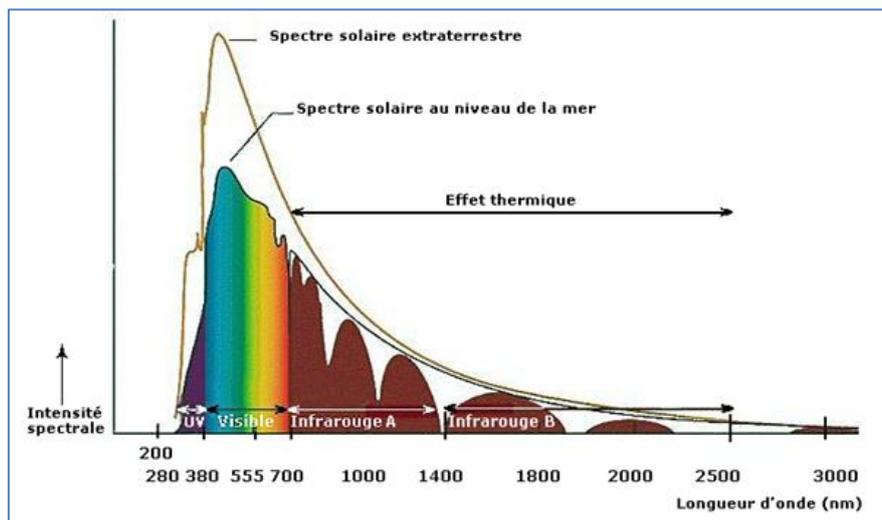


Figure 8a : Spectre de la lumière solaire [27]

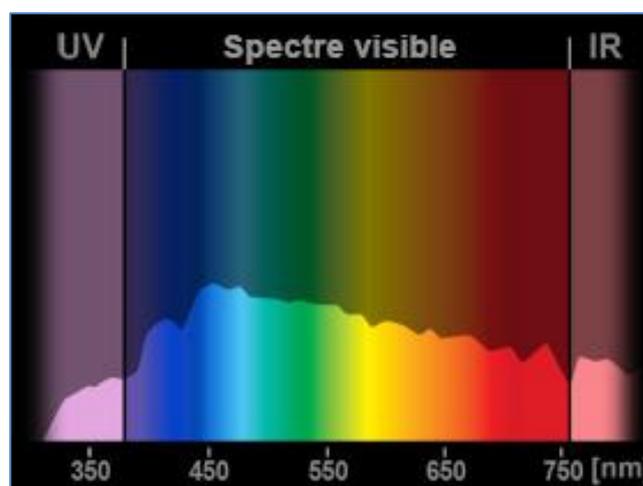


Figure 8 b : Spectre typique de la lumière naturelle reçue au sol [28]

En pénétrant dans l'œil, ils « déposent » leur énergie sur la rétine. Cette énergie est d'autant plus importante qu'il y a une grande quantité de photons recueillie par la rétine dans un temps donné. En d'autres termes, plus la densité de photons est importante et plus la puissance radiométrique reçue par l'œil est importante. En outre, chaque photon peut aussi être observé selon sa longueur d'onde. L'œil a la possibilité de discriminer les photons de différentes longueurs d'onde et de les identifier sous la forme de couleur. Ainsi, un ensemble de photons reçus par l'œil ou plus généralement un support photosensible fournit deux types d'informations indépendantes pour caractériser le rayonnement résultant :

- la puissance ou le flux énergétique qui traduit une sensation de luminosité,
- la longueur d'onde qui s'interprète sous forme d'une couleur.

Pour chaque longueur d'onde, il est ainsi possible de représenter quelle est la puissance véhiculée. Cette puissance par unité de longueur d'onde s'appelle le « **flux spectral énergétique** » et s'exprime en watts par nanomètre ($W.nm^{-1}$). Le graphique correspondant s'appelle le « **spectre lumineux** » ou encore **spectre d'émission**.

À chaque source émettrice, il existe un spectre unique associé comme l'illustrent les divers exemples des figures 9a à 9d.

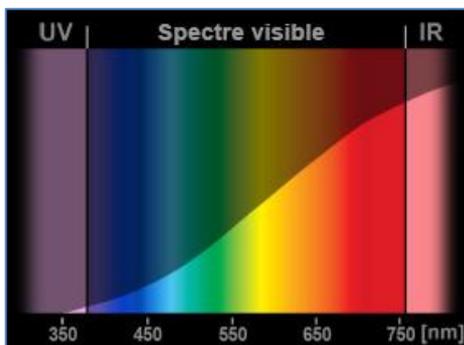


Figure 9a : Spectre typique d'une lampe incandescente ou issue d'une bougie [28]

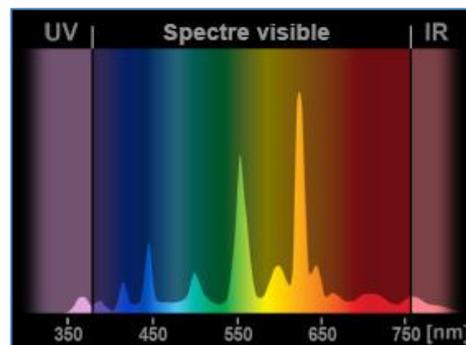


Figure 9b : Spectre typique d'une lampe fluorescente [28]

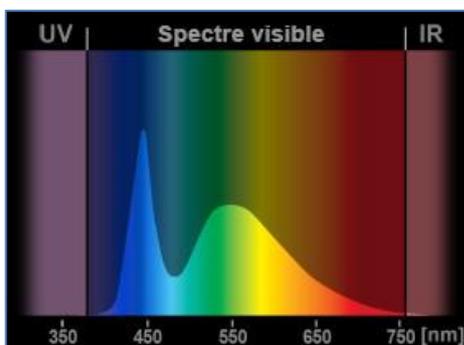


Figure 9c : Spectre typique d'une LED froide [28]

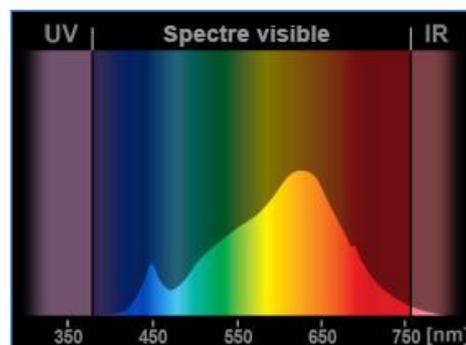


Figure 9d : Spectre typique d'une LED chaude [28]

Ainsi, nous pouvons constater que la source à incandescence a des similitudes avec le spectre émis par le soleil reçu à la surface terrestre. Nous pouvons remarquer que ce dernier est dit « continu », avec très peu d'ultra-violets, une proportion de rouge conséquente et une très grande part d'infrarouges. Les lampes fluocompactes présentent un spectre dit « de raie » non homogène avec des pics à 405 nm, 436 nm, 546 nm et 615 nm caractéristiques du mercure. Le spectre d'une LED peut être différent selon la technologie mise en œuvre (matériaux utilisés et géométrie du composant choisie). Par exemple, nous pouvons voir des différences de comportement entre une LED chaude ou une LED froide dont le spectre est respectivement en Figures 9c et 9d. Cependant, un point commun est à noter, le pic à 440 nm dans le bleu. L'intensité de ce pic détermine la notion de température de couleur que nous définirons dans le prochain chapitre. De chaque spectre lumineux, nous pouvons extraire son flux visible, ses coordonnées chromatiques ou sa température de couleur. C'est l'ensemble de ces éléments qui ont été pris en compte dans les travaux de recherche pour caractériser le rayonnement des sources lumineuses créées à base d'association de LEDs.

1.5.2 La notion de flux spectral énergétique et flux lumineux

Comme vu précédemment, les spectres peuvent être très variés tant par le nombre de longueurs d'onde transportant de l'énergie que par le niveau énergétique de chaque longueur d'onde. Si la source n'émet qu'une longueur d'onde, elle est dite monochromatique. Cependant, il est impossible dans l'état actuel de la technologie d'avoir ce genre de spectre. Il s'agit avant tout d'une hypothèse utilisée en laboratoire pour effectuer des tests ou pour des besoins pédagogiques. Les sources réelles présentent au minimum un spectre de plusieurs dizaines de nanomètres pour constituer les lasers ou des spectres continus pour les sources incandescentes.

Le flux énergétique d'une source s'obtient en faisant la somme des contributions pour chaque longueur d'onde.

$$\Phi = \int_{380}^{780} f(\lambda) d\lambda \quad (1,4)$$

Avec Φ : le flux énergétique (W)
 f : le flux spectral énergétique (W/nm)
 λ : la longueur d'onde (nm)

Lorsqu'une lampe du commerce rayonne, elle peut émettre dans une large gamme spectrale au-delà du visible comme pour le rayonnement solaire qui est essentiellement constitué de rayonnements dans l'IR. Par contre, comme seule la contribution qui peut être détectée par l'œil présente un intérêt, il en découle des notions de rendement lumineux pour qualifier la qualité lumineuse émise.

C'est en 1924 sur la base des travaux de laboratoires spécialistes que la Communauté Internationale de l'Éclairage (CIE) qui a défini une fonction appelée $V(\lambda)$. Cette fonction permet de pondérer chaque longueur d'onde reçue par rapport à la sensibilité moyenne d'un œil humain et d'y attribuer une efficacité lumineuse relative. Le comité international des poids et mesure a alors attribué l'unité au flux lumineux spectral nommé le lumen par watt (soit lm/W). Pour l'efficacité lumineuse relative, elle est définie par la division de deux flux, donc sans unité.

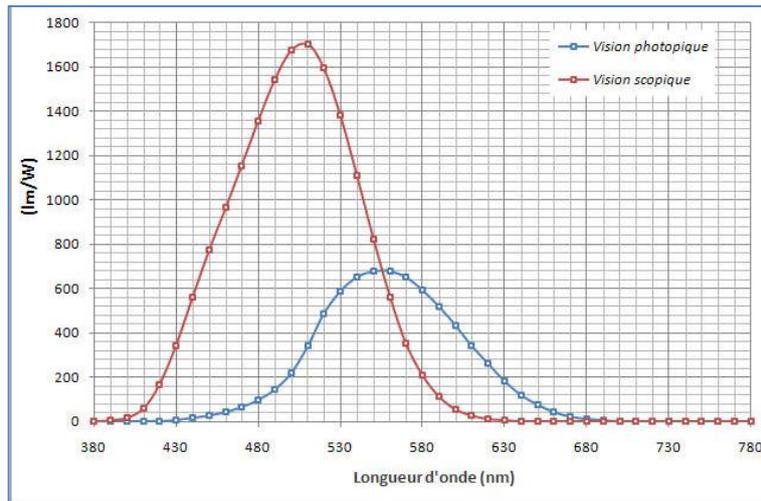


Figure 10 : Fonctions d'efficacité lumineuses spectrales photopique et scotopique en fonction des longueurs d'onde [29]

Plus généralement, l'efficacité relative permet d'exprimer la relation qu'il y a entre le flux spectral d'une source de lumière et le flux photométrique pouvant être reçu par l'œil. En moyenne, l'œil humain détecte un large intervalle de radiation en vision de jour et sa sensibilité est maximale pour les radiations autour de 555 nm (correspondant à 683 lm/W), soit principalement les couleurs jaune-vert. Le bleu et le rouge ne sont pas les couleurs qui sont les mieux perçues à l'œil. En vision de nuit, la sensibilité de l'œil est quasi multipliée par 3 (1705 lm/W) mais autour de 505 nm.

λ (nm)	$V(\lambda)$										
		400	0,000 039	500	0,323 00	600	0,631 00	700	0,004 102	800	0,000 004
		410	0,001 210	510	0,503 00	610	0,503 00	710	0,002 091	810	0,000 002
		420	0,004 00	520	0,710 00	620	0,381 00	720	0,001 047	820	0,000 001
		430	0,011 60	530	0,862 00	630	0,265 00	730	0,000 520	830	0,000 000
		440	0,023 00	540	0,954 00	640	0,175 00	740	0,000 249		
		450	0,038 00	550	0,994 95	650	0,107 00	750	0,000 120		
360	0,000 004	460	0,060 00	560	0,995 00	660	0,061 00	760	0,000 060		
370	0,000 012	470	0,090 98	570	0,952 00	670	0,032 00	770	0,000 030		
380	0,000 039	480	0,139 02	580	0,870 00	680	0,017 00	780	0,000 015		
390	0,000 120	490	0,208 02	590	0,757 00	690	0,008 21	790	0,000 007		

Tableau 2 : Efficacité lumineuse spectrale relative $V(\lambda)$ en vision photopique [30]

Pour toutes les sources de lumière, la relation qui lie le flux spectral énergétique au flux visible est la suivante :

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (1,5)$$

Avec Φ_v : le flux visible (lm)
 f : le flux spectral énergétique (W/nm)
 λ : la longueur d'onde (nm)
 K_m : une constante égale à 683 (lm/W)
 $V(\lambda)$: la fonction de sensibilité de l'œil (sans unité)

1.5.3 Efficacité des rayonnements et des sources

L'efficacité d'un rayonnement est le rapport du flux lumineux sur le flux énergétique correspondant et s'exprime en lm/W. L'efficacité lumineuse notée $K(\lambda)$ d'une radiation est telle que :

$$K(\lambda) = K_m * V(\lambda) = 683 V(\lambda) \quad (1,6)$$

Pour un rayonnement complexe, le calcul de $K(\lambda)$ devient :

$$K = \frac{K_m \int S(\lambda) V(\lambda) d(\lambda)}{\int S(\lambda) d(\lambda)} \quad (1,7)$$

Avec $S(\lambda)$, qui définit la répartition relative spectrale

Le calcul du coefficient K a son importance lors du calcul du flux visible. De plus, lorsqu'il est calculé avec les équations de Planck pour un corps noir à 6 500 K. La valeur de K passe par un maximum à 85 lm/W. En limitant le calcul de K au visible, la valeur de K monte à 200 lm/W. En prenant l'exemple d'une lampe à vapeur de sodium monochromatique, le K est de 427 lm/W.

1.5.4 Colorimétrie et température de couleur

La science des couleurs est un domaine extrêmement vaste. Comme la lumière, elle a ses spécialistes, ses points de vue et son historique. Pour un physicien, la couleur n'est que le résultat de la décomposition de la lumière blanche. Pour lui, la couleur est donc synonyme de lumière colorée. Cette lumière colorée est définie par sa longueur d'onde. Pour un physiologiste qui étudie les fonctions organiques de la vision, la couleur est une sensation colorée. Pour un peintre, un teinturier, un imprimeur, la couleur est la matière colorée utilisée pour produire la colorisation. En fonction de son utilisation (photographie, télévision, signalisation, colorant en industrie,...), elle peut être susceptible de développement particulier. Par exemple, dans le cas d'un éclairagiste, l'attention sera portée sur la couleur des sources, de l'influence de la lumière sur la couleur des objets ou des surfaces éclairées.

La colorimétrie fondamentale a pris naissance au milieu du XIXe siècle grâce à Helmholtz et Maxwell. Cela a conduit à l'établissement de systèmes mathématiques permettant une représentation chiffrée des couleurs dissociées du jugement subjectif de chaque individu ayant souvent sa propre perception. Par contre, définir une couleur n'est pas si simple. Dans le cas d'une lumière monochromatique, une seule variable suffit : la longueur d'onde de la radiation considérée. La luminance d'un faisceau et sa longueur d'onde suffisent à le caractériser. Dans le cas d'une lumière plus complexe, à l'instar de l'œil humain apte à intégrer des informations de plusieurs couleurs type rouge-bleu-vert, il est nécessaire de tenir compte d'une décomposition qui sera à son tour quantifiée pour chaque type de lumière monochromatique des informations de luminance et de longueur d'onde.

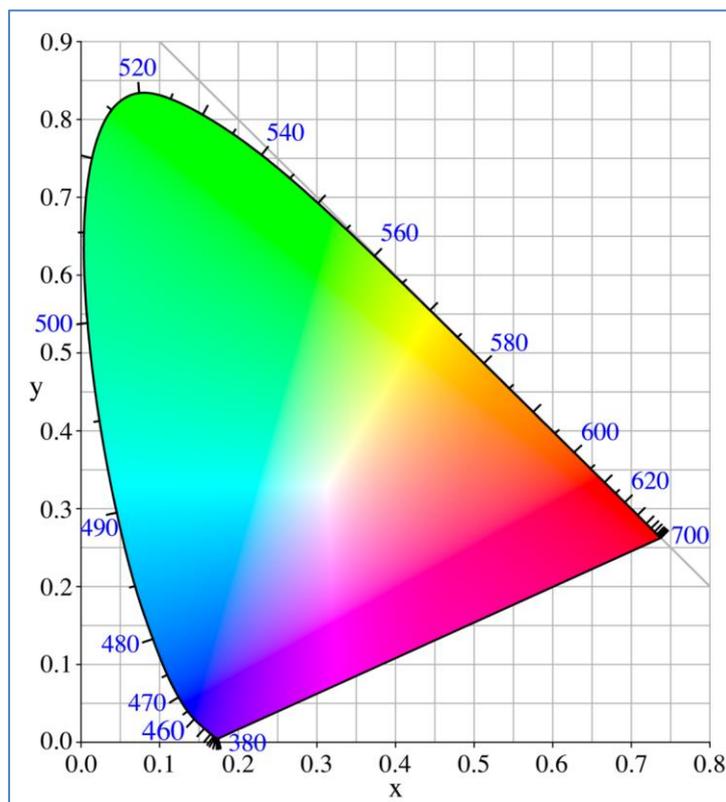


Figure 11 : Triangle des couleurs [31]

En 1931, pour aider à référencer les couleurs, un espace des couleurs a été édité par la CIE. Il est représenté sous la forme d'un triangle et pour chaque point de couleur, il y a un système de coordonnées repérées en x et y qui permettra ensuite de qualifier la source de lumière considérée. Le contour de ce triangle des couleurs représente toutes les longueurs d'onde du spectre visible. Cette dernière affirmation comporte une exception au niveau de la partie inférieure du triangle qui est appelée la ligne des pourpres (Alychne) qui n'existe pas dans notre spectre visuel.

Nous pouvons remarquer qu'au centre de ce référentiel se trouve une zone de blanc assez large représentant la lumière blanche composée de plusieurs types de pourcentage de faisceaux monochromatiques. Bien que dans les faits, il existe une infinité de possibilités, nous distinguerons globalement 2 tendances de composition de la lumière blanche :

Chapitre 1 : La lumière, les moyens de la produire, de la mesurer

- Le blanc dit chaud, composé de longueurs d'onde jaune-rouge (vers la droite du diagramme) qui peut être utilisé pour créer des lumières d'ambiances confortables et feutrées,
- Le blanc dit froid, plutôt composé de bleu vert (vers la gauche du diagramme) qui peut servir à stimuler et est plus approprié dans les zones de travail.

Ces notions sont anciennes en lien direct avec notre environnement terrestre et l'évolution de notre organe sensoriel de vision comme nous l'avons succinctement décrit précédemment. Ainsi les sensations visuelles sont fortement ancrées culturellement, car depuis la nuit de temps, l'être humain est éclairé par des sources de lumière dont la teinte varie entre le blanc chaud (le feu) et le blanc froid (un ciel nuageux), les premières sources de lumière artificielles utilisées par l'homme étant liées aux flammes et au soleil. S'ajoute plus récemment, l'éclairage artificiel avec l'aide d'un filament d'ampoule incandescente. Ces trois types de source présentent la particularité d'avoir un rayonnement proche de l'objet théorique appelé corps noir. Ce dernier définit le rapport entre le rayonnement émis par un objet et sa température. Cette propriété nous permet alors de définir un spectre lumineux en fonction d'une température [32].

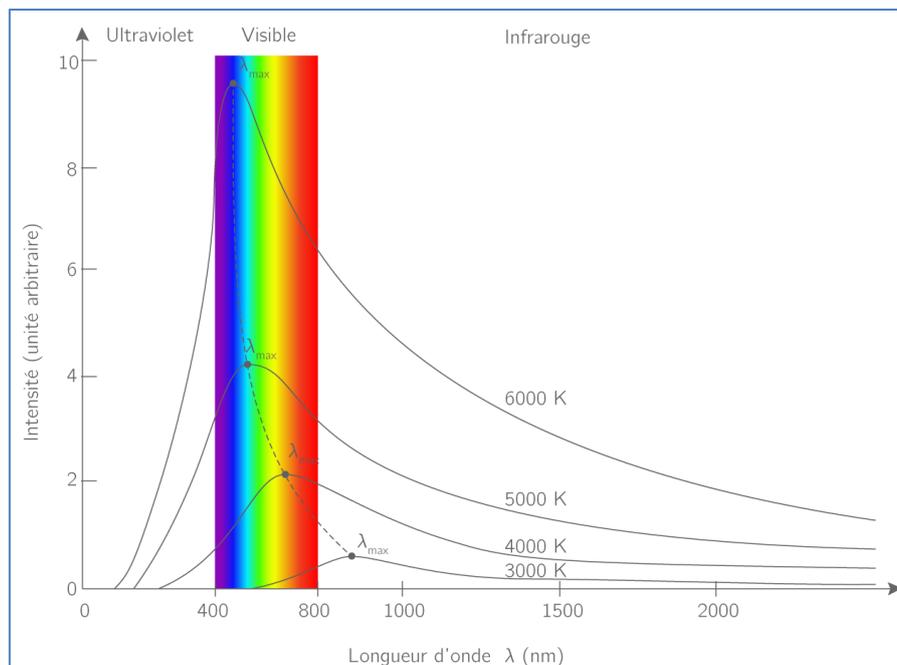


Figure 12 : Description de la théorie des corps noirs [33]

La théorie des corps noirs prend ses origines dans une autre théorie : celle des quanta. Elle fut mise en avant la première fois par M. Planck [34] en 1900 puis complétée ensuite par un certain nombre de chercheurs, dont A. Einstein, entre 1905 et 1924. Le point de départ pour cette théorie est la considération d'une enceinte isotherme avec la conséquence que les parois de cette enceinte sont supposées totalement absorbantes. Alors, tout rayonnement initialement à l'extérieur de cette dernière qui pénètre par l'intermédiaire du trou vers l'intérieur de l'enceinte subit de multiples réflexions, émissions et absorptions par les parois du four jusqu'à atteindre une thermalisation complète. Ce qui signifie que l'enceinte et son contenu de rayonnement atteignent un équilibre

thermique. Réciproquement, une partie infime du rayonnement thermique à l'intérieur du four peut s'échapper définitivement de celui-ci, permettant d'ailleurs son étude expérimentale, notamment sa répartition énergétique spectrale, c'est-à-dire la densité d'énergie volumique présente par intervalle élémentaire de fréquence. La thermodynamique permet de montrer que les caractéristiques de ce rayonnement ne dépendent pas de la nature du matériau dont sont constituées les parois de l'enceinte, mais uniquement de sa température.

À partir de cet objet théorique, M. Planck propose une formule donnant, pour chaque température et pour chaque longueur d'onde, l'exitance spectrale du corps noir :

$$M_{(\lambda,T)} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (1,8)$$

Avec : T : la température en kelvin

λ : la longueur d'onde en mètre

C_1 : une constante égale à $37\,415 \cdot 10^{-16}$

C_2 : une constante égale à $14\,387 \cdot 10^{-2}$

Ainsi, à chaque couleur de coordonnées x et y dans le diagramme de chromaticité, une température donnée peut être associée comme le montre le diagramme détaillé de la figure 13.

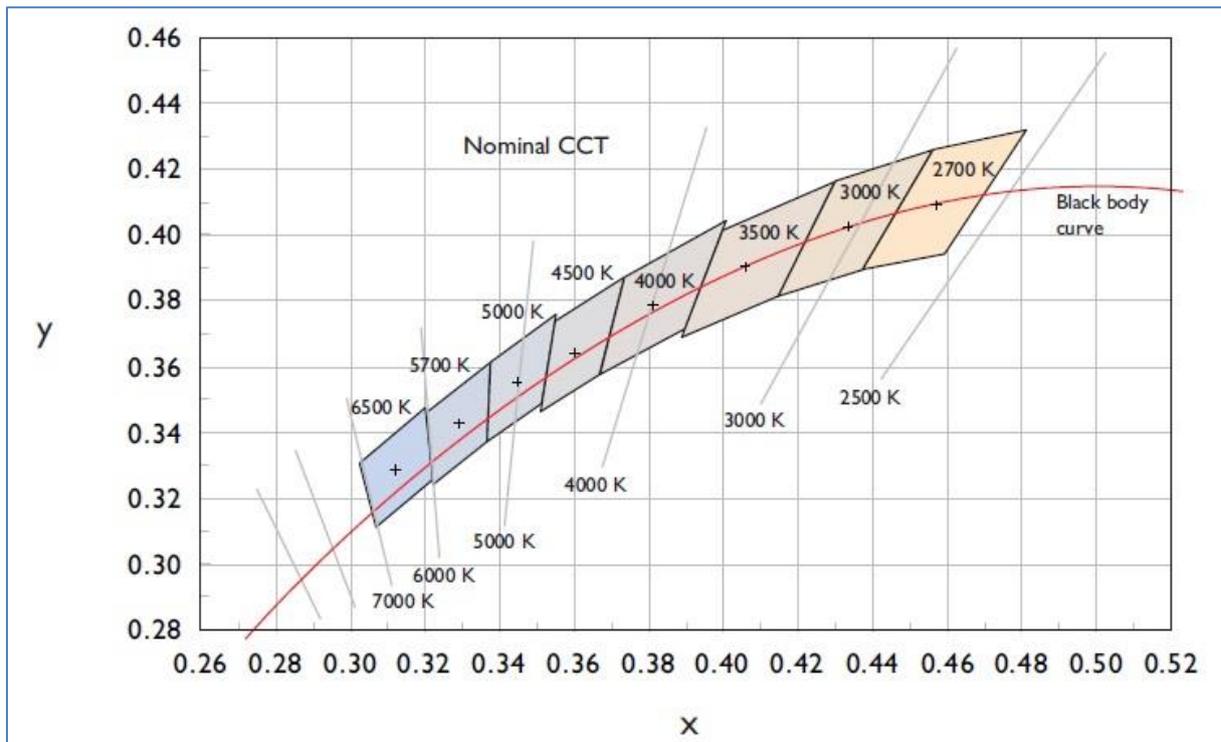


Figure 13 : Température de couleur proximale [35]

Une autre manière de se représenter le concept est de prendre un matériau et de le chauffer. À partir d'une certaine température, il devient incandescent et illumine de manière rouge orangé (blanc

chaud), ensuite, il devient jaune et vire doucement vers le blanc. Avant de finir vers le blanc bleuté qui signifie de très hautes températures. C'est de cette manière que se définit la température de couleur. La figure 13 illustre ce principe, à « faible » température (1 000-1 500 K), la couleur est dans le rouge. À 2 500-2 800 K, la couleur est proche du jaune orangé. On évalue à 9 000 K la température pour un arc électrique. Bien que définie comme la température de couleur, il est préférable de préciser température de couleur proximale, car cette notion de chaud ou de froid ne s'applique qu'au blanc. De même, pour éviter toute erreur de mesure, il est impératif de rester proche de la courbe des corps noirs.

1.6 Les sources de lumière artificielles

Avant d'aborder le sujet proprement dit de ces travaux de recherche sur les luminaires composés de semi-conducteurs à base de LEDs, il nous a semblé nécessaire de faire une synthèse des luminaires ou moyens d'éclairage existants afin d'établir ensuite des comparaisons de qualité et performances.

Depuis la nuit des temps, les hommes ont eu recours à plusieurs techniques pour générer artificiellement la lumière lorsque les sources naturelles étaient absentes ou défailantes. Aux prémices, les sources de lumière utilisaient la combustion sous forme de chandelles ou bougies, de lampes à huile ou à pétrole.

De nos jours, même si ces systèmes sont encore utilisés dans beaucoup de parties du monde, la majorité des systèmes d'éclairage artificiels utilisent l'énergie électrique pour générer de la lumière la nuit en extérieur ou dans des bâtiments selon les besoins. La production de lumière par incandescence est apparue en 1879 avec la lampe à filament inventée par T. Edison et gagna rapidement de la popularité en dépit d'une très faible efficacité. Seulement 7 % de l'énergie électrique nécessaire est convertie en lumière. Son faible coût de production en fait une solution encore abondamment utilisée aujourd'hui. Une autre méthode de production de lumière utilise le phénomène physique de transition énergétique dans un gaz appelé « plasma » [36] [37] [38]. Les appareils utilisant cette approche sont par exemple, les sources fluorescentes, les sources à sodium, les sources à vapeur de mercure ou les sources à iodures métalliques que nous pouvons trouver dans les vieux luminaires pour l'éclairage public [39].

Une approche équivalente de transition d'énergie mise en œuvre dans un solide à base de matériaux semi-conducteurs existe également. Il s'agit de l'éclairage à l'état solide sur lequel repose les LED ou les OLED. Dans ce paragraphe, nous rappelons les divers types de luminaires créés au cours du temps en fonction des principes physiques utilisés.

1.6.1 Rappels des deux phénomènes physiques permettant la création de la lumière

Bien qu'il y ait un certain nombre de lampes différentes actuellement, la méthode de fabrication de la lumière à partir d'une source électrique peut se décomposer en 2 grandes parties comme illustrées en figure 14.

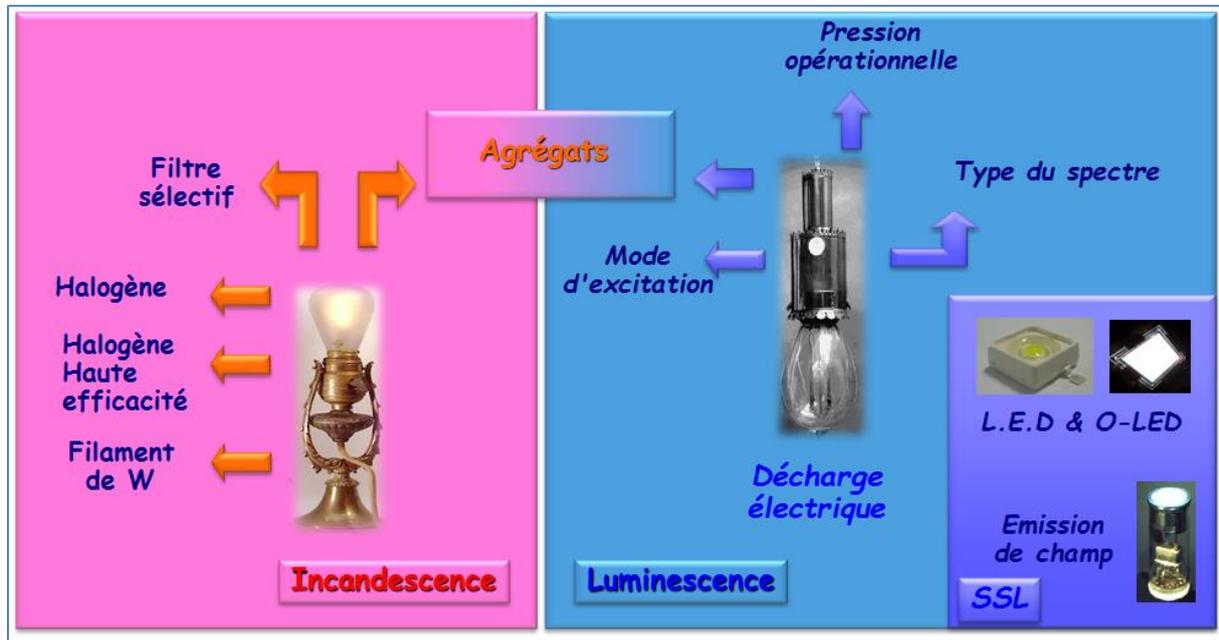


Figure 14 : Les méthodes de production de lumière [40]

La lumière peut ainsi être produite soit par incandescence, soit par luminescence. Cependant, à partir de ces deux méthodes, un grand nombre de technologies différentes utilisant ces deux phénomènes physiques existe.

La thermorayonnance

L'émission de lumière par combustion ou incandescence est la plus proche de celle émise dans la nature. Le soleil, les lampes à flamme ou lampes à incandescence en sont de bons exemples. Depuis plus de deux siècles, il s'agit de la méthode la plus utilisée pour créer de la lumière artificielle. Le principe de l'incandescence est un phénomène physique qui se manifeste par une émission de lumière due à la température d'un corps chauffé comme nous avons montré précédemment dans l'établissement du diagramme couleur-température. En effet, si cette température est suffisamment élevée, le corps émet des rayonnements électromagnétiques dans le spectre visible. La qualité de la lumière émise dépend alors directement de la température du corps chauffé. Un corps moyennement chaud (environ 1 600 °C) émettra une lumière rouge-orangé tandis qu'un corps très chaud (environ 5 000 °C) émettra une lumière très blanche, pouvant même virer vers un blanc bleuté pour des températures extrêmes (8 000 – 9 000 °C). Cette lumière possèdera un spectre qui sera continu, en grande partie d'infrarouges (ce qui explique le faible rendement de ce genre de source).

La luminescence

L'autre grande méthode de production est la luminescence qui émet une lumière dite « froide » en opposition avec l'incandescence qui émet une lumière « chaude ». La lumière émise par luminescence résulte d'interactions entre particules électriquement chargées. Dans les cas les plus fréquents, ce sont des transitions électroniques ayant lieu dans des atomes, des molécules ou des cristaux qui provoquent l'émission de photons. L'énergie libérée sous forme de lumière lors de la transition peut être initialement fournie sous forme électrique, chimique, mécanique ou lumineuse. Il est possible de distinguer différents types de luminescence selon le mode d'excitation initial : l'électroluminescence, la photoluminescence, la fluorescence, la phosphorescence...

1.6.2 Les différentes sources incandescentes

La chandelle

La chandelle fut le premier moyen pour s'éclairer et le seul qui n'utilise pas l'électricité pour produire de la lumière. Elle est formée d'une mèche entourée de matière combustible solide. Elle a été progressivement remplacée par la bougie, qui ne s'en distingue que par la composition. Les chandelles ont aussi servi d'étalon pour une notion encore fondamentale en photométrie : l'intensité lumineuse.



Figure 15 : Chandelle en silicone [41]

La lampe à incandescence

Cette technologie est la première à avoir été utilisée avec de l'électricité pour émettre de la lumière. Bien que les différentes parties la constituant aient évoluées (filament, support, type de verre, gaz interne), la géométrie et le principe sont restés les mêmes. C'est-à-dire qu'un filament en tungstène est enfermé dans une ampoule dans lequel se trouve un gaz noble (krypton, argon ou vide). Le passage du courant entraîne une montée en température du filament. Ce dernier chauffe et émet de la lumière.

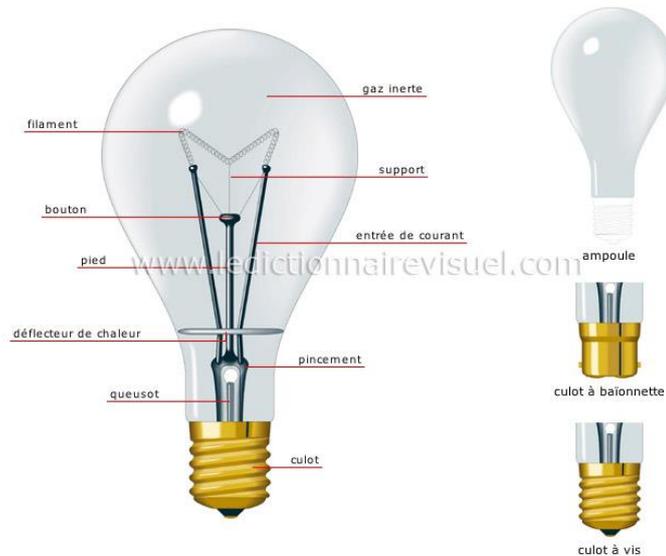


Figure 16 : Une ampoule à incandescence [42]

La lampe à halogène

La lampe à halogène produit la lumière comme une source à incandescence classique, c'est-à-dire en portant à incandescence un filament de tungstène. Des gaz halogénés (iode et brome) à haute pression ont été introduits dans une ampoule en verre de quartz supportant les hautes températures. Cela permet d'augmenter légèrement l'efficacité et la durée de vie du filament.



Figure 17 : Lampe à halogène [43]

Son fonctionnement est le suivant. Après avoir mis sous tension de la source, il y a échauffement qui crée de la lumière. En outre, le tungstène s'évapore dans l'ampoule et la haute température entraîne une combinaison tungstène-halogène qui se déplace dans l'ampoule. En refroidissement, il y a séparation du tungstène-halogène qui s'était combiné, le gaz halogène reste dans l'ampoule et le tungstène retourne alors sur le filament.

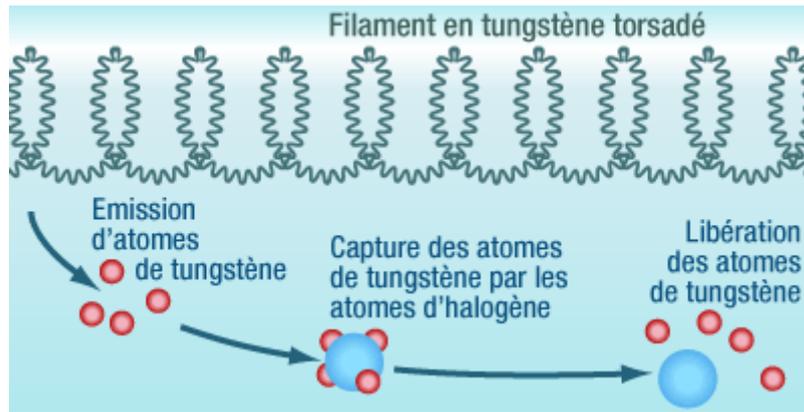


Figure 18 : Description du fonctionnement [44]

1.7 Sources lumineuses luminescentes

La lampe fluorescente

Les lampes fluorescentes sont généralement appelées « tubes néon » pour les tubes fluorescents linéaires ou encore « lampes basse consommation » pour les modèles plus compacts, ces deux lampes fonctionnent sur le même principe depuis leur mise au point vers 1930. Deux électrodes de chaque côté du tube vont créer une décharge électrique ionisant un gaz contenu dans le tube (constitué en partie de mercure et de gaz neutre), lui-même recouvert sur sa surface interne d'une poudre fluorescente. Les atomes de mercure (entre autres) excités par cette ionisation produisent une lumière dans les courtes longueurs d'onde (ultraviolets) qui va exciter les particules de phosphore, lesquelles émettent à leur tour de la lumière qui cette fois est blanche (c'est le principe de la fluorescence).

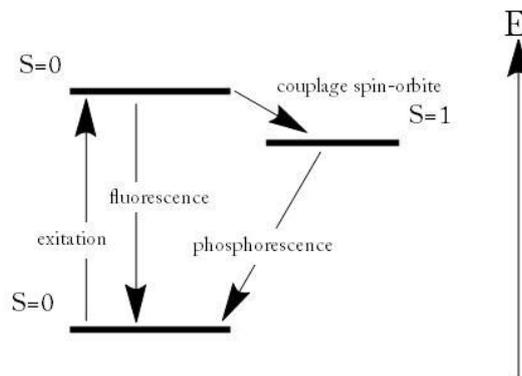


Figure 19 : Principe de la fluorescence et de la phosphorescence [45]

Le tube fluorescent

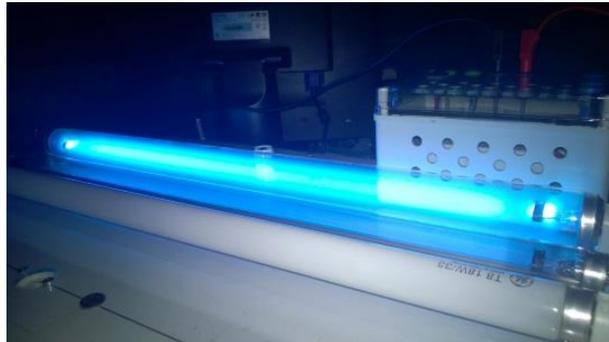


Figure 20 : Tube fluorescent sans poudre en fonctionnement

Chaque lampe fluorescente est toujours accompagnée de deux auxiliaires électriques : le starter et le ballast. Le ballast va permettre la surtension nécessaire à l'amorçage du tube et il va ensuite permettre de limiter le courant dans l'arc lorsque le tube sera amorcé. Le starter est un petit tube rempli d'un gaz et muni d'un bilame, il va permettre le préchauffage des électrodes du tube et l'amorçage de la décharge.

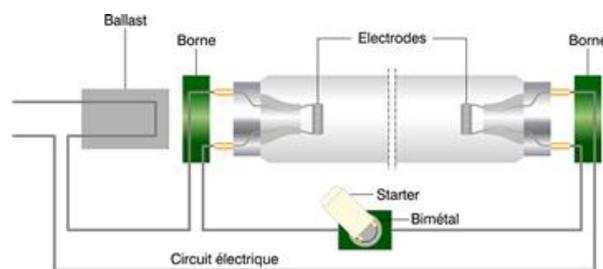


Figure 21 : Schéma de montage d'un luminaire à tube fluorescent [46]

La mise en fonctionnement se décrit ainsi. La mise sous tension du tube fluorescent se fait avec un interrupteur (non représenté sur la figure 21). Le starter, composé de 2 bilames est soumis à la tension 230 Vac. Cela entraîne un claquage de l'air, le starter s'amorce. Le courant passe dans le ballast, les électrodes (entraînant un préchauffage de ces dernières) et dans le starter. Le passage du courant dans le starter entraîne une montée en température qui va déformer les bilames. En se déformant, cela va ouvrir le circuit créant un très fort différentiel de courant. Le ballast constitué en majorité d'inductances va tenter de s'opposer au changement brusque de courant. La conséquence est une surtension de plusieurs dizaines de kilovolts et l'amorçage d'un arc dans le tube fluorescent. Une fois l'arc électrique stabilisé, le ballast va stabiliser la valeur du courant. Le plasma va se former dans le tube et émettre des rayonnements principalement invisibles. Une poudre fluorescente déposée sur la face intérieure du tube va transformer les rayons ultraviolets en lumière par fluorescence.

La source fluocompacte



Figure 22 : Lampe fluocompacte [47]

La lampe fluorescente compacte, appelée également source fluocompacte est une adaptation du tube industriel à un usage domestique. C'est un tube fluorescent qui a été miniaturisé, plié ou encore enroulé et doté d'un culot contenant un ballast électronique.

Elles ont les mêmes avantages et inconvénients que les tubes fluorescents linéaires à la différence près que le tube de la lampe n'est pas interchangeable en cas de rupture. En outre, les efficacités de ces dispositifs sont moindres.

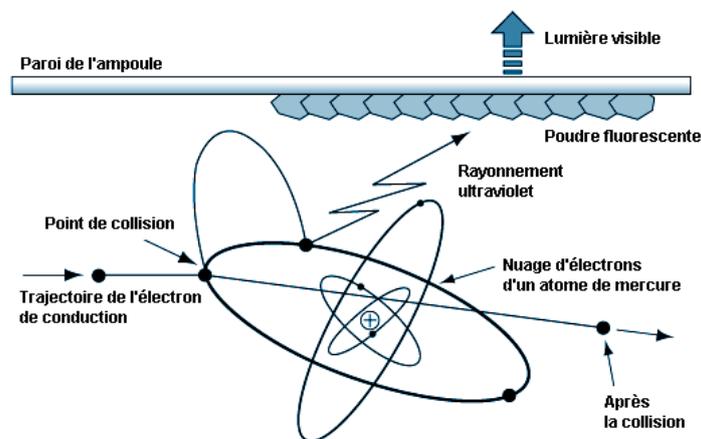


Figure 23 : Émission de lumière avec une décharge [48]

Lampe à vapeur de mercure

Ces sources de lumière ont été très largement utilisées pour l'éclairage public en raison de leur meilleur rendement que les lampes à incandescence et de leur faible coût. Ces dernières contiennent de la vapeur de mercure mélangée à de l'argon. Ce sont des lampes à décharge, elles fonctionnent donc sur le même principe que les lampes fluorescentes.

Pour obtenir l'ionisation du gaz, la tension appliquée aux bornes du tube à décharge doit atteindre une tension suffisamment élevée et appelée « tension d'amorçage », il faut pour cela un amorçeur qui va créer la surtension.

Lorsque l'amorçage est obtenu, le courant augmente rapidement, car le processus d'ionisation tend à se développer de lui-même. Il faut donc réduire la tension pour stabiliser la décharge, un ballast est donc nécessaire.

Dans le cas des lampes à vapeur de mercure haute pression, au moment où la lampe s'allume seul un arc à basse pression se produit et une faible quantité de lumière est émise. La pression augmentant avec la température le mercure se vaporise, un arc à haute pression se forme et l'émission de lumière s'accroît.

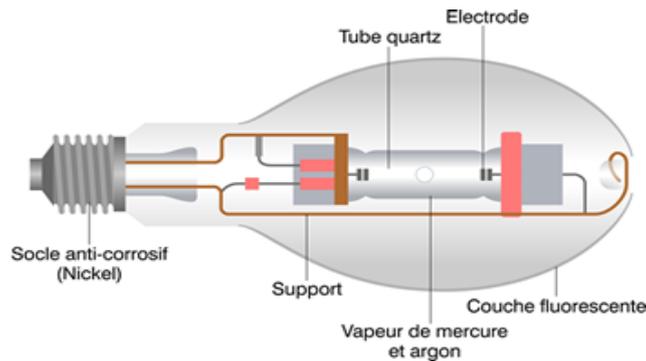


Figure 24 : Lampe à vapeur de mercure [49]

Lampe à vapeur de sodium

Les lampes à vapeur de sodium fonctionnent sur le même principe que les sources à vapeur de mercure, cependant elles ne comportent pas de revêtement fluorescent sur la partie intérieure de l'ampoule. Les auxiliaires électriques associés sont identiques comme pour la source à vapeur de mercure. En revanche, elles ont une durée de vie et une efficacité lumineuse bien supérieure. Elles ont aussi la caractéristique d'avoir des couleurs moins « froides », le spectre lumineux sature au niveau du jaune orangé.

C'est leur bonne efficacité lumineuse qui est la raison du déploiement de ce type de source de lumière en France.

Leur mise en marche se déroule en 2 parties : dans un premier temps, une décharge est amorcée grâce à un mélange de néon et d'argon, cela permet de vaporiser peu à peu le sodium contenu sous forme solide initialement. Au fur et à mesure, la lampe passe doucement d'un aspect rouge à une couleur jaune-orangé (autour de 590 nm).



Figure 25 : Lampe à vapeur de sodium [50]

Lampe à induction

Comme dans les lampes fluorescentes, la lumière est produite par ionisation des atomes de gaz présents dans l'ampoule. Les rayonnements invisibles produits sont ramenés dans le spectre visible grâce à une poudre fluorescente présente sur la face interne de l'ampoule.

Dans une lampe à induction, il n'y a pas d'électrode. L'ionisation des atomes est réalisée par un champ électromagnétique créé par la circulation d'un courant à haute fréquence dans une bobine appelée "antenne". Cette bobine est placée au centre de l'ampoule dans la cavité prévue à cet effet. Le courant à haute fréquence est produit par un générateur extérieur. Celui-ci est directement relié à l'antenne.

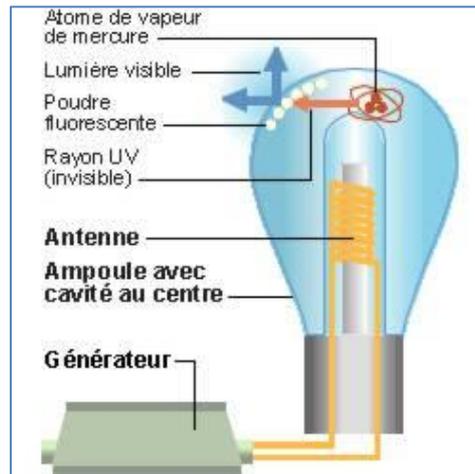


Figure 26 : Lampe à induction [51]

Les lampes à haute pression

Il existe une grande variété de lampe à haute pression parce qu'il est possible d'incorporer différents composés à l'intérieur du brûleur. Initialement, le mercure contenu dans ce genre de lampe présentait une qualité de lumière médiocre. Le fait de rajouter des halogénures métalliques améliorera considérablement la qualité spectrale de la lumière émise mais imposa des températures de fonctionnement plus importantes. À partir de 1960, de nouveaux brûleurs en alumine polycristalline translucide furent mis au point, en conséquence, de nouvelles lampes avec moins de mercure nécessaire à leur bon fonctionnement étaient utilisées.

Diode électroluminescente organique

La première alternative à la LED fut la diode électroluminescente organique (OLED). Elle est très similaire à une LED, sauf qu'une OLED utilise des matériaux organiques pour la production des porteurs positif et négatif. Elle se compose d'une superposition de plusieurs couches semi-conductrices organique (typiquement 100 nm) entre deux électrodes dont l'une est transparente (ITO) au moins.

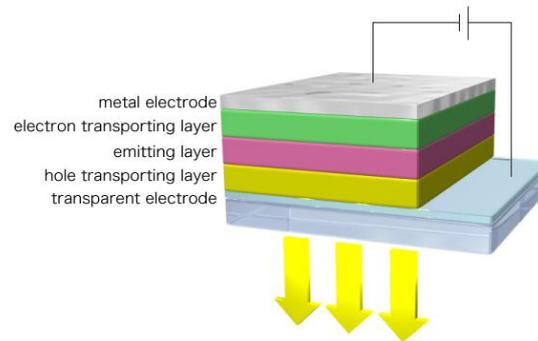


Figure 27 : Architecture d'une OLED [52]

Les OLEDs peuvent être classées en 2 familles : les OLEDs traditionnelles utilisent des petites molécules déposées sur le substrat pour l'émission de lumière. Les autres OLEDs utilisent des polymères pour transformer l'électricité en lumière. En outre, depuis qu'il est possible d'imprimer les OLEDs sur du plastique au lieu d'utiliser du verre, elles sont devenues plus fines et souples. Parmi ses avantages, celui qui est le plus intéressant dans le cadre d'une comparaison avec la technologie LCD est sa finesse. De plus, une OLED ne nécessite pas de rétroéclairage lorsqu'elle est utilisée comme écran. C'est pourquoi cette technologie est actuellement très utilisée dans les écrans plats/géants, consoles portables ou encore les téléphones. Ou encore, le fait de pouvoir être souple fait de l'OLED un moyen complémentaire à la LED pour des applications de type affichage ou éclairage.

Transistor organique émetteur de lumière

Les technologies pour l'émission de lumière à partir d'éléments organiques sont pleines de promesses. L'OLED est basée sur le fonctionnement de la LED, il existe une analogie entre le transistor organique émetteur de lumière et un transistor à effet de champ. Outre le fait de produire de la lumière, il offre des possibilités en tant qu'interrupteur dans le domaine de l'optoélectronique ou la photonique [53]. Il est ainsi possible de transmettre un rayon laser à travers un micro résonateur en verre est directement contrôlé par un deuxième rayon laser, plus puissant. Le système, intégré sur une puce, agit comme un transistor optique : un faisceau lumineux peut influencer l'intensité d'un autre faisceau lumineux.

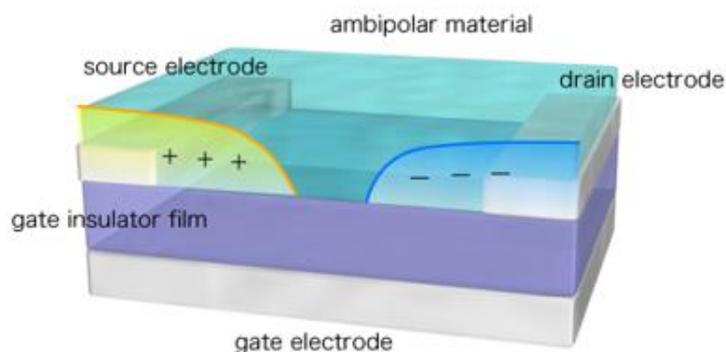


Figure 28 : Architecture d'un OFET [54]

L'OLET partage des avantages de l'OLED comme le fait d'être une source de lumière plane pouvant être intégré sur du silicium, du verre, du plastique ou du papier en utilisant des techniques de microélectronique. Contrairement à l'OLED, l'OLET exploite une géométrie pour le transport de l'énergie permettant de diminuer les pertes de photons délétères et les mécanismes d'extinction excitons inhérents à l'architecture OLED.

1.8 L'électroluminescence

L'électroluminescence est un phénomène à la fois optique et électrique qui se produit à la surface d'un matériau (généralement semi-conducteur) qui traversé par un courant électrique émet de la lumière.

Historiquement, le principe de l'électroluminescence, se basant sur le fonctionnement des diodes électroluminescentes, fut présenté par Henry Joseph Round [54] en 1907. Il observa que certains semi-conducteurs (carbure de silicium dans ce cas) émettaient de la lumière lorsqu'un courant électrique les traversait. H. J. Round, qui était aussi l'un des pionniers de la radio, observa ce phénomène alors qu'il était en train de faire passer du courant dans d'autres composants à base de matériaux semi-conducteurs pour tâcher d'améliorer l'amplification des signaux de radio.

En 1921, le physicien russe Oleg Lossew observa à nouveau ce phénomène d'émission de lumière par des semi-conducteurs traversés par un courant électrique appelé alors l'Effet de Round. C'est le premier à avoir étudié plus en détail le comportement de diodes à base de matériaux semi-conducteurs qui plus tard seront nommés Light-Emitting diode. Il fabriqua spécifiquement pour étudier ce phénomène d'électroluminescence une diode cristalline avec de l'oxyde de zinc et du carbure de silicium qui, comme il l'avait prévu, émit des photons lorsqu'elle fut traversée par un courant électrique. Ses travaux furent publiés en 1927, tout d'abord dans un journal russe puis dans des médias britanniques et allemands. Lossew breveta également le principe de relais de lumière « Light Relay » et son utilisation dans les télécommunications.

En 1962, une diode électroluminescente constituée de phosphore-arséniure de gallium développée par l'ingénieur américain Nick Holonyak émettant dans le rouge, arriva sur le marché. Cette première LED dans le domaine de longueurs d'onde visibles marqua réellement la naissance des LED produites à l'échelle industrielle.

C'est en 1971 qu'une avancée dans le domaine des LED et plus particulièrement des nouveaux matériaux semi-conducteurs a permis d'obtenir des LED pouvant émettre dans plusieurs couleurs comme le vert, l'orange ou le jaune.

En 1992, Shuji Nakamura, ingénieur en électronique et professeur à l'université de Santa Barbara, développa la première LED à base de nitrure de gallium à haute brillance, ainsi que le premier LED émettant de la lumière bleue. Cette avancée dans le domaine ouvrit la voie aux luminaires à base de LED pouvant fournir de la lumière blanche et donc pouvant être utilisés dans les domaines d'éclairage intérieur et extérieur. S. Nakamura a également développé des LED émettant dans les UV.

En 1993, le premier LED blanc est créé en convertissant la lumière bleue par l'utilisation d'un luminophore jaune/orangé à base de grenat d'yttrium et d'aluminium. En 2006, le fabricant Nichia annonce que ses produits atteignent le rendement lumineux des 150 lm/W [55] alors que jusque-là, seules les lampes à décharge dans le gaz pouvaient atteindre ces performances. Cette valeur a été obtenue pour un courant d'alimentation de 20 mA, une température de couleur de 4600 K et un indice de rendu des couleurs de 95. En 2010, le fabricant CREE a atteint le seuil de 208 lm/W [56], pour une température de couleur de 4579 K et un courant de fonctionnement de 350 mA puis en 2014, CREE

franchit un nouveau seuil à 303 lm/W [57] pour une température de 5130 K et un courant d'alimentation de 350 mA.

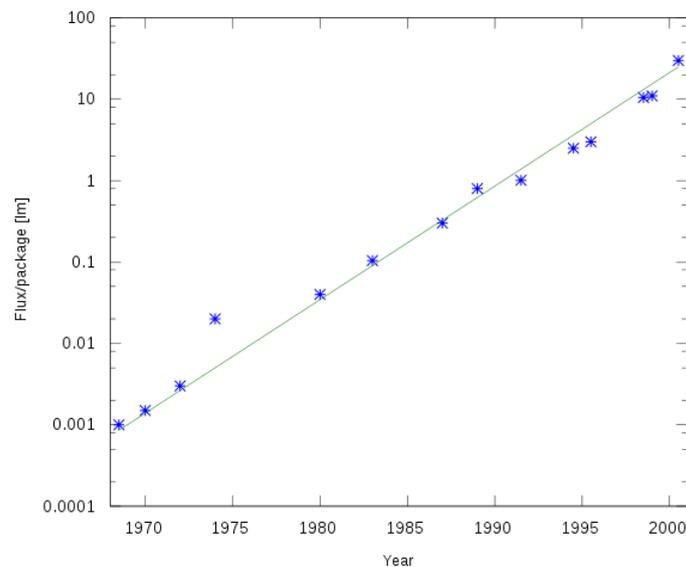


Figure 29 : Illustration de la loi de Haitz [58]

De la même manière que la loi de Moore décrit le développement de l'évolution des ordinateurs, il existe une analogie pour les LED à travers la loi de Haitz [59]. Globalement, cette dernière décrit l'évolution de l'efficacité des LED. Plus précisément, elle montre que chaque décennie, le coût par lumen est divisé par 10. En outre, la quantité de lumière émise par élément est multipliée par 20. Ce qui promet un bel avenir à ces semi-conducteurs se faisant une place de plus en plus importante dans l'ensemble des domaines ayant besoin de lumière. Cette thèse étant consacrée à l'étude de ces composants en vue d'en optimiser leurs utilisations, nous détaillons en chapitre 2 le principe de fonctionnement leurs caractéristiques électriques et les premiers essais effectués en laboratoire.

1.9 Conclusion

La lumière est aujourd'hui encore, un concept extrêmement abstrait qui peut montrer des résultats différents en fonction du point de vue et des conditions dans une expérience. À la fois une onde et particule, il n'y a pas aujourd'hui de réponse simple pour la décrire. Cependant, malgré cette difficulté à la représenter, il est possible de produire la lumière artificielle suivant un grand nombre de manières. Que cela soit en utilisant le principe de l'incandescence, en utilisant une décharge dans un gaz ou en utilisant des matériaux solides. Bien que les méthodes ne manquent pas pour la générer de manière assez simple de nos jours, les mécanismes pour la percevoir avec les cônes ou les bâtonnets ou le système de filtre avec notre pupille est extrêmement complexe. Une fois émise, la lumière peut ensuite être caractérisée de bien des manières grâce aux grandeurs mises en place par J.H. Lambert comme son flux qui sera ensuite comparé dans des normes ou sa luminance traduisant des sensations d'éblouissement. Elle peut aussi être étudiée pour d'autres paramètres qui ont un impact plus ou moins direct sur l'être humain comme son spectre, qui par le mélange des couleurs conduira à la température de couleur proximale qui traduira une sensation de chaleur ou de froid.

Références

- [1] <http://eclairagepublic.eu/site/eclairage-public-les-chiffres-cles/>
- [2] http://www.afe-eclairage.fr/docs/2014/12/09/12-09-14-11-22-Les_chiffres_cles_eclairage_public.pdf
- [3] <http://www.ademe.fr/collectivites-secteur-public/patrimoine-communes-comment-passer-a-laction/eclairage-public-gisement-deconomies-denergie>
- [4] Huygens, C. and Thompson, S. P. (trans), 2005 (1678), '[Treatise on Light](#)', University of Chicago Press.
- [5] http://www.pion.cz/_sites/pion/upload/images/50a376d3f13453867259b275cdbadf88_11-zareni-graf-wiki-fr.png
- [6] Ultra-violet, visible, infra-rouge : Les lampes, sources de rayonnement, et leurs applications pratiques, M. La Toison
- [7] http://www.web-sciences.com/documents/terminale/tedo18/teco18x_fichiers/image010.png
- [8] "The Body Clock Guide to Better Health" by Michael Smolensky and Lynne Lamberg; Henry Holt and Company, Publishers (2000)
- [9] *Vitaterna, MS; Takahashi, JS; Turek, FW (2001). "Overview of circadian rhythms".*
- [10] *Shneerson, J.M.; Ohayon, M.M.; Carskadon, M.A. (2007). "Circadian rhythms"*
- [11] <http://www.douglas.qc.ca/info/rythmes-circadiens-effet-de-la-lumiere>
- [12] <http://canal.ugr.es/index.php/sciences-sociales-economiques-et-juridiques/item/80296-une-%C3%A9tude-d%C3%A9montre-que-les-pi%C3%A9tons-se-sentent-plus-s%C3%BBrs-dans-les-rues-%C3%A9clair%C3%A9es-avec-de-la-lumi%C3%A8re-blanche?tmpl=component&print=1>
- [13] http://www.afe-eclairage.fr/docs/2014/12/09/12-09-14-11-11-eclairage_public_et_insecurite_securite.pdf
- [14] <http://www.crdp-montpellier.fr/themadoc/Architecture/reperes2.htm>
- [15] <http://www.gif-lumiere.com/lumiere/architecture.php>
- [16] http://www.abr-bwv.be/sites/default/files/6_4%20collard%20F.pdf
- [17] <http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=14842>
- [18] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=17233>
- [19] <https://www.zenlatitudes.com/FR/article-lumiere-bleue.htm>
- [20] <http://www.sciencesetavenir.fr/sante/20100111.OBS3325/migraine-quand-la-lumiere-fait-mal.html>
- [21] <http://www.slate.fr/story/15799/pourquoi-la-lumiere-fait-si-mal-aux-migraineux>
- [22] http://perso.calixo.net/~jmg/TPE_2/oeil1_fichiers/image002.jpg
- [23] <http://svtmarcq.e-monsite.com/medias/images/retine1.png>
- [24] http://www.med.univ-montp1.fr/enseignement/cycle_1/PCEM2/mod-integres/MI3_neuro/sensorialite/vision/cours/images-vision/f_dist_cone_batonnet2.gif
- [25] <https://books.google.fr/books?isbn=2743019115>
- [26] http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_m/a_02_m_vis/a_02_m_vis.html
- [27] <http://www.picbleu.fr/uploads/documents/56dfd6eec7902.jpeg>
- [28] <http://www.energie-environnement.ch/maison/eclairage-et-piles/1369>
- [29] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/Efficacit%C3%A9_lumineuse_relative_spectrale_k.jpg

- [30] <http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/DOWNLOADS>
- [31] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/CIExy1931.png>
- [32] <http://www.ing-buero-ebel.de/strahlung/index.htm>
- [33] http://www.afhalifax.ca/magazine/wp-content/sciences/Planck/Le%20corps%20noir_files/rayonnement_corps_noir.png
- [34] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006807/document>
- [35] <http://lumenhub.com/wp-content/uploads/2015/07/nominal-CCT.jpg>
- [36] Luo, Q-Z; D'Angelo, N; Merlino, R. L. (1998). *"Shock formation in a negative ion plasma"*
- [37] Sturrock, Peter A. (1994). *Plasma Physics: An Introduction to the Theory of Astrophysical, Geophysical & Laboratory Plasmas*. Cambridge University Press.
- [38] *"Ionization and Plasmas"*. The University of Tennessee, Knoxville Department of Physics and Astronomy.
- [39] <http://phozagora.free.fr/?surfpage=Historique>
- [40] *Éclairage d'intérieur et ambiances visuelles*, J.J. DAMELINCOURT, G. ZISSIS, C. CORBE, B. PAULE
- [41] http://www.smartcandle.fr/309-large_default/chandelle-silicone-27cm-blanche-led-blanc-soft.jpg
- [42] <http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/images/qc/lampe-a-incandescence-114650.jpg>
- [43] <http://tpe-physique-cuisine.pagesperso-orange.fr/images-utilisees/ampoule-halogene.jpg>
- [44] http://www.linternaute.com/science/technologie/comment/06/lampe-halogene/lampe_halogene.gif
- [45] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9b/Fluo-phospho.jpg/330px-Fluo-phospho.jpg>
- [46] http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04_technique/03_eclairage/images/tube_fluorescent_circuit.png
- [47] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_fluorescente#/media/File:02_Spiral_CFL_Bulb_2010-03-08_\(black_back\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_fluorescente#/media/File:02_Spiral_CFL_Bulb_2010-03-08_(black_back).jpg)
- [48] <http://www.ilocis.org/fr/documents/images/046-005f.gif>
- [49] http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04_technique/03_eclairage/images/lampe_mercure_haute_pressi.png
- [50] http://www.eclairage-pro.fr/images/Image/shp-t_sodium_haute_pression_tubulaire_400W_E40_1371815665.jpg
- [51] http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04_technique/03_eclairage/images/lampe_induction.png
- [52] http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page_id=3893
- [53] <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=16162.php>
- [54] http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page_id=3898
- Round, H. J. (1907), *"A note on carborundum"*, *Electrical World*, **49** : 309. Round's letter is dated 9 February 1907
- [55] http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20061221/125713/
- [56] https://web.archive.org/web/20110720122730/http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1265232091259
- [57] <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>

[58] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c0/Haitz_law.svg/2000px-Haitz_law.svg.png

[59] <http://www.rollitup.org/t/led-wins-haitzs-law.836394/>.

Chapitre 2 : Les diodes électroluminescentes

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons souhaité aller plus loin sur la compréhension des matériaux semi-conducteurs et leur utilisation pour constituer ce qui est communément appelé une LED. Après avoir effectué de brefs rappels de physique du solide, nous avons repris le principe générique de fonctionnement d'une LED en précisant plusieurs variantes de mises en œuvre selon le type de lumière et les performances souhaités. Cependant, pour constituer un luminaire à LEDs, il est nécessaire de faire appel à un groupement de plusieurs LED pour atteindre le niveau de luminosité suffisant auquel sont ajoutés plusieurs éléments environnants comme l'optique, le support et les alimentations électriques, il nous est apparu nécessaire de s'appuyer sur des modèles afin de définir une méthodologie de conception optimale. Pour cela, il est attendu des modèles choisis d'une part qu'ils décrivent relativement précisément le comportement de chaque LED élémentaire dans son environnement de travail (température, niveau d'alimentation, place par rapport aux autres LEDs, type d'interconnexion) et d'autre part, que ces modèles soient suffisamment simples pour ne pas alourdir en temps de calculs les systèmes complets et complexes. Pour cela, une deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude comparative de modèles existants, en examinant leurs avantages et leurs limites. De là, nous avons effectué des choix avant d'extraire des paramètres issus d'expérimentations menées dans les deux laboratoires impliqués dans ces recherches. Il s'est avéré que les essais menés devaient être environnés de plusieurs précautions afin de ne pas engendrer d'erreurs de mesures. Les détails de certains d'entre eux ont ainsi fait l'objet d'annexes scientifiques donnant l'approche et les protocoles mis au point et le niveau de précision atteint. Étant donné les dispersions des données issues des constructeurs et parfois le peu d'informations, il nous a semblé nécessaire d'établir notre propre protocole d'essais et d'identification des paramètres pour chaque modèle choisi. Plusieurs tests ont ainsi été mis en place pour relever les performances physiques, optiques et étudier l'influence thermique. Pour terminer, nous avons effectué une synthèse des principaux résultats expérimentaux validant le comportement des modèles. Ainsi même à des niveaux élémentaires, nous voyons apparaître des points optimaux de fonctionnement qui nous ont servi dans l'étude de luminaires à LEDs complets exposés dans les chapitres 3 et 4.

2.2 Le principe de fonctionnement d'une LED

Une LED peut se définir comme un composant optoélectronique qui émet de la lumière lorsqu'elle est traversée par un courant électrique. La première particularité d'une LED est sa capacité à émettre de la lumière à partir d'un ou plusieurs matériaux semi-conducteurs à l'état solide.

La LED est en réalité proche des composants conçus pour l'usage de fonctions électroniques. Ainsi elle utilise des techniques de conception technologique et des matériaux semi-conducteurs identiques. Son comportement en isolant ou en conducteur électrique peut également s'expliquer par la théorie des bandes d'énergie [60]. De plus, ce dernier dépendra de sa topologie, du taux de dopage et des dimensions mises en œuvre. Toutefois, en première approche, nous pouvons définir une LED comme

un composant électronique constitué à partir de la juxtaposition de deux matériaux semi-conducteurs. La mise en œuvre s'effectue comme celle d'une jonction PN pour une diode. Ainsi, pour les LED comme pour les diodes devant assurer des fonctions électroniques, l'un des matériaux doit être dopé fortement en porteurs positifs (zone p) et l'autre en porteurs négatifs (zone n), afin de constituer une jonction PN comme celles décrites en figures 28 et 29.

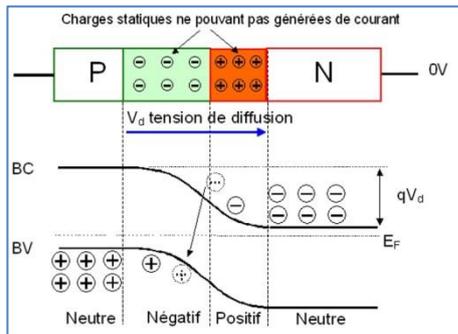


Figure 30 : Une jonction PN pour une diode [58]

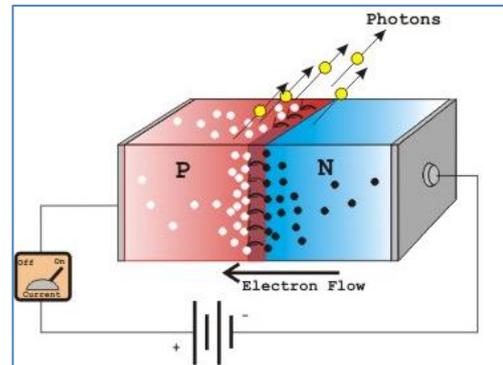


Figure 31 : Une jonction PN pour une LED [59]

Selon la théorie des bandes d'énergie d'un matériau, nous pouvons constater qu'un électron dans un matériau ne peut que prendre des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles nommés « bandes d'énergie permises ». Ces bandes sont séparées elles-mêmes par d'autres, appelées bandes interdites. Une des représentations graphiques permettant aisément la compréhension de ce phénomène physique est donnée en figure 32 selon les propriétés électriques intrinsèques du matériau pouvant être isolant, conducteur ou bien semi-conducteur comme décrits dans plusieurs ouvrages de référence. [60] [61] [62].

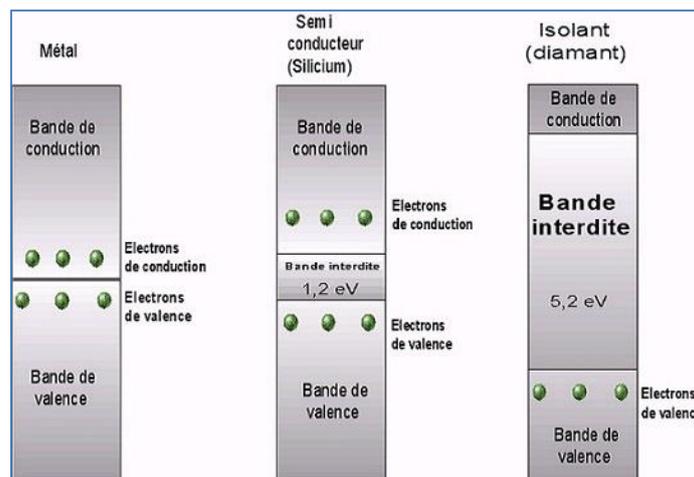


Figure 32 : La nature des matériaux [63]

Quel que soit le type de matériau, deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier dans un matériau : la « bande de Valence » qui correspond à la dernière bande d'énergie saturée en charges du matériau, et la bande d'énergie permise suivante appelée « bande de conduction ». La bande de Valence est riche en charges mais ne participe pas aux phénomènes de conduction électrique. La bande de conduction, quant à elle, peut être vide de charges, quel que soit le matériau

travaillant à des températures proches du zéro absolu. C'est bien cette bande d'énergie qui permet aux électrons d'effectuer des déplacements de charges dans le matériau créant un courant électrique dans le solide. À travers la représentation énergétique de la figure 32, nous pouvons voir que les matériaux conducteurs comme les métaux ont leurs bandes de conduction et de valence qui se chevauchent facilitant d'autant plus le passage des électrons directement de la bande de Valence à la bande de conduction et donc la circulation de courant dans tout le matériau.

Par ailleurs, dans un matériau semi-conducteur tout comme dans un matériau isolant, ces deux bandes sont séparées par une bande, appelée couramment en anglais « gap ». L'unique différence entre un semi-conducteur et un isolant est la largeur de cette séparation, largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives.

Lorsque le semi-conducteur est polarisé en direct, des électrons se déplacent depuis la bande de Valence pour « monter » dans la bande de conduction et d'autres « descendent » faisant le chemin inverse. Chaque échange de la bande de Valence à la bande conduction est appelée recombinaison. C'est ce phénomène de recombinaison des porteurs électron-trou qui est à l'origine de l'émission de lumière de la LED. L'énergie du photon généré et les propriétés qui en découlent dépendent du seuil d'énergie entre la bande de Valence et la bande de conduction et du type de matériau semi-conducteur.

Dans le but de créer un maximum de lumière, il est possible d'optimiser le nombre de recombinaisons en ayant recours à des techniques de « dopage » similaires à celles utilisées dans le domaine des composants électroniques. De plus, ce processus peut avoir d'autres effets comme diminuer la résistance électrique (liée aux pertes), changer la longueur d'onde d'émission ou encore augmenter le nombre de porteurs dans un matériau. Les travaux de recherche effectués dans cette thèse n'ayant pas pour but de créer technologiquement une LED, les liens entre le type de dopage, sa quantité et les effets physiques qui en découlent ainsi que les équations physiques les décrivant ne sont pas détaillés dans ce manuscrit. Toutefois, nous invitons le lecteur curieux d'en savoir plus à consulter les thèses développées par F. Tournus ou A. Arnoult [64] [65] [60] décrivant plus particulièrement l'étude et l'interaction de certains phénomènes physiques.

2.3 Problématique des LEDs

Comme nous avons montré dans le paragraphe précédent, une LED élémentaire est basée sur les performances des matériaux semi-conducteurs la constituant. Ces matériaux ou alliages sont donc choisis pour avoir de très bonnes performances en émission de lumière. De plus, la taille et le dopage des couches aux propriétés semi-conductrices jouent des rôles importants dans les performances. Nous rappelons ainsi brièvement dans cette partie les choix technologiques historiques effectués pour atteindre des performances dans une zone spectrale donnée puis pour créer de la lumière « blanche ».

2.3.1 Les matériaux utilisés

La famille des matériaux semi-conducteurs et isolants à bande interdite de l'ordre de l'électron Volt peut servir à la fabrication de LED. Cela peut être divisé en deux groupes. Le premier groupe concerne les matériaux à gap direct comme ceux indiqués dans le tableau 3 et le second à gap indirect.

Matériau à gap direct	Largeur de la bande (eV)	Matériau à gap indirect	Largeur de la bande (eV)
InSb	0,23	Diamant	5,4
InAs	0,43	Si	1,17
InP	1,42	Ge	0,744
GaAs	1,52	GaP	2,32
GaSb	0,81	AlSb	1,65
CdS	2,58	PbSe	0,165

Tableau 3 : Les largeurs de bandes interdites pour des matériaux à gap direct ou indirect à 0 °K66 [66]

La notion de gap direct ou indirect est liée à la représentation de la dispersion énergétique d'un semi-conducteur. En observant la représentation du diagramme de l'énergie en fonction de k , $E=f(k)$ de la figure 33 pour les deux cas, il est possible de définir spatialement les extrêmes des bandes de conduction et de valence. Ces extrêmes représentent, dans un semi-conducteur à l'équilibre, des domaines énergétiques où la densité de porteurs de type P pour la bande de valence et de type N pour la bande de conduction sont importantes. Il est possible de parler de semi-conducteur à gap direct lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à une valeur voisine du vecteur d'onde k . Inversement, le semi-conducteur est dit à gap indirect lorsque le maximum de bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont éloignés et prennent des valeurs distinctes du vecteur d'onde k . Dans le cadre des applications en émetteur de lumière, les matériaux à gap indirect sont privilégiés comme l'antimoniure d'indium (InSb) souvent utilisé dans la fabrication de détecteur IR ou l'arséniure de gallium (GaAs). Ces deux III-V possèdent en effet des extrêmes de bandes proches et situés à des valeurs de k semblables. Ainsi la probabilité de recombinaison radiative des porteurs est supérieure grâce à la conservation de la quantité de mouvement (même vecteur d'onde k).

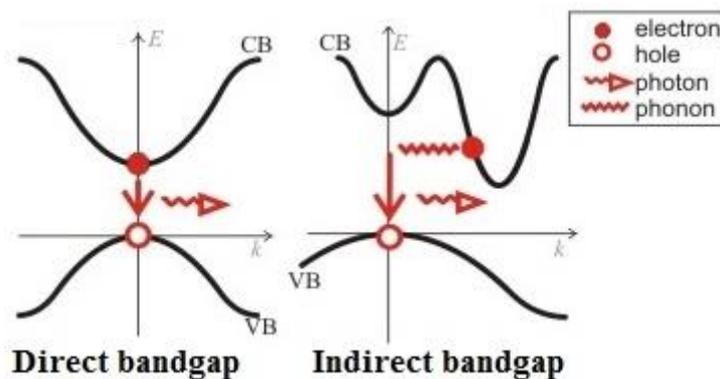


Figure 33 : Représentation du diagramme énergétique en fonction de k pour un matériau à gap direct (a) et à gap indirect (b) [67]

Au fil des années, les progrès technologiques ont vu apparaître des LEDs émettant sur une partie de spectre lumineux donné comme l'indique le tableau 4. Il a été assez aisé de produire du rouge jusqu'au vert. Cependant, la conception de LEDs émettant un spectre large pour créer de la lumière blanche ou

bien celles pouvant émettre dans le bleu ont été bien plus difficiles à mettre au point expliquant que pendant de nombreuses années les LEDs ont été utilisées pour des voyants lumineux et non en éclairage.

Matériaux	Longueur d'onde (nm)	Couleur	Tension à 20 mA (V)
GaAsP	630-660	Rouge	1,8
GaAsP	605-620	Ambre	2
GaAsP:N	585-595	Jaune	2,2
AlGaP	550-570	Vert	3,5
SiC	430-505	Bleu	3,6
GaN	450	Blanc	4

Tableau 4 : Lien entre le type de matériau et la couleur émise pour les LEDs [68]

2.3.1.1 La création de LEDs émettant de la lumière bleue

Les premières LEDs émettant de la lumière bleue ont été faites à base de Sélénure de Zinc (ZnSe) et de Carbure de Silicium (SiC) présentant chacune des gaps indirects élevés. Toutefois, comme l'efficacité d'émission de lumière n'était pas satisfaisante, ces pistes ont été abandonnées. Le premier matériau présentant des performances plus intéressantes pour le développement de LEDs bleues a été le Nitrure de Gallium (GaN). Cependant, il y a eu un verrou important pour avoir une reproductibilité à grande échelle dans la fabrication industrielle des cristaux de GaN en vue d'obtenir un matériau homogène et ayant des performances constantes. Ceci a pu être obtenu à la fin des années 1960 et l'utilisation de la technique épitaxie en phase vapeur Hydrure (HVPE) [69]. Cependant cette technique ne permettait pas de contrôler la rugosité des surfaces. Le problème restait donc entier vis-à-vis du rôle de l'hydrogène qui ne pouvait pas être intégré dans l'ensemble du matériau de manière homogène et restait principalement en surface [70]. Dans les années 1970, avec l'aide de nouvelles techniques de croissance cristalline comme l'épitaxie par faisceau moléculaire (MBE) [71] ou l'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE) [72], la croissance du GaN s'est progressivement améliorée [73].

À la fin des années 1980, grâce à la technique d'analyse utilisant le microscope électronique à balayage offrant des agrandissements de meilleure qualité, A. Amano et H. Akasaki ont observé que lorsque l'on dopait une couche de GaN avec du Zinc (Zn), ce composant pouvait augmenter son taux d'émission de lumière [74]. En fait le zinc apportait un meilleur dopage de type P. D'une manière similaire, l'utilisation du Magnésium (Mg) apportait également de meilleurs résultats sur le dopage P et donc l'émission de lumière [75]. Ce fut une percée importante ouvrant la voie à la constitution de jonctions PN à base de GaN dédiées aux applications lumineuses.

2.3.1.2 Création de LEDs émettant de la lumière blanche

L'émission de lumière blanche par une LED ou un ensemble de LEDs a été mise au point pour la première fois dans les années 1990 pour le rétroéclairage dans les applications automobiles. C'était alors des LEDs de très faible puissance d'émission.

Aujourd'hui, il existe deux manières de produire de la lumière blanche avec des LEDs. La première et la plus ancienne méthode pour reconstruire cette lumière s'effectue par la synthèse additive des trois couleurs primaires qui sont le rouge, le vert et le bleu comme dans les métiers de l'art. Cette méthode a pu être effective lorsque les LEDs émettant dans le spectre bleu ont été améliorées et dont certaines technologies ont pu être reproduites à grande échelle. Cependant, la faible largeur spectrale de chaque LEDs selon la lumière émise ne permet souvent pas d'obtenir de très bons résultats une fois groupées pour la création de la lumière blanche dans un luminaire. Ce type de mélange nommé RGB (de l'anglais, Red – Green – Blue) reste ainsi utilisé pour la création de couleurs particulières ou les animations colorées et très peu pour la production de lumière blanche dédiée à l'éclairage. Un autre frein à cette technique pour qu'elle soit utilisée dans l'éclairage vient des technologies utilisées dans les semi-conducteurs qui sont différentes selon chaque type de couleur émise et dont l'association est rendue difficile parce qu'elles n'ont finalement pas le même comportement vis-à-vis des conditions de fonctionnement notamment la température et l'alimentation en courant. Cela peut parfois entraîner des dérives chromatiques ou des diminutions du flux lumineux pouvant être perceptibles à l'œil nu.

La seconde méthode de production de la lumière blanche consiste à émettre des radiations avec l'aide d'un semi-conducteur dans une gamme spectrale donnée et avec cette lumière, exciter un matériau luminophore déposé sur un filtre (substance qui, lorsqu'elle subit une excitation, émet de la lumière dans une autre gamme spectrale). Par exemple, une solution très répandue est de faire traverser une radiation visible (généralement le bleu ou le violet) à travers un luminophore qui peut être simple ou multicouche comme en figure 34.

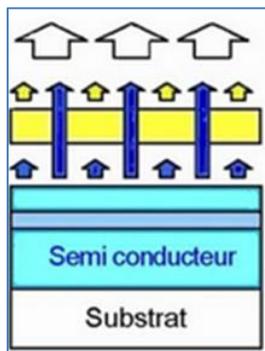


Figure 34 : Production de lumière blanche [76]

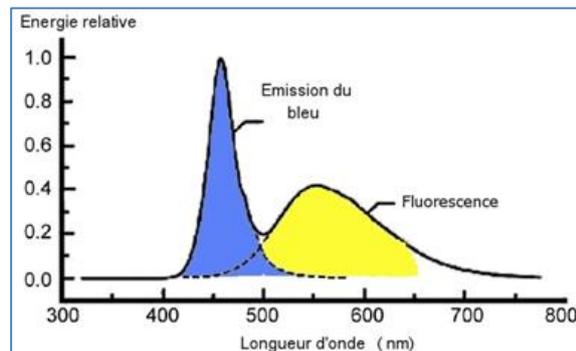


Figure 35 : Effet Stokes pour la production de lumière [76]

Par exemple selon [76], le principe de constitution est que le matériau semi-conducteur de la LED est choisi pour pouvoir émettre une radiation bleue autour de 440 nm. Le luminophore choisi pour émettre une lumière blanche/jaune/orangée est déposé directement sur la puce jouant également en partie le rôle de filtre absorbant de la radiation bleu. Le résultat est une lumière à tendance blanche qui est le mélange du bleu non complètement absorbé et du jaune émis par le luminophore. Ce

principe d'absorption des courtes longueurs d'onde et la réémission vers des longueurs supérieures furent découverts par G. Stokes en lien avec l'émission de lumière par fluorescence [80]. Une autre possibilité est d'utiliser des LEDs qui émettent des radiations dans le domaine des UV et de les ramener dans le spectre visible avec un luminophore adapté [77 - 78]. Une autre technologie basée sur un concept similaire est d'utiliser une diode laser à la place d'un semi-conducteur. Selon Nakamura [79], cette technique avec des diodes laser représente le futur par rapport à la précédente pour les applications de l'éclairage pour ses avantages sur les systèmes LEDs, OLEDs ou OLET. Le fait d'utiliser une diode laser offre un meilleur contrôle en température (beaucoup moins d'emballage thermique). De plus, à puissance équivalente, les diodes laser ont besoin de moins d'énergie. Ou encore, elles ont une meilleure stabilité chromatique. Elles ont commencé à remplacer les systèmes d'éclairage automobile actuels [80].

Quelles que soient les technologies utilisées, actuellement, les LEDs ont un avantage certain sur les autres types d'éclairage. En effet, elles couvrent une gamme de longueurs d'onde très large et ont la possibilité de constituer de nombreux types de luminaires. Comme l'indique 36, le taux d'émission selon les raies spectrales peut ainsi être réglé.

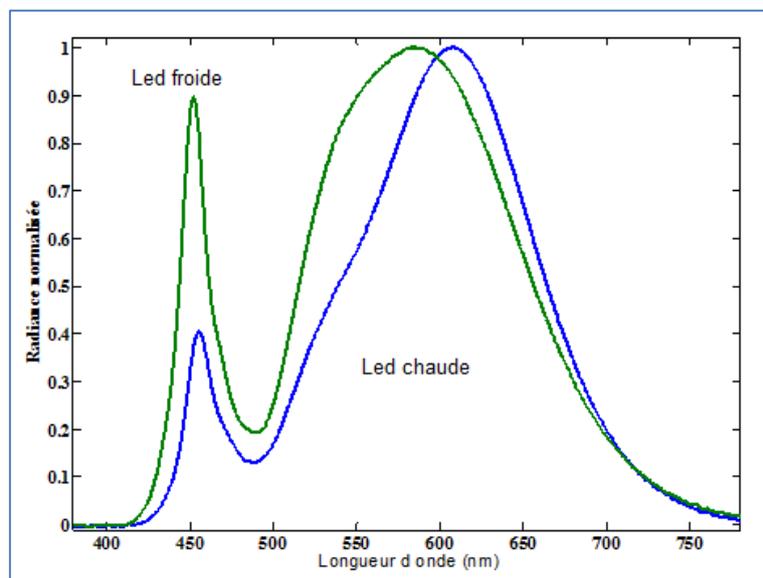


Figure 36 : Proportion d'émission de "bleu" dans des LEDs chaude et froide

La lumière peut ainsi être qualifiée de chaude ou de froide suivant les matériaux composant la LED émettrice et le luminophore. Pour les LEDs actuelles produisant la lumière blanche, le matériau constituant le luminophore est souvent du grenat d'aluminium et d'yttrium (YAG). Bien que des efficacités lumineuses impressionnantes de 300 lm/W aient été démontrées en laboratoire [55], les LEDs blanches que l'on peut aujourd'hui trouver dans le commerce sont autour des 100 lm/W. La société CREE, qui fabrique des LEDs depuis 1989, affiche une valeur de 134 lm/W [81] pour un courant de 350 mA et une température de fonctionnement de 85 °C pour la LED référencée XHP50.

Malgré les évolutions constantes, il reste actuellement des problèmes intrinsèques aux LEDs élémentaires et aux luminaires utilisant ces LEDs qui les empêchent de fonctionner de manière

optimale. L'une des améliorations mises en œuvre est l'ajout de puits quantiques multiple afin d'augmenter le rendement de la LED [82]. Une autre manière d'améliorer les LEDs est l'extraction de la lumière à partir de la puce au centre du composant. Le GaN est un matériau qui favorise les recombinaisons radiatives et donc l'émission de lumière, cependant il a aussi un fort indice optique (typiquement $n=2,45$). Cela entraîne en conséquence le piégeage de la lumière dans celui-ci. Pour cela, des travaux ont été effectués [83], montrant qu'il est possible par exemple, en ajoutant une couche en métal en face arrière afin de réfléchir la lumière, ou en changeant la forme de la puce LED. Les résultats ont montré qu'il était possible d'obtenir des améliorations de l'extraction de la lumière pouvant passer de 30 % à 80 %. Un des aspects est souvent négligé dans la recherche d'un meilleur rendement lumineux est le rendu des couleurs. Or en travaillant avec des luminophores YAG conventionnels et en introduisant une quantité de nitrure, il est possible d'augmenter l'indice de rendu des couleurs de 75 % en moyenne à 95 % [76].

2.3.2 Critères d'évaluation des performances d'une LED

Pour mieux connaître les performances des LEDs afin de concevoir des alimentations plus dédiées, nous avons fait le choix de faire plusieurs campagnes de tests sur les performances électriques et lumineuses de LEDs élémentaires. L'idée est de mieux connaître les points d'optimisation possibles, car il existe déjà beaucoup de produits sur le marché bien que les performances sont encore à améliorer et la fiabilité n'est pas toujours au rendez-vous.

2.3.2.1 Mesures de rendements et d'efficacités d'une LED



Figure 37 : Appareils utilisés lors des mesures sur les LEDs

Concernant les moyens de tests pour mesurer le taux de production lumineux, le LAPLACE dispose d'une sphère de 25 cm de diamètre référencée LMS-100 qui permet d'assurer une qualité de mesure en garantissant un flux interne homogène grâce à une peinture diffusante blanche aussi peu sélective que possible qui assure entre 80 et 98 % de réflexion de la lumière sur un intervalle de 250 à 2500 nm. Pour cela, les mesures faites en sphère sont vérifiées par un spectromètre calibré tous les 2 ans. De même le processus d'étalonnage de la sphère pour convertir la luminance en flux est révisé tous les 6 mois. La figure 37 montre une campagne de tests sur une des platines de tests élaborées au sein du LAAS de 25 LEDs. Pour éviter toute dérive thermique des appareils de mesure et les erreurs de mesure que cela peut engendrer, toutes les campagnes de tests ont été effectuées dans les mêmes conditions expérimentales que ce soit pour une LED, un PCB de plusieurs LEDs ou une platine complète. Par exemple, nous avons pris les précautions que l'ensemble des appareils utilisés soient mis en service au moins une heure avant les premières mesures notamment le Keithley 2602A afin d'éviter toute dérive thermique liée au transitoire et entraîner les erreurs de mesure associées. Ensuite, avant chaque mesure, la température du support de la LED ou des LEDs était contrôlée avec un thermocouple MM2000 (de type K) afin que tous les essais démarrent à une température ambiante similaire. Entre deux essais, si la température moyenne de la platine avait beaucoup augmentée, elle était refroidie par refroidissement passif.

Durant les campagnes de test, diverses précautions ont été mises en œuvre pour s'assurer de la reproductibilité des mesures. Notamment, sur les aspects thermiques afin de garantir que chaque mesure s'effectue en régime permanent thermique. Les détails concernant le protocole de mesure élaboré pour ces travaux sont consignés en annexe.

2.3.2.2 Notions permettant d'évaluer les performances d'une LED

Pour qualifier les performances d'une LED, il existe trois notions qui se recoupent partiellement. La première grandeur correspond à l'**efficacité lumineuse** Eff_l qui en toute rigueur pour une LED (ou d'une source) correspond au rapport entre le flux lumineux visible et la puissance radiative totale de la source (en lm/W). Elle se définit par l'équation suivante :

$$Eff_l = \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda) F(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda} \quad (2,1)$$

Avec :

$V(\lambda)$: l'efficacité lumineuse spectrale

$F(\lambda)$: le flux énergétique de la source de lumière (W)

La deuxième grandeur permettant d'évaluer les performances d'une LED correspond au **rendement lumineux** η_l qui est le rapport entre le flux lumineux visible et la puissance électrique consommée par la source (en lm/W également). Il est défini par l'équation :

$$\eta_l = \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda) F(\lambda) d\lambda}{P} \quad (2,2)$$

Avec :

$V(\lambda)$: l'efficacité lumineuse spectrale

$F(\lambda)$: le flux énergétique de la source de lumière (W)

P : la puissance électrique injectée (W)

La dernière grandeur est le **rendement quantique interne** EQE d'une LED qui désigne le rapport du nombre de photons émis par le ou les puits quantiques sur le nombre d'électrons injectés. Ce rendement dépend de la qualité de la jonction et des matériaux utilisés principalement. Cependant, ce rendement n'étant pas simple à évaluer, les LEDs sont plus souvent comparées par rapport à leur rendement lumineux décrit précédemment notamment dans la littérature [84-85]. Le rendement quantique EQE est défini par :

$$EQE = \frac{Bn^2}{An+Bn^2+Cn^3} \quad (2,3)$$

Avec :

n : la densité du courant (A/cm^2),

B : le nombre de recombinaisons radiatives,

A et C : les nombres de recombinaisons non radiatives.

En fonction du niveau de courant d'alimentation, l'efficacité définie par l'équation 2.1 et les deux rendements présentent un maximum à faible densité de courant injectée et décroissent plus ou moins selon les LEDs en fonction du niveau de courant et selon les besoins en éclairage. Ce problème est connu sous la terminologie « efficiency droop » [86].

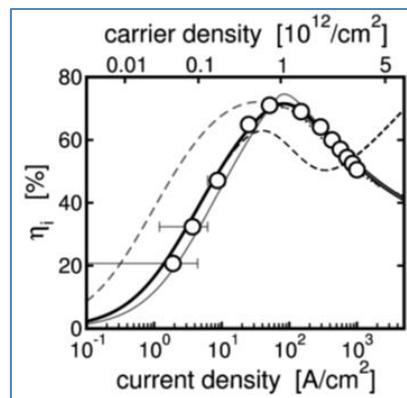


Figure 38 : Rendement quantique interne en fonction de la densité de courant à 22 °C [86]

C'est une caractéristique universelle liée au matériau composant la LED. Toutefois, ce phénomène est encore plus flagrant lorsqu'il concerne des LEDs devant émettre des longueurs d'onde proches du vert. Ce problème en outre, entraîne un ralentissement pour la généralisation de l'emploi des sources de lumière solide. Plusieurs mécanismes sont en cause pour cette chute d'efficacité, il peut y avoir les défauts cristallins [87-88], la recombinaison entraînant une dislocation [89], l'expulsion des porteurs hors de la zone active [90-91], la faible injection de trou [92], l'effet Auger [93 - 98] ou bien encore une combinaison de plusieurs phénomènes [99]. Toutefois, l'effet Auger est le plus problématique, car c'est un processus de recombinaison non-radiatif intrinsèque au matériau.

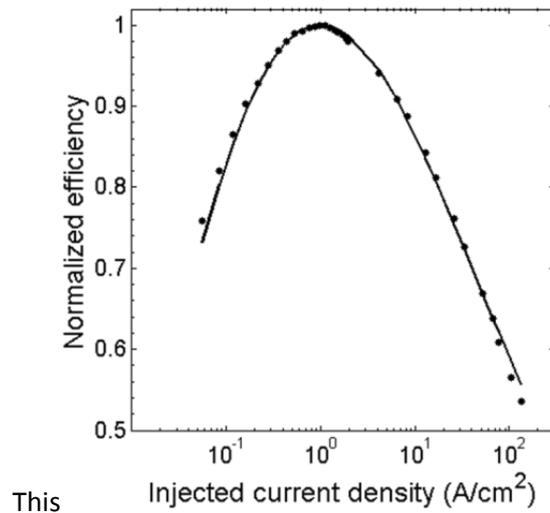


Figure 39 : Exemple d'efficacité quantique typique normalisée en fonction de la densité de courant dans une LED [84]

L'équation du rendement quantique (2,3) montre que plus le nombre de recombinaisons radiatives augmente, plus le rendement chute. Le rendement quantique d'une LED en fonction du niveau de courant qui la traverse part de zéro à niveau de courant très faible pour atteindre un maximum avant de chuter à nouveau en fonction de l'élévation du niveau de courant.

Bien que la plupart du temps, c'est plutôt le rendement lumineux qui est évalué, l'efficacité lumineuse et le rendement quantique sont aussi des indicateurs permettant de comprendre le comportement d'une LED.

2.3.2.3 L'impact de la température sur les LEDs

Il existe cependant une autre grandeur influençant les performances des LEDs : c'est leur température de fonctionnement interne et notamment au niveau de la jonction PN. Cette dernière influence directement le rendement quantique par exemple. Une bonne connaissance de l'origine de l'augmentation de la température et une bonne gestion de régulation thermique associée permet a priori de garantir de bonnes performances des luminaires à base de LED ainsi que leurs durées de vie.

En réalité, au-delà du rendement, les aspects thermiques impactent aussi la différence de potentiel aux bornes de chaque LED. Théoriquement, les LEDs peuvent être alimentées en tension ou en courant. Cependant l'application d'une tension fixe présente l'inconvénient d'entraîner un emballement thermique. En effet, lorsque la température de la LED augmente, la tension aux bornes de la LED décroît. Or, en fixant une tension de référence, il y aura obligatoirement une augmentation de température avec le passage du courant. Ce dernier induisant une diminution de tension devant être compensée par une hausse de courant d'alimentation pour arriver à maintenir le niveau de tension. Cet effet entraîne alors un emballement thermique parce qu'à la hausse de courant est associée une hausse de température jusqu'à la destruction du composant. Nous avons ainsi abandonné cette possibilité d'alimentation dans la suite de ce travail.

La commande en courant a par contre comme avantage de ne pas entraîner ce type de problème bien qu'il ne soit pas possible d'empêcher globalement l'augmentation de température en particulier celle liée aux pertes produites par la résistance équivalente série des LEDs.

La température dans une moindre mesure a aussi un impact sur l'efficacité lumineuse des LEDs. Des études ont montré qu'il y a une relation entre la température de la jonction interne d'une LED élémentaire et sa chute de rendement [100]. En recherchant l'équation décrivant l'efficacité des recombinaisons IQE, donnée par la formule 2.4, la température apparaît bien comme influençant ce phénomène physique. :

$$IQE = \frac{1}{1 + \frac{N_t \alpha_0 p}{N_l \beta n} \exp\left(\frac{E_t - E_l}{kT}\right)} \quad (2,4)$$

Avec :

N_l : densité énergétique des centres luminescents

N_t : densité énergétique des pièges

E_t : niveau d'énergie des pièges (eV)

E_l : niveau d'énergie des centres luminescents (eV)

k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

T : température (K)

Cette équation montre que l'efficacité sera d'autant plus élevée si la densité énergétique des centres luminescents N_l est très importante par rapport à la densité des pièges N_t et si la différence de potentiel $E_t - E_l$ est bien plus grande que kT . L'équation (2,4) montre qu'avec l'augmentation de la température, l'efficacité va d'autant plus décroître que la température va influencer le terme exponentiel de l'équation.

Globalement, si nous reprenons le comportement des quatre grandeurs en fonction du niveau de courant d'alimentation et de la température, les tendances à fonctionner à fort courant montrent que ce type de fonctionnement est très éloigné des points optimaux. C'est pourtant ce choix-là qui a été fait dans la plupart des luminaires à LED du commerce affichant un niveau de courant injecté de 350 mA, valeur qui paraît être une norme dans beaucoup de luminaires. La première raison est de diminuer le nombre de LEDs élémentaires pour un niveau d'éclairage donné pour en diminuer le prix et le rendre compétitif avec les autres modes d'éclairage. Aujourd'hui, même si l'objectif des fabricants est de pouvoir produire des luminaires à LED peu coûteux, les nouvelles normes sur l'impact de l'environnement en termes de consommation les obligent à repenser les luminaires dans leur conception. Obtenir un maximum de lumière pour un minimum de surface n'est ainsi plus le seul critère. Aujourd'hui le faible taux de consommation et la durée de vie du produit ont le même poids auxquels s'ajoutent la qualité lumineuse et la capacité à être recyclé.

Ainsi au-delà de l'efficacité lumineuse d'un dispositif, critère important en matière d'économie d'énergie, désormais l'indice de rendu des couleurs, la température de couleur ou encore la durée de vie du luminaire est importante pour les nouveaux luminaires. Étant donnée la complexité pour

adopter l'ensemble des critères et attribuer à chacun un poids de pondération donné, il est nécessaire de faire appel à des outils de simulation et/ou de CAO pour aider à la conception optimale des nouveaux luminaires. Ceci justifie la demande de nouveaux travaux de recherche en termes de modélisation et de méthodologie de conception.

2.4 Caractéristiques d'une LED fournies par les constructeurs

Comme nous avons décrit précédemment, une LED peut être considérée comme étant un empilement de plusieurs couches de matériaux, ces derniers sont déposés sur un wafer (une plaque en silicium avec des matériaux complémentaires) par évaporation dans un réacteur. La figure 40 montre un wafer après les diverses étapes technologiques nécessaires pour la création de LEDs. Les LEDs élémentaires sont en fait le résultat des découpes dans ce wafer. Elles subissent ensuite le dépôt d'une couche de luminophore afin d'obtenir une LED émettant de la lumière blanche. En fin de processus, les LEDs sont testées et classées en fonction de leurs performances.

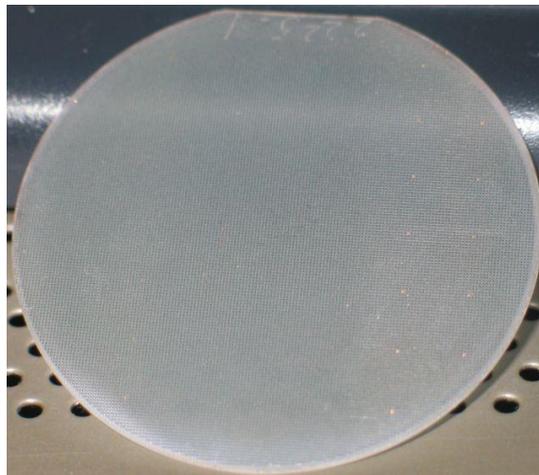


Figure 40 : Exemple de wafer servant à la conception de 20 000 LED avant découpe [101]

Chaque constructeur a son propre protocole de tests pour évaluer les performances des LEDs. La plupart du temps, il se base sur l'injection d'un courant de 350 mA. La mesure est soit faite en impulsionnel, soit en continu après stabilisation thermique. Les caractéristiques principales qui en ressortent sont la différence de potentiel de la jonction PN de la LED, le flux lumineux et la température de couleur. Il est possible selon le matériel disponible d'obtenir également la résistance thermique, l'angle d'ouverture du faisceau de lumière, le type d'optique secondaire (s'il y a) ou l'indice de rendu des couleurs.

Les grandeurs nécessaires pour pouvoir évaluer les LEDs entre elles sont principalement le flux et la tension à un courant de 350 mA. Au sein du Laplace, les mesures n'ont pas été faites en impulsionnel, car le spectromètre a besoin d'un certain temps pour faire la mesure de luminance. Elles ont donc été réalisées après avoir atteint un régime thermique permanent. Concernant les LEDs, dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à quelques-unes issues du commerce sélectionnées arbitrairement entre 3 fabricants parce qu'elles présentaient de bonnes caractéristiques. Il s'agit des

LEDs référencées XPG-G2 de CREE, des Lumileds LX18-P130-Y de Philips et des LCW KPKR-5R8T d’Osram.

Ensuite, nous avons ajouté d’autres LEDs également choisies en fonction de leurs très bonnes caractéristiques données par les constructeurs. Ainsi, les références XPG-L1 et MCE4WT de CREE ou les Luxeon de Philips ont également été évaluées. Le tableau ci-dessous résume les données fournies par les constructeurs concernant les valeurs de tension, flux lumineux et efficacité à 350 mA.

	XPG-G2	LX18-P130-Y	KPKR-5R8T	XPGWHT-FE5	MCE4WT	XPG-L1 CZ8	XPG-L1 BE7
Courant (mA)	0 – 1500	0 – 700	0 – 700	0 – 1500	0 – 700	0 – 1500	0 – 1500
Tension (V)	2,8	2,9	3,1	2,9	3,9	2,8	2,8
Flux lumineux (lm)	72	55	44	122	106	100	94
Efficacité Lumineuse (lm/W)	73,5	53,8	40,5	120	91,7	98,5	92
Température de couleur (K)	3500	3000	3000	4000	2700	2600	4700

Tableau 5 : Résumé des principales caractéristiques techniques des LEDs étudiées

2.5 Campagne de tests effectuée en laboratoire

Au sein du LAPLACE, du matériel de pointe est à disposition afin d’effectuer tous les tests nécessaires à la mesure des caractéristiques principales d’une LED ou d’une lampe. Pour les mesures sur des LEDs, une petite sphère d’Ulbricht de 20 cm de diamètre avec un sourcemètre Keithley 2602A afin de commander en courant. Pour les mesures sur des lampes, une sphère intégratrice de 2 m de diamètre est à disposition. Pour la calibration des sphères, une lampe à incandescence 64 476 BT SIL Opal 100 W est utilisée et le protocole de calibration suit les recommandations du standard LM 79-08.

Les tests expérimentaux effectués sous un courant d’alimentation de 350 mA et une température ambiante de 22 °C ont montré que les LEDs avaient bien des caractéristiques semblables aux données techniques. Toutefois, les XPG-L1 présentaient de meilleures performances que ce qui était inscrit dans les documentations. Les MCE4WT présentaient en revanche des caractéristiques inférieures à ce qui était annoncé.

	XPG-G2	LX18-P130-Y	KPKR-5R8T	XPGWHT-FE5	MCE4WT	XPG-L1 CZ8	XPG-L1 BE7
Tension (V)	3	2,92	3,13	2,83	12,94	2,83	2,83
Flux lumineux (lm)	72	55	44	182	427	149	171
Efficacité Lumineuse (lm/W)	69	54	40	158	94	129	148
Température de couleur (K)	3511	3028	3045	3711	2772	2655	4783

Tableau 6 : Caractéristiques mesurées des LEDs étudiées à 350 mA

Pour les LEDs moyennes (inférieure à 100 lm/W), il y a une cohérence entre les mesures et les caractéristiques techniques. Dans le cas de la LED MCE4WT, la différence en particulier sur la tension vient du fait qu'il s'agit en réalité de 4 LEDs combinées. En conséquence, en fonction de la manière de les connecter, il peut y avoir des différences significatives. Globalement, les LEDs avec une meilleure efficacité ont des caractéristiques mesurées supérieures aux documentations techniques.

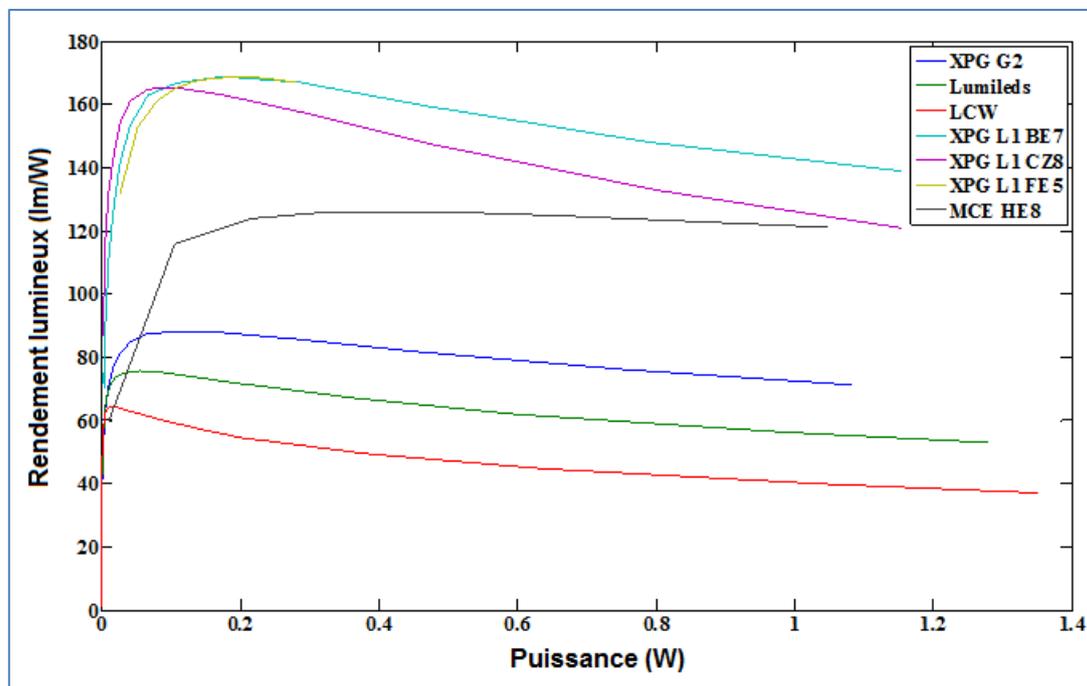


Figure 41 : Rendement lumineux en fonction de la puissance pour toutes les principales LEDs testées

2.5.1 Rappels des caractéristiques électriques issues de la littérature et connues

Pour aller plus loin dans les essais expérimentaux et mieux comprendre le comportement de ce type de composant, nous avons effectué des relevés expérimentaux des caractéristiques $I(V)$ en constatant qu'elles étaient proches de celles données par les constructeurs. Globalement pour une LED, son fonctionnement et ses caractéristiques statiques électriques sont proches de ceux d'une diode. Seuls les ordres de grandeur des caractéristiques électriques changent selon les études effectuées et le besoin de modélisation. Un exemple de courbe courant-tension, notée $I(V)$ est représenté sur la figure 42 pour une diode typique. Elle montre que la LED bloque le passage du courant jusqu'à une certaine tension de seuil de l'ordre de 2,8 V. Cette tension varie selon la technologie et les matériaux semi-conducteurs utilisés entre 1,5 à 3,8 V [102]. Une fois cette tension de seuil atteinte, le courant peut traverser la LED et elle peut commencer à émettre de la lumière.

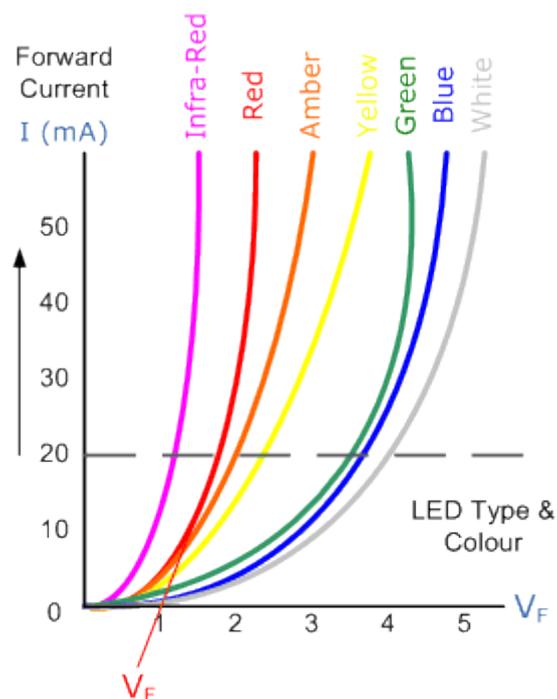


Figure 42 : Caractéristiques courant tension d'une LED pour différentes couleurs [68]

Un exemple de courbe $I(V)$ est représenté sur la figure 42 pour différentes couleurs. Elle montre que la LED bloque le passage du courant jusqu'à une certaine tension de seuil de l'ordre de 2,8 V. Cette tension varie selon la technologie et les matériaux semi-conducteurs utilisés entre 1,5 à 3,8 V [102]. Une fois cette tension atteinte, le courant traverse la LED et elle émet de la lumière.

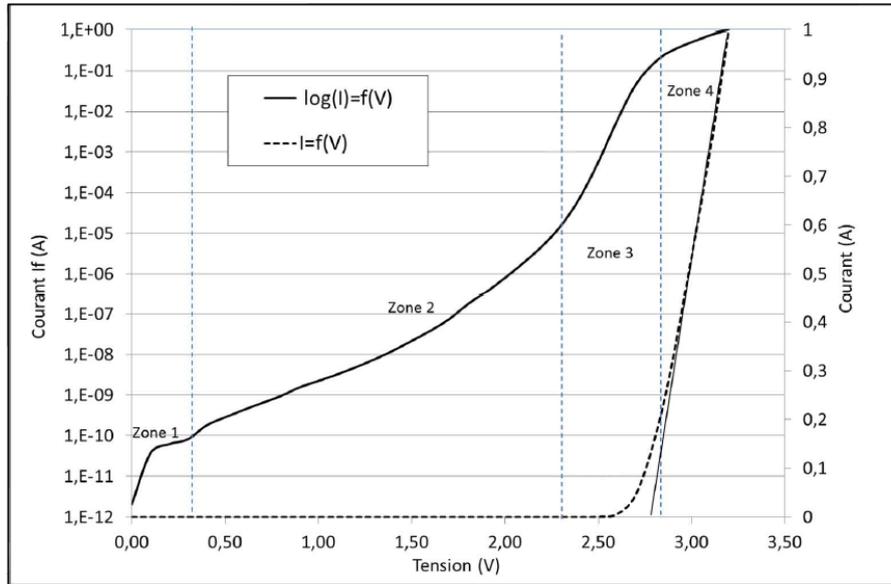


Figure 43 : Caractéristique typique d'une LED à 40 °C [103]

En observant la caractéristique $I=f(V)$ d'une LED, il est possible d'en déduire qu'elle a deux états de fonctionnement distincts. Le premier état est lorsque la LED est bloquée, le second lorsqu'elle est passante. Cependant, en observant cette même caractéristique et sous forme $\text{Log } I=f(V)$, il apparaît plutôt 4 régimes de fonctionnement décrits par exemple par [103] [104]. En 1950 [105], W. Shockley décrit le comportement des diodes à travers des équations pour le cas d'une diode parfaite, c'est-à-dire sans pertes. Il explique déjà qu'une diode passe par 4 étapes qu'il nomme :

Zone 1 : pour un courant inférieur au nano ampère, il y a très peu de porteurs libres à ce niveau de courant et donc il n'y a pas d'émission de lumière.

Zone 2 : pour un courant compris entre le nano ampère et le microampère, ce niveau de puissance commence à émettre de la lumière et théoriquement [60], le rendement quantique est maximum dans cette zone.

Zone 3 : pour un courant compris entre le microampère et le milliampère, la diode commence à se comporter comme une résistance électrique [106].

Zone 4 : pour un courant supérieur au milliampère, l'influence de la résistance est prépondérante sur le comportement de la LED.

En prenant l'approximation de l'équation de Shockley, nous pouvons dire que le courant traversant la LED dépend de la tension de jonction et de la température :

$$I \approx \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2,5)$$

Avec :

I : le courant traversant la diode (A)
q : la charge élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)
V : la tension aux bornes de la diode (V)
n : le coefficient d'émissivité
T : la température (K)
k : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹)

Il est possible d'identifier la zone lors du fonctionnement de la diode avec le coefficient d'émissivité. n = 2 pour la première zone, n = 1 pour la seconde zone et n est inférieur à 1 pour les zones 3 et 4.

2.5.2 Rappels des caractéristiques lumineuses issues de la littérature

Il existe un grand nombre de LED avec une gamme tout aussi variée de puissance et donc de flux lumineux émis. Les LEDs sont classées en 3 grandes catégories, elles-mêmes classées en fonction de la puissance consommée :

- Les LEDs de 1 W fournissent entre 70 et 130 lm pour un courant de 350 mA et une température entre 45 et 75 °C.
- Les LEDs entre 0,1 et 0,3W fournissent entre 15 et 55 lm pour des courants entre 30 et 150 mA et une température entre 45 et 75 °C.
- Les LED de puissance inférieure à 0,1 W fournissent entre 2 et 10 lm pour des courants entre 5 et 30 mA et une température entre 40 et 55 °C.

Les constructeurs proposent des graphiques faisant le lien entre les flux lumineux et les températures de fonctionnement. En outre, il est commun de considérer qu'en fonctionnement normal à 350 mA, la température de la jonction est de 85 °C.

2.5.3 Rappels des caractéristiques thermiques issues de la littérature

Les LEDs ont longtemps été considérées comme ne chauffant pas, car les modèles de 5 mm consomment très peu d'énergie. Dans ces conditions, la gestion de la chaleur émise n'était pas importante ni nécessaire. Les LEDs aujourd'hui ont des rendements qui peuvent atteindre plus de 40 % [79], cela implique qu'un peu moins de 60 % de l'énergie électrique introduite est perdu en chaleur. La chaleur comme cela a été présenté dans le paragraphe 2.3.4, a un impact non négligeable sur ces dernières (durée de vie et photométrie) et c'est pourquoi il est important de la dissiper. La gestion thermique d'une LED révèle d'autant plus son importance dans une application avec beaucoup de puissance utilisée. Bien qu'il s'agisse de la température de jonction qui affecte tous les autres paramètres, celui qui va influencer principalement cette température est la résistance thermique. En la connaissant, il est possible d'approximer la valeur de la température de jonction par la relation de Fourier :

$$T_j = T_{pad} + R_{th}(P_{elec} - P_{opt}) \quad (2,6)$$

Avec :

T_j : la température de jonction de la LED (°C)

T_{pad} : la température au niveau du pad thermique (°C)

R_{th} : la résistance thermique ($^{\circ}.W^{-1}$)

P_{elec} : la puissance électrique fournie à la LED (W)

P_{opt} : la puissance optique émise par la LED (W)

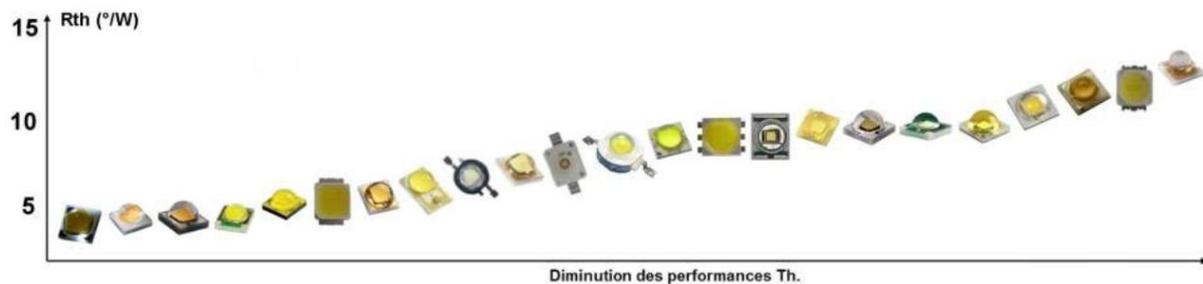


Figure 44 : La résistance thermique de plusieurs modèles de LED [76]

Cela implique qu'une LED avec une faible résistance thermique évacuera plus facilement la chaleur émise. La figure 44 montre que toutes les LEDs n'ont pas une résistance similaire même si elles sont toutes des LEDs de 1 W.

2.6 Modélisation d'une LED

Une LED peut être modélisée deux manières en vue d'une simulation. Soit elle sera représentée par un ou plusieurs éléments électriques (résistance et capacité). Soit elle le sera par une équation mathématique obtenue après ajustement. Le premier modèle a été obtenu en effectuant une spectroscopie d'impédance avec l'appareil Modulabs. Cette manière permet de fournir une représentation locale de la LED à partir de composant élémentaire. La seconde manière utilisera une équation après ajustement avec le logiciel Matlab de la courbe $I=f(V)$ de la LED.

Chaque modèle présente ses avantages et inconvénients. Le modèle composé d'éléments électriques est facile à mettre en œuvre sur quelques LEDs mais devient vite fastidieux lorsque le nombre de LED augmente. Il est aussi peu représentatif de la vérité au niveau de la dynamique de la LED. Les modèles obtenus à partir d'équation sont très précis et fonctionnent très bien dans les simulateurs. Cependant, ils sont compliqués à obtenir, car il faut des appareils de mesure précis et les logiciels en conséquence pour déterminer l'équation.

2.6.1 Modèle par spectroscopie d'impédance

Le premier modèle présenté est celui obtenu par spectroscopie d'impédance. L'appareil utilisé est le Modulabs du fabricant Solartron. Le processus de mesure consiste à envoyer une tension de polarisation continue dans un premier temps. Ensuite, une excitation alternative de 10 mV est envoyée permettant d'obtenir, le diagramme de Bode. Ce processus est répété en partant de 0 V, par incrément de 250 mV jusqu'à atteindre la valeur limite en courant du dispositif de mesure (100 mA).

En se concentrant sur l'impédance, il est possible de voir trois comportements :

Chapitre 2 : Les diodes électroluminescentes

- Dans un premier temps, une droite décroissance, représentative d'un comportement capacitif
- Dans un second temps, une droite horizontale qui se finit par un coude et suit le prolongement de la droite précédente. Ce qui est représentatif d'un circuit résistance en parallèle avec une capacité,
- Enfin, une suite de droites horizontales dont la valeur d'impédance diminue avec l'accroissement de la tension. Ce qui est représentatif d'une résistance pure.

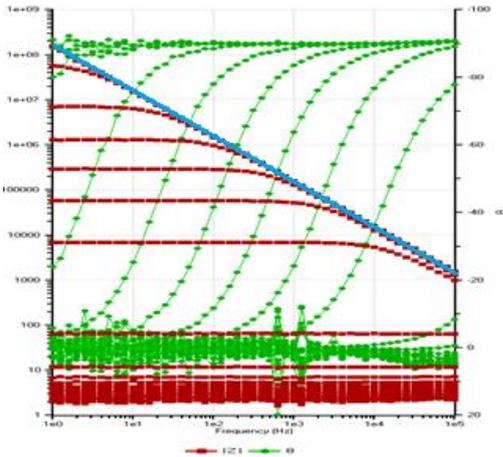


Figure 45a : Comportement capacitif de la LED

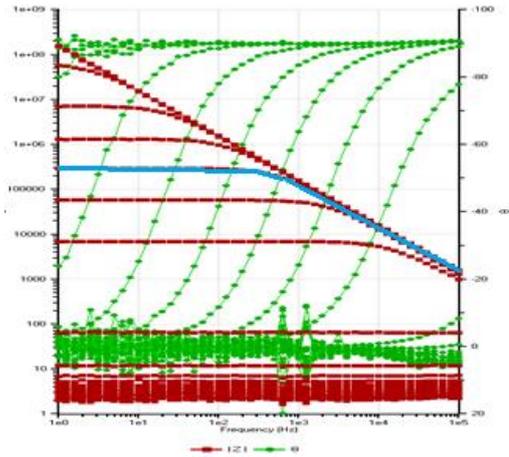


Figure 45 b : Comportement RC de la LED

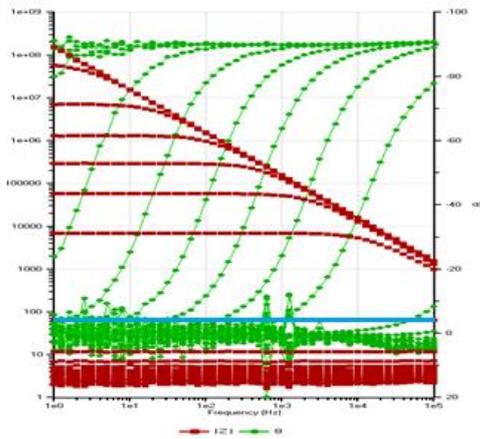


Figure 45c : Comportement résistif de la LED

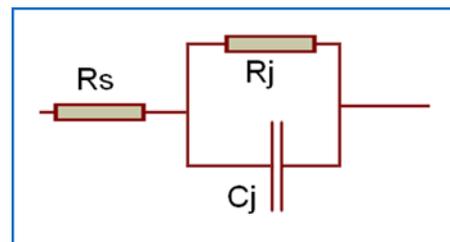


Figure 46 : Modèle électrique équivalent d'une LED

Le circuit équivalent peut donc être modélisé par une résistance en série avec une autre résistance et une capacité en parallèle. Ce modèle est introduit dans le logiciel de contrôle. Cela permet de déterminer par ajustement quelles sont les valeurs des composants. Cette méthode donnait des modèles qui n'étaient valables que pour un point de fonctionnement. Cependant les problèmes de répartition du courant entre les LEDs font qu'elles travaillent à des niveaux de puissances différents. En conséquence, il n'est pas possible par ce moyen d'arriver à quelque chose d'exploitable.

2.6.2 Modèle obtenu avec l'équation d'une Gaussienne pour l'ajustement

Suite aux problèmes rencontrés avec la modélisation électrique, un premier modèle mathématique a été mis en œuvre. L'objectif étant d'obtenir le comportement d'une LED grâce à une équation de type $V=f(I)$. Dans un premier temps, la LED est caractérisée suivant processus de caractérisation décrit en annexe. Ensuite, les valeurs de tension et courant sont introduites dans le logiciel Matlab. Ce dernier a un outil qui permet l'ajustement des données : cftool. Il est possible de choisir une fonction linéaire, polynomiale, ratio, trigonométrique ou encore gaussienne. Dans notre cas de figure, nous utiliserons une fonction décrite par l'équation :

$$y = f(x) = a * e^{\left(-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right)}$$

Avec :

a : l'amplitude,

b : le point au centre de la courbe,

c : la largeur de la courbe.

Modèle Gaussien
Coefficients pour un intervalle de confiance de 95 % :
a = 2 725 (2,72 ; 2,73)
b = 0,111 4 (0,105 1 ; 0,117 7)
c = 0,430 9 (0,407 3 ; 0,454 5)
Données complémentaires
R-square : 0,994 3
RMSE : 471e ⁻³

Tableau 7 : Caractéristique de l'ajustement avec une Gaussienne

L'outil de Matlab permet ainsi d'obtenir pour chaque courbe, un modèle avec 3 paramètres caractérisant la courbe et permettant de la reconstruire en simulation. Il fournit en données annexes la valeur du R — et l'erreur relative sur la valeur efficace. Cette équation a été choisie, car elle possède une propriété intéressante, qui est de pouvoir être inversée et le résultat est donné par l'équation :

$$x = f(y) = b - c * \sqrt{|\log(y) - \log(a)|}$$

Comme les LEDs sont commandées en courant, cela s'avère bien pratique de pouvoir l'inverser facilement. En outre, sa dérivée est évaluable, se faisant, le calcul des paramètres en temps réel ne requiert pas autant d'itération pour la convergence. Les algorithmes se trouvant dans l'alimentation auront moins de difficulté et le système pourrait réagir plus vite à une consigne ou une perturbation.

2.6.3 Modèle obtenu avec l'équation de Shockley pour l'ajustement

Le second modèle mis en œuvre est le modèle Shockley qui prend ses racines dans l'équation de W. Shockley qui définit pour une jonction la relation entre le courant et la tension pour une diode idéale. Elle est définie par :

$$I = I_s \left(e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - 1 \right) \quad (2,7)$$

L'équation de diode idéale Shockley est obtenue en prenant l'hypothèse que les seuls processus générant du courant dans la diode sont la dérive (due au champ électrique), la diffusion et la génération de recombinaison non radiative. Il suppose également que le courant de recombinaison dans la région de déplétion de la jonction est très faible. En outre, il faut noter que cette équation ne décrit pas le comportement de la courbe I-V à « haute polarisation directe » où la résistance interne série prédomine.

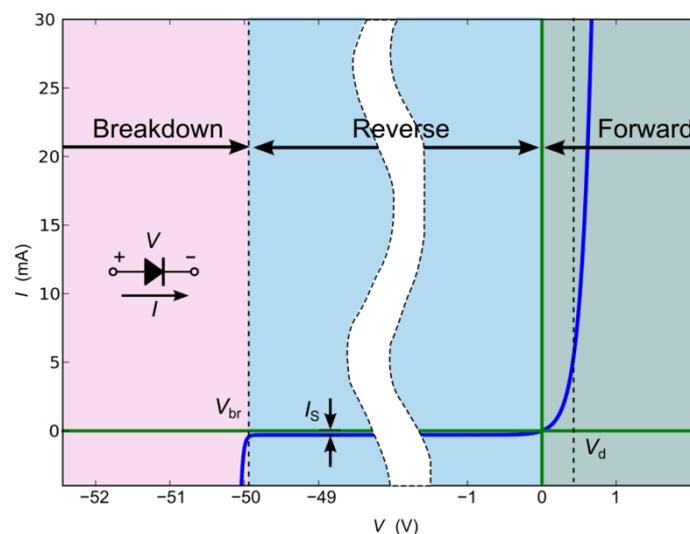


Figure 47 : Caractéristique d'une diode [107]

La région de claquage (breakdown) n'est pas modélisée par l'équation. De plus, la région inverse (reverse) est considérée comme négligeable. Le courant qui apparaît dans cette région est le courant de saturation I_s . Pour de petites valeurs de tension appliquées, l'exponentielle de cette polarisation

est prépondérante par rapport au facteur « 1 ». Cela permet ainsi de pouvoir approximer l'équation par :

$$I = I_s e^{\left(\frac{qV_D}{nkT}\right)} \quad (2,8)$$

L'équation de Shockley modélise le comportement d'une diode parfaite, or pour notre application, il est nécessaire de faire intervenir au minimum l'influence de la résistance série. C'est pourquoi :

$$V_D = V_d + R_s * I \quad (2,9)$$

Avec :

V_D : la tension de la diode réelle (V)

V_d : la tension de la diode parfaite (V)

R_s : la résistance série de la LED (Ω)

Les LEDs étant contrôlées en courant dans nos tests et pour nos applications, en conséquence, l'équation inversée est :

$$V_D = \frac{nkT}{q} \ln(I) - \frac{nkT}{q} \ln(I_s) + R_s I \quad (2,10)$$

Avec :

I_s = le courant de saturation (A)

q = la charge électronique (C)

n = le coefficient d'émission

k = la constante de Boltzmann ($m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

T = la température en degré Kelvin (K)

R_s = la résistance série de la LED (Ω)

Pour les premières étapes, le processus est similaire à celui du modèle Gaussien. C'est-à-dire qu'il faut appliquer une rampe en courant, mesurer la tension et insérer les données dans l'outil Matlab. La différence va se situer dans l'équation qui va être implémentée qui correspondra à celle présentée précédemment. Elle sera sous la forme :

Ce dernier a un outil qui permet l'ajustement des données. Durant l'opération, il est possible de choisir quel genre de courbe est utilisée pour atteindre l'objectif. Il est possible de choisir une fonction linéaire, polynomiale, ratio, trigonométrique ou encore gaussienne. Dans notre cas de figure, nous utiliserons une fonction décrite par l'équation :

$$y = f(x) = a * \log(x) - a * b + c * x \quad (2,11)$$

Le facteur 0,026 correspond à $\frac{kT}{q}$ pour T = 27 °C dans le silicium et porte le nom de tension thermodynamique. Le coefficient a apparait deux fois dans l'équation, car il faut découpler le facteur a et b. Les coefficients extraits de l'outil peuvent être exploités, mais ils n'ont pas de sens physique. Il est nécessaire de les convertir pour qu'ils correspondent au courant de saturation, à la résistance série et au coefficient d'émission et de vérifier la cohérence des résultats :

$$a = 0,054\ 45 \Leftrightarrow n = 2\ 094$$

$$b = -51,66 \Leftrightarrow J_s = 3,667\ e^{-23}$$

$$c = 0,460\ 6 \Leftrightarrow R_s = 409\ e^{-3}$$

Modèle Shockley
Coefficients pour un intervalle de confiance de 95 % :
a = 0,054 45 (0,054 ; 0,054 91)
b = -51,66 (-52,05 ; -51,26)
c = 0,409 6 (0,399 1 ; 0,420 1)
Données complémentaires
R-square : 1
RMSE : 274 e ⁻⁶

Tableau 8 : Caractéristique de l'ajustement

Le coefficient d'émission de 1,318 est cohérent pour une LED et traduit un fonctionnement dans la zone dite de haute injection juste avant la zone où le comportement de la résistance série prédomine. Le courant de saturation de 2,125 e⁻³⁶ est un peu inférieur aux valeurs courantes qui sont plutôt en exponentiel moins 21 ou moins 24 rencontré sur les autres LEDs. La résistance série de 460 mΩ est aussi cohérente avec les valeurs qui ont été mesurées jusqu'à présent.

Influence de la température pour la modélisation :

Dans les deux cas de figure, l'influence de la température n'a pas été implémentée dans les modèles. La raison est qu'à ces niveaux de courant, la température passe de 22 °C à 30 °C au bout d'une heure et reste ensuite sans variations même après 8 heures de fonctionnement. Or, la documentation technique précise qu'il y a une diminution de 4 mV par degré d'augmentation. Cela implique que sur 2,72 V à 40 mA, il y a 20 mV de chute soit moins d'un pourcent d'effet. L'effet de la température est donc considéré comme non impactant à ce niveau.

Comparaison des modèles avec les mesures :

Une fois les modèles mis au point pour une LED élémentaire, ils ont été insérés dans le simulateur de circuit Psim et une comparaison a été effectuée en programmant une rampe en courant.

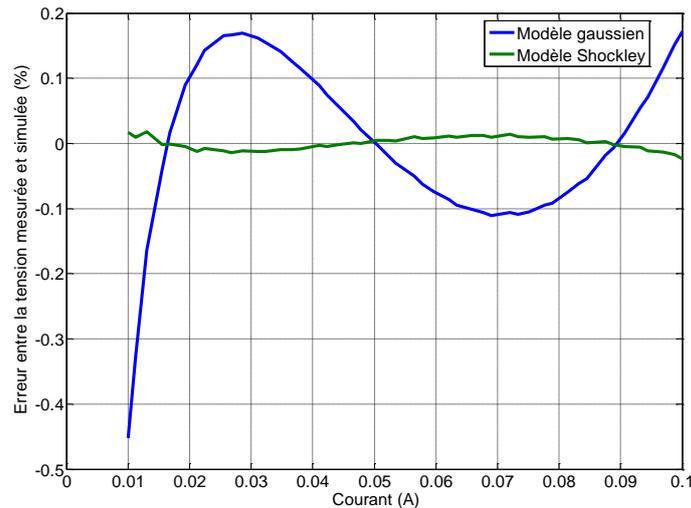


Figure 48 : Erreur relative de la tension simulée pour le modèle

La figure ci-dessus montre l'erreur relative entre la tension mesurée et celle simulée dans Psim. Il est possible de voir que l'erreur est très proche de 0 sur la rampe 1-100 mA dans les deux cas de figure. Ce modèle pourrait convenir sans problème à notre application. Cependant, il ne faut noter que les LEDs ne sont jamais seules dans un circuit pour l'éclairage. C'est pourquoi il faut maintenant comparer avec plusieurs LEDs connectées respectivement en série et en parallèle.

2.7 Conclusion

Les LEDs lors de leur réalisation peuvent répondre à divers types de besoin, qu'il soit en termes de puissance lumineuse, de couleur émise ou de température de couleur. En ajustant le matériau et le dopage, elles peuvent couvrir presque toutes les longueurs d'onde nécessaires et en conséquence émettre suivant un grand panel de couleur. En adaptant la composition chimique du luminophore placé devant le semi-conducteur, il est possible d'avoir des LEDs rayonnant une lumière blanche pouvant être l'égal à la température de couleur d'une lampe à incandescence, c'est-à-dire, un blanc chaud à 2700 K. À l'inverse, il est aussi possible d'obtenir un blanc « bleuté » très froid avec une température de couleur pouvant être supérieure à 10 000 K. Un processus de caractérisation complexe a été mis en place afin de pouvoir évaluer avec précision les paramètres clés d'une LED achetée en tenant compte des paramètres sensibles comme la température. Il a été constaté que bien que l'efficacité a tendance à chuter rapidement après quelques dizaines de milliampères, les courants de fonctionnement des LEDs utilisées de nos jours restent très loin de la valeur de rendement maximal. Cela s'explique par le fait qu'une faible densité de courant implique qu'une grande surface de LED est nécessaire pour avoir le flux lumineux requis. Or le processus de fabrication est complexe et par conséquent onéreux. L'objectif est donc de pouvoir avoir le maximum de lumière émise pour le minimum de matière utilisée. Après caractérisation, un modèle basé sur une équation est dressé. L'ajustement est effectué selon 3 paramètres et après insertion de l'équation dans un simulateur de circuit, le résultat montre que le modèle et les mesures sont très semblables.

Référence

- [58] http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/res/k_fig_04.jpg
- [59] <http://www.imagesco.com/articles/photovoltaic/ledW.jpg>
- [60] Physics of Semiconductor Devices, S.M. Sze, Kwok K. Ng
- [61] Solid State Physics, Neil W. Ashcroft, N. Mermin
- [62] Fundamentals of semiconductors: Physics and materials properties, P.Y. Yu, Manuel Cardona
- [63] <http://cellule-photovoltaique.e-monsite.com/medias/images/bande-interdite-valence-et-conduction-copie.jpg>
- [64] Étude du dopage de matériaux covalents cages nanostructurés, Florent Tournus
- [65] Dopage par modulation d'hétérostructures de semiconducteurs II-VI semimagnétiques en épitaxie par jets moléculaires, Alexandre Arnoult
- [66] http://lms.epfl.ch/files/content/sites/lms2/files/lectures/solid/cours/Chapitre_7.pdf
- [67] https://sites.google.com/site/pengchenhomepage/_/rsrc/1403551931127/wikipage/absorption_coe_f/Direct%20Indirect%20band%20gap.jpg?height=195&width=364
- [68] http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html
- [69] Graphène épitaxié sur SiC : dopage et fonctionnalisation, Emilio Velez
- [70] H.P. Maruska & J.J. Tietjen, Appl. Phys. Lett. 15, 327 (1969)
- [71] J.I. Pankove, J. Lumin. 7, 114 (1973)
- [72] A. Y. Cho & J. R. Arthur, Prog. Solid State Chem. 10, 157 (1975).
- [73] H.M. Manasevit, F.M. Erdman & W. I. Simpson, J. Electrochem. Soc. 118, 1864 (1971).
- [74] S. Yoshida, S. Misawa & S. Gonda, Appl. Phys. Lett. 42, 427 (1983).
- [75] H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda & Y. Ishii, *J. Lumin.* **40 & 41**, 121 (1988).
- [76] <http://www.led-development.fr/Technologie-LED>
- [77] <http://bitesizebio.com/19629/fluorescence-101-a-beginners-guide-to-excitation-emission-stokes-shift-jablonski-and-more/>
- [78] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838804010710>
- [79] <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6294800.pdf>
- [80] <http://luxreview.com/article/2016/02/led-inventor-bets-on-lasers-to-replace-leds>
- [81] <http://www.ledsmagazine.com/articles/2011/11/lasers-could-offer-alternative-to-led-light-sources.html>
- [82] <http://www.ledsmagazine.com/articles/2016/03/cree-demonstrates-134-lm-w-packaged-led-with-incandescent-quality.html>
- [83] https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=21&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiOwlfzqcPPAhUBlhQKHTkEDIo4ChAWCD8wCg&url=http%3A%2F%2Fwww.cnrs.fr%2Fpublications%2Fimagesdelaphysique%2Fcouv-PDF%2FIdP2006%2F14_Diodes_electrolumin.PDF&usq=AFQjCNGiebmcYAC3OcXOO4ju9fZrtdKaQ&sig2=TSU-6hrm7R3abfz6xfgxnw&bvm=bv.134495766,d.d2s
- [84] Étude et optimisation de l'émission et de l'extraction de lumière des nanofils semiconducteurs grand gap : application à des dispositifs électroluminescents, Henneghien Anne-Line.
- [85] <https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjyKPD6qKLPAhWD7xQKHZHD5cQFgghMAA&url=http%3A%2F%2Fapps1.eere.energy.gov%2Fbuildings%2Fpubli>

[cations%2Fpdfs%2Fssl%2Fweisbuch_droop_tampa2014.pdf&usg=AFQjCNGobVhKDLE0TcOumZzS1NG2_yrM7g&sig2=hTf6H79xQsk50U7YUp1e-w&cad=rja](#)

- [86] Temperature and carrier-density dependence of Auger and radiative recombination in nitride optoelectronic devices, Emmanouil Kioupakis, Qimin Yan, Daniel Steiauf and Chris G Van de Walle
Piprek J 2010 Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes Phys. Status Solidi a 207 2217–25
- [87] Hader J, Moloney J V and Koch S W 2010 Density-activated defect recombination as a possible explanation for the efficiency droop in GaN-based diodes Appl. Phys. Lett. 96 221106
- [88] Bochkareva N I, Voronenkov V V, Gorbunov R I, Zubrilov A S, Lelikov Y S, Latyshev F E, Rebane Y T, Tsyuk A I and Shreter Y G 2010 Mechanism of the GaN LED efficiency falloff with increasing current Semiconductors 44 794–800
- [89] Monemar B and Sernelius B E 2007 Defect related issues in the ‘current roll-off’ in InGaN based light emitting diodes Appl. Phys. Lett. 91 181103
- [90] Kim M-H, Schubert M F, Dai Q, Kim J K, Schubert E F, Piprek J and Park Y 2007 Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes Appl. Phys. Lett. 91 183507
- [91] Dai Q, Shan Q, Wang J, Chhajed S, Cho J, Schubert E F, Crawford M H, Koleske D D, Kim M-H and Park Y 2010 Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes Appl. Phys. Lett. 97 133507
- [92] Xie J, Ni X, Fan Q, Shimada R, O’zgu’r U and Morkoc, H 2008 On the efficiency droop in InGaN multiple quantum well blue light emitting diodes and its reduction with p-doped quantum well barriers Appl. Phys. Lett. 93 121107
- [93] Gardner N F, Mueller G O, Shen Y C, Chen G, Watanabe S, Gotz W and Krames M R 2007 Blue-emitting InGaN–GaN double-heterostructure light-emitting diodes reaching maximum quantum efficiency above 200 A cm⁻² Appl. Phys. Lett. 91 243506
- [94] Shen Y C, Mueller G O, Watanabe S, Gardner N F, Munkholm A and Krames M R 2007 Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence Appl. Phys. Lett. 91 141101
- [95] Maier M, Köhler K, Kunzer M, Pletschen W and Wagner J 2009 Reduced nonthermal rollover of wide-well GaInN light-emitting diodes Appl. Phys. Lett. 94 041103
- [96] David A and Grundmann M J 2010 Droop in InGaN light-emitting diodes: a differential carrier lifetime analysis Appl. Phys. Lett. 96 103504 New Journal of Physics 15 (2013) 125006 (<http://www.njp.org/>) 13
- [97] Laubsch A, Sabathil M, Baur J, Peter Mand Hahn B 2010 High-power and high-efficiency InGaN-based light emitters IEEE Trans. Electron Devices 57 79–87
- [98] Phillips W A, Thrush E J, Zhang Y and Humphreys C J 2012 Studies of efficiency droop in GaN based Phys. Status Solidi c 9 765–9
- [99] Saguatti D, Bidinelli L, Verzellesi G, Member S, Meneghini M, Meneghesso G, Zanoni E, Butendeich R and Hahn B 2012 Investigation of efficiency-droop mechanisms in multi-quantum-well InGaN/GaN blue light-emitting diodes IEEE Trans. Electron Devices 59 1402–9
- [100] Deppner M, Romer F and Witzigmann B 2012 Auger carrier leakage in III-nitride quantum-well light emitting diodes Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett. 6 418–20
- [101] <http://ieeexplore.ieee.org/document/1425691/?part=1>
- [102] <http://ledmuseum.candlepower.us/ninth/wafer1.jpg>
- [103] <http://etronics.free.fr/dossiers/analog/analog12/diodeled.htm>
- [104] Etude de la fiabilité de modules à base de LEDs blanches pour applications automobile, Bertrand Chambion
- [105] G.F. Neumark Rothschild, *US patent* 5252499 (1988).

[106] H. Murakami, T. Asahi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki & I. Akasaki, *J. Crystal Growth* **115**, 648 (1991).

[107] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode#/media/File:Diode-IV-Curve.svg>

Chapitre 3 : Caractérisation, modélisation et impact des topologies

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons examiné le fonctionnement d'une LED élémentaire à partir de sa constitution technologique en quantifiant l'impact d'un certain nombre de paramètres comme la température, la tension et le niveau de courant. Dans ce chapitre, nous abordons les premiers éléments pour constituer un luminaire de LEDs complet. Nous présentons ainsi notre approche effectuée dans sa globalité pour mieux comprendre les performances lumineuses du luminaire et voir où des améliorations sont aujourd'hui possibles par rapport à l'existant. La LED élémentaire ne fournissant qu'un faible flux à elle seule, elle doit être associée avec d'autres pour fournir un flux lumineux équivalent à une ampoule à incandescence par exemple. La manière d'associer ces LEDs élémentaires joue toutefois sur la facilité de réalisation du luminaire complet, sa fiabilité, son niveau de tension d'alimentation ou encore son rendement lumineux. Trois topologies ont été plus particulièrement étudiées afin de mieux comprendre leurs avantages et leurs inconvénients et surtout voir lesquelles pourraient bénéficier d'améliorations afin d'offrir un meilleur compromis lors de la réalisation d'un prototype à LED en laboratoire. Pour cela, l'approche modélisation d'une LED élémentaire abordée au chapitre précédent devrait être validée expérimentalement dans une approche globale quelle que soit la topologie. Ceci devrait permettre ensuite de créer de nouveaux luminaires plus aisément et d'en comparer les performances en tenant compte d'une approche multicritère. Pour la conception du prototype complet du luminaire présenté au chapitre suivant, une étude du comportement global électrique par topologie a été réalisée pour examiner notamment les causes de répartition des courants dans les différentes LED. Cela nous a mené à effectuer une étude de la disparité des composants issus du même wafer afin d'évaluer la qualité et la reproductibilité des LEDs fabriquées en grande série. Tous ces problèmes sont encore par ailleurs négligés dans les luminaires industriels malgré des contrastes de lumière pouvant être importants voir impactant négativement la personne travaillant sans compter les progrès potentiels en termes de fiabilité et de réduction de consommation électrique potentielles s'ils étaient pris en considération dès la conception. D'autant plus si chaque LED élémentaire arrive à fonctionner à son régime optimal en termes de compromis courant/production lumineuse, un progrès important peut être fait sur les luminaires à base de LEDs. Nous donnons dans ce chapitre les premiers résultats obtenus expérimentalement et la méthodologie employée pour se doter de modélisation de luminaires complets.

3.2 Les luminaires

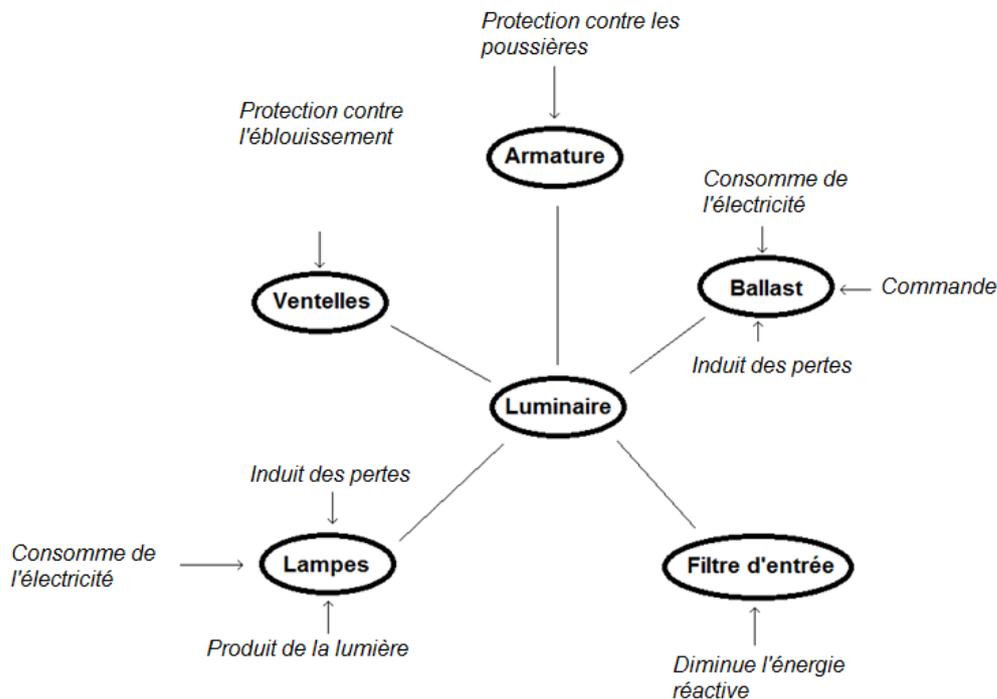


Figure 49 : Les différentes fonctions élémentaires d'un luminaire

La CIE définit un luminaire comme un appareil servant à répartir, filtrer ou transformer la lumière émise par les sources de lumière qu'il contient. Un luminaire complet comprend diverses pièces comme une armature, des réflecteurs, des ailettes, un ballast, un guide d'onde ou encore un starter nécessaires pour fixer et protéger les sources lumineuses et les relier à un ou plusieurs circuits d'alimentation. Dans le cas d'un luminaire à LED, les sources lumineuses sont constituées par de multiples composants semi-conducteurs. Il existe plusieurs géométries de luminaire en fonction des contraintes environnementales ou de l'ambiance souhaitée. Nous pouvons ainsi trouver des luminaires dits suspendus, encastrables dans un plafond, protégé pour les environnements extérieurs, encastrables au sol ou encore en mural. Chacun va ensuite modéliser la lumière en intensité et en rendu de couleurs en fonction du besoin afin d'avoir une lumière qui pourra être comprise entre un rendu dit direct intensif ou indirect extensif avec toutes les nuances possibles selon la classification proposée en figure 48. En ce qui concerne les LEDs, ce type d'éclairage permet de couvrir une large gamme de besoins.

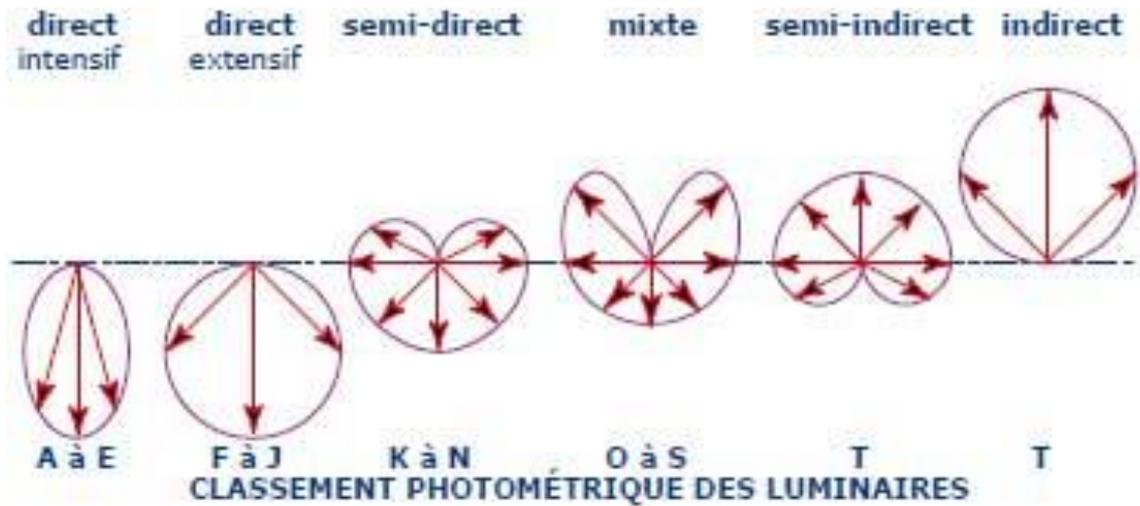


Figure 50 : Les différentes classes de luminaire [112]

Une lumière de type direct intensif est plutôt utilisée lorsqu'il faut focaliser la source vers l'éclairage d'une œuvre d'art ou d'un bâtiment par exemple. Un éclairage dit direct extensif est nécessaire pour les activités nocturnes comme les concerts ou un stade de sport. Les classes semi-directes/indirectes ou mixtes ne privilégient pas de situation particulière. Un éclairage indirect a toutefois l'avantage de ne pas éblouir les personnes mais est très dépendant du coefficient de réflexion. Dans le cas de lampes à incandescence conventionnelles, elles émettent dans toutes les directions (sur 2π stéradian). Il est alors assez simple de pouvoir réorienter le flux lumineux. Pour les LEDs qui ont une émission de lumière très intensive et directe sur une direction donnée, leur orientation est donc délicate à mettre en œuvre et un paramètre très important à prendre en compte pour atteindre la même qualité de service qu'une ampoule même s'il faut les associer à des lentilles pour augmenter l'ouverture de leur faisceau. Le luminaire à LED s'avère être globalement plus complexe qu'un équivalent à incandescence ou à tubes fluorescents. Aujourd'hui beaucoup de produits existent sur le marché visant à remplacer progressivement les autres sources lumineuses. Cependant, ils souffrent d'une consommation électrique importante ainsi que d'une durée de vie souvent plus courte que celle préconisée par le constructeur. Pour effectuer des optimisations et augmenter les fonctionnalités de ces nouveaux types de luminaires, il a été nécessaire d'effectuer des études en laboratoire sur l'association des LED, la quantité de lumière globale émise, en fonction du rendement lumineux et de la consommation électrique globale. Les LEDs émettant de manière unidirectionnelle, nous aborderons les aspects réflexion et guidage de la lumière une fois les optimisations précédentes effectuées.

3.3 Topologies de LEDs existantes dans les luminaires du commerce

Dans les luminaires existants examinés, il ressort principalement trois manières de connecter des LEDs pour atteindre le niveau de flux lumineux requis. Nous les nommons respectivement topologie série, topologie matrice non connectée et topologie matrice connectée. La topologie série consiste à associer les LEDs électriquement en série de telle sorte qu'elles soient traversées

par le même courant d'alimentation, la topologie matrice non-connectée correspond à des chaînes de LED mises en série, elles-mêmes mises en parallèle. La topologie matrice connectée fait appel à des chaînes de quelques LED en série mises en parallèle comme dans le cas précédent, cependant l'ensemble est mis à nouveau en série créant ainsi une interconnexion des LEDs. Dans le cas de la matrice non connectée, l'ajout de certains éléments par exemple des résistances d'équilibrage est nécessaire pour équilibrer les courants. En étudiant plusieurs luminaires ou lampes à LED, il est apparu que la topologie matrice non-connectée est la topologie la plus utilisée dans les applications commerciales comme le montre la figure 51.

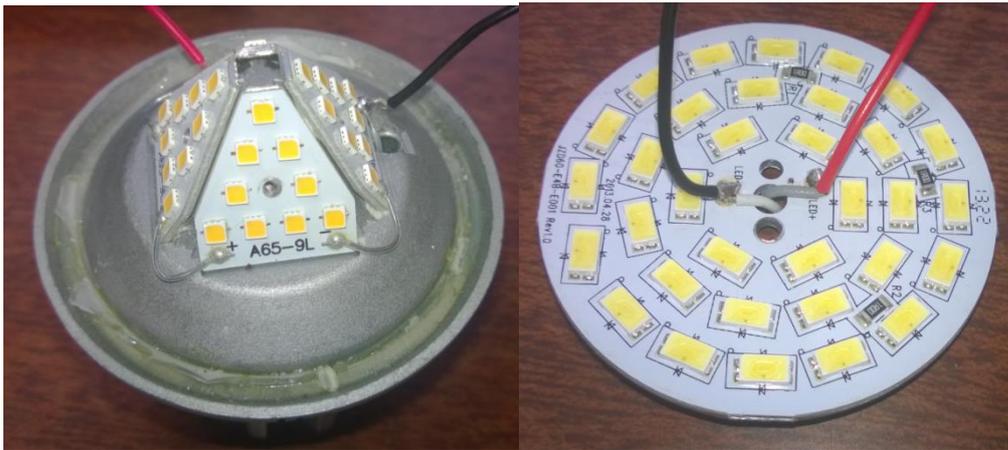


Figure 51 : Deux exemples d'association de LEDs présentes dans des luminaires complets du commerce assemblées en matrice non connectée

Ce choix semble avoir été dicté par la simplicité de mise en œuvre de la topologie et son principal avantage vis-à-vis de défaillances du type rupture en contact ouvert d'une LED élémentaire. En effet, lorsque le luminaire à LED de type matrice non-connectée présente ce type de défauts, il perd une chaîne de LEDs mais peut continuer à fonctionner en mode dégradé sans perdre plus que quelques pourcents du flux émis. Le compromis le plus privilégié dans ce type d'assemblage est d'utiliser plusieurs chaînes de 3 LEDs en série pour atteindre une dizaine de volts de tension d'alimentation et réduire les problèmes d'équilibrage. Cependant, nous n'avons pas pu comparer au-delà les trois types de luminaires avec les mêmes LEDs pour en déduire les informations nécessaires à leurs modélisations et nous ne pouvons pas directement comparer leurs performances en termes de rendement lumineux puisque chaque type de luminaire fait appel à des LEDs spécifiques agencées différemment et dans un environnement optique et d'alimentation spécifique à chaque constructeur. Ceci a déclenché la nécessité d'élaborer des plans d'expérimentations comparatifs avec le développement de maquettes spécifiques pour pouvoir recueillir des mesures fiables comme expliqué dans la suite de ce chapitre.

3.4 Présentation des topologies étudiées en laboratoire

3.4.1 La topologie série

La topologie série est la plus simple à être mise en œuvre. Il suffit de relier électriquement les LEDs entre elles comme le montre la figure 52 et de les alimenter par un même courant.

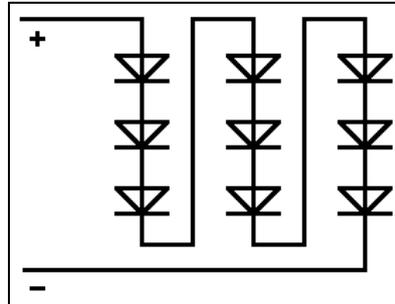


Figure 52 : Schéma de connexion de LEDs en série

Nous avons fait le choix d'étudier la topologie série malgré son principal défaut lié à un besoin d'alimentation en tension élevée. En effet, cette dernière constitue une référence dans le domaine, car c'est celle qui a été utilisée en premier. Au-delà de son principal avantage d'alimenter toutes les LEDs par un même courant, elle présente très peu de déséquilibres lumineux d'une LED à l'autre lorsque tout fonctionne correctement. En sélectionnant le courant le plus adapté, cela nous permet par exemple d'avoir toutes les LEDs fonctionnant à leur efficacité maximale ou bien d'augmenter considérablement le flux lumineux émis. Cependant, malgré ces avantages, elle n'est pas utilisée dans les dispositifs commerciaux à cause :

- Du lien direct entre la tension à appliquer et le nombre de LEDs rendant complexe une gamme de produits de plusieurs niveaux d'éclairage sans compter qu'au-delà d'un certain nombre de LEDs, la tension d'alimentation peut s'avérer dangereuse (50V).
- De la fragilité de la structure complète qui en cas de défaillance d'une seule LED par rupture de contact électrique par exemple, peut s'arrêter de fonctionner réduisant d'autant la durée de vie de l'ensemble.

3.4.2 La topologie matrice non-connectée

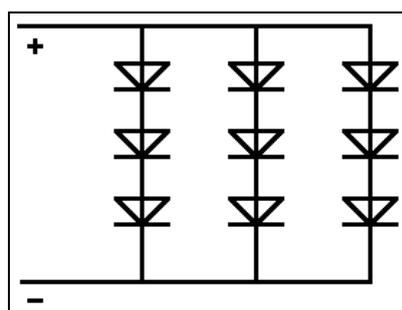


Figure 53 : Schéma de connexion de LEDs agencées en matrice non connectée

La seconde topologie que nous avons décidé d'étudier est une des plus répandues dans le commerce : elle est nommée matrice non connectée et est représentée dans la figure 53. Pour cette topologie, l'ensemble des LEDs est réparti sur plusieurs chaînes de LEDs en série de plus faibles nombres que dans la version topologie série. Ces chaînes sont connectées ensemble en parallèle pour être alimentées sous une même tension. Cette façon de faire permet de remédier aux deux inconvénients cités précédemment pour la connexion de LED en série. Cependant, cette topologie présente par la dispersion des paramètres électriques des composants dès leur conception, des disparités importantes de courants dans les différentes branches. Ces disparités se traduisent par des différences de flux lumineux, d'efficacité et de température de fonctionnement entraînant une mauvaise qualité de rendu lumineux et une durée de vie de l'ensemble, bien que meilleure que précédemment écourtée sur les LEDs subissant le plus fort courant d'alimentation. Il existe ainsi une solution simple qui consiste à ajouter des résistances d'équilibrage pour chaque ligne de LED diminuant d'autant les disparités de courant et de température mais engendrant une chute significative du rendement de l'ensemble. En effet, ces résistances d'équilibrage sont traversées par chaque courant de branche et présentent pas mal de pertes ohmiques selon leurs valeurs. Nous avons décidé de ne pas étudier ce cas de compensation qui empêche toute optimisation du rendement lumineux. Par contre, nous faisons appel à un jeu de LEDs provenant du même wafer pour éviter au maximum toute disparité.

3.4.3 Matrice connectée

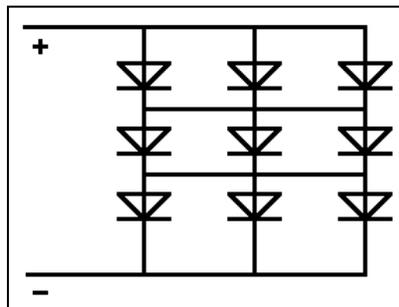


Figure 54 : Schéma de connexion des LEDs en matrice connectée

La dernière topologie que nous avons décidé d'étudier est une variante de la précédente à laquelle nous ajoutons des connexions interbranches pour assurer l'équilibrage des courants. Nous la nommons matrice connectée. L'un des avantages de cette topologie est d'être très fiable lors d'un souci sur une LED notamment en cas de rupture de contact. Les autres LEDs sont en effet faiblement affectées par ce changement et nous avons observé lors des premiers tests effectués que cette association est celle qui permet d'obtenir le meilleur rendement lumineux. Toutefois, nous n'avons pas trouvé d'utilisation de ce type de topologie sur des luminaires à LEDs du commerce ni de références bibliographiques mentionnant ses performances. Une des raisons est qu'en cas d'incident de rupture sur une ou plusieurs LEDs alimentées à courant d'alimentation normé de 350 mA (voir à courant plus élevé sur certains luminaires choisissant de faire des économies de LEDs), le courant traversant un niveau devant rester le même d'un niveau à l'autre,

une répartition du courant sur les LEDs restantes devra s'effectuer. Les autres LEDs des branches alimentées sous la même tension sont alors soumises à une surintensité entraînant une élévation de température de jonction de chaque LED encore valide, donc un vieillissement plus rapide, et à terme un grand nombre de pannes successives. Une autre raison est peut-être que la mise en œuvre s'avère plus complexe que la matrice non connectée.

3.4.4 Première synthèse comparative

Critère/topologie	Série	Matrice non connectée	Matrice connectée
Facilité de réalisation	++	+ —	--
Fiabilité	--	+ —	++
Répartition du courant	++	+ —	--
Efficacité	+ —	--	++
Niveau de tension	--	+ —	+ —

Tableau 9 : Caractéristique des topologies

Nous pouvons avec les informations constructeurs dresser un tableau synthétique des avantages et des inconvénients des diverses topologies. Cependant cela reste qualitatif et il est difficile de quantifier les données d'une topologie à l'autre. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les études menées du point de vue expérimental pour effectuer des comparaisons d'association plus approfondies.

3.5 Mise en œuvre d'études comparatives expérimentales des trois topologies choisies

Comme vu dans les exemples du commerce, la topologie la plus utilisée est la matrice non connectée. Elle présente un certain nombre de caractéristiques qui peuvent, à ce jour, être améliorées. Par exemple, si une présélection des LEDs s'effectue par rapport à la provenance du même wafer, elles présentent des caractéristiques plus similaires et les résistances d'équilibrage peuvent avoir des valeurs plus faibles voir même ne pas être utilisées. Dans le but d'effectuer des études comparatives expérimentales sur les topologies, nous avons conçu des platines de tests spécifiques permettant d'ajouter la métrologie facilement et de changer de topologie sans avoir à modifier les LEDs pour garder les mêmes semi-conducteurs soumis à plusieurs contraintes. Nous décrivons les conditions d'essais dans cette partie.

3.5.1. La mise en place des tests



Figure 55 : Platine de LED à configuration variable réalisée au LAAS pour effectuer les tests comparatifs expérimentaux

Pour les besoins expérimentaux, plusieurs platines de dimension 15*10 cm ont été réalisées sur des configurations proches afin de pouvoir tester différentes LEDs et changer aisément la connectique pour étudier les différentes topologies. Elles sont constituées d'une plaque d'aluminium faisant office de support pour assurer le maximum de dissipation thermique. Une couche de cuivre de 35 μm d'épaisseur a été déposée au-dessus pour améliorer la conductivité électrique. Les pistes ont ainsi été gravées dans cette couche afin de permettre le passage de courants jusqu'à 3 A. Les LEDs d'une série donnée ont été soudées par plaque afin de garantir durant toute la campagne d'essais un contact de bonne qualité. Avec l'aide de connecteurs classiques avec un pas de 2,54 mm droit, des résistances shunt assurant la mesure de courant ont été ajoutées.

Le choix des connecteurs s'est effectué selon leur faible résistance pour limiter les chutes de tension inhérentes aux mesures. Les connexions entre LED pour constituer la topologie à étudier et pouvoir la modifier aisément sont effectuées avec des cavaliers. De plus, cette solution permet de limiter les résistances série des connexions.

Avec ce type de platine dont la dimension permet son insertion dans la sphère LMS-100 pour en étudier le taux d'émission de lumière, nous avons ainsi pu effectuer un grand nombre de mesures électriques et photométriques globales, mais également pour chaque LED. Les aspects thermiques sont uniquement étudiés globalement. Pour cela, un ou plusieurs thermocouples sont soudés sur la platine au plus proche de la LED et ensuite soit un lecteur de température est utilisé s'il ne faut que la monitorer, soit les thermocouples sont connectés à un contrôleur qui synchronise les mesures électriques et thermiques. Trois platines complètes ont été réalisées avec 25 LEDs respectivement des séries XPG-G2 de chez CREE, Lumileds de chez Phillips et LCW de chez Osram dont les caractéristiques constructeur sont présentées en chapitre II.

3.5.2. Etude du rendement lumineux selon les topologies

Les conditions de mesure de l'efficacité lumineuse de chaque platine et chaque type de topologie sont les mêmes que celles décrites dans le chapitre 2 pour une LED.

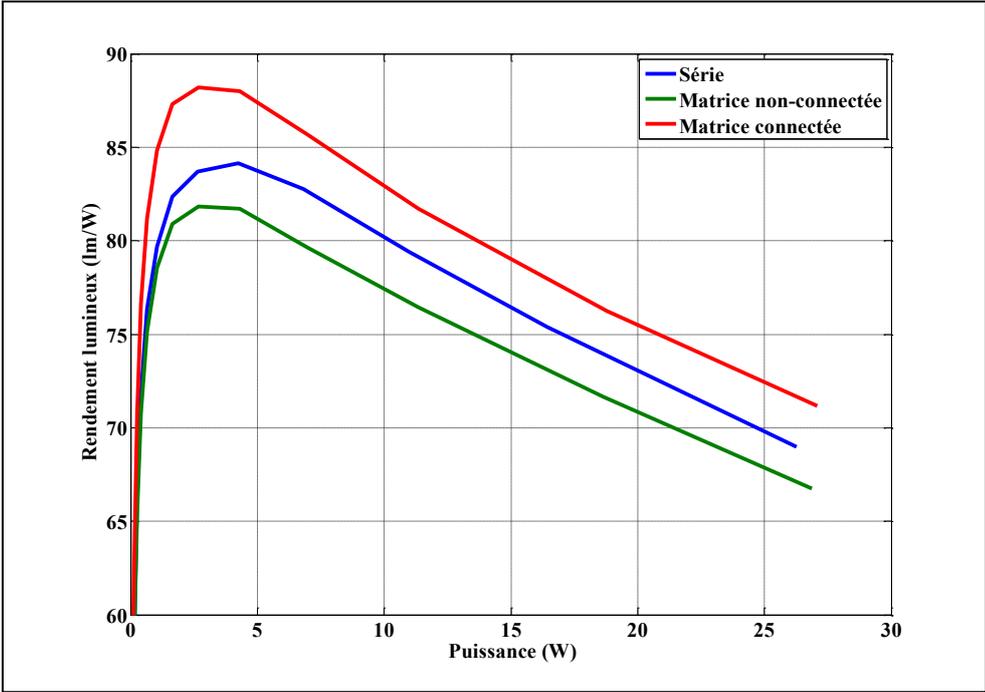


Figure 56 : Rendement lumineux mesuré en fonction de la puissance consommée pour la platine de 25 LEDs de référence XPG-G2 pour plusieurs topologies

Chapitre 3 : Caractérisation, modélisation et impact des topologies

Le tableau ci-dessous montre les tensions aux bornes des topologies pour un courant allant de 100 μ A à 350 mA. Dans le cas des topologies en matrice, il y avait 5 branches de LED connectées donc il y avait 5 fois plus de courant injecté afin d'avoir un courant moyen similaire à la topologie série.

Courant injecté (A)	Tension mesurée en série (V)	Courant injecté (A)	Tension mesurée en matrice non connectée (V)	Tension mesurée en matrice connectée (V)
1×10^{-4}	60,1	5×10^{-4}	12	12,1
$1,58 \times 10^{-4}$	60,54	$7,92 \times 10^{-4}$	12,11	12,11
$2,51 \times 10^{-4}$	61	$1,26 \times 10^{-3}$	12,21	12,2
$3,98 \times 10^{-4}$	61,45	$1,99 \times 10^{-3}$	12,29	12,29
$6,31 \times 10^{-4}$	61,89	$3,15 \times 10^{-3}$	12,38	12,38
1×10^{-3}	62,33	5×10^{-3}	12,47	12,47
$1,58 \times 10^{-3}$	62,76	$7,92 \times 10^{-3}$	12,56	12,56
$2,51 \times 10^{-3}$	63,2	$1,26 \times 10^{-2}$	12,65	12,65
$3,98 \times 10^{-3}$	63,65	$1,99 \times 10^{-2}$	12,75	12,74
$6,31 \times 10^{-3}$	64,11	$3,15 \times 10^{-2}$	12,85	12,84
1×10^{-2}	64,61	5×10^{-2}	12,96	12,95
$1,58 \times 10^{-2}$	65,14	$7,92 \times 10^{-2}$	13,08	13,07
$2,51 \times 10^{-2}$	65,73	$1,26 \times 10^{-1}$	13,23	13,22
$3,98 \times 10^{-2}$	66,4	$1,99 \times 10^{-1}$	13,41	13,39
$6,31 \times 10^{-2}$	67,2	$3,15 \times 10^{-1}$	13,63	13,62
1×10^{-1}	68,15	5×10^{-1}	13,92	13,93
$1,58 \times 10^{-1}$	69,27	$7,92 \times 10^{-1}$	14,32	14,34
$2,3 \times 10^{-1}$	71,5	1,26	14,86	14,98
$3,5 \times 10^{-1}$	75	1,75	15,36	15,48

Tableau 10 : Grandeur électrique pour une platine de 25 LEDs XPG-G2 pour chaque topologie

La figure 56 montre l'évolution de l'efficacité de production lumineuse en fonction de la consommation globale de puissance de la platine pour les LEDs XPG-G2. D'après le tableau 10, le niveau de courant injecté varie pour chaque topologie étudiée pour atteindre un niveau de puissance consommée proche. Pendant ce type de campagne de mesures, nous n'avons mesuré que le courant global consommé par chaque platine et non chaque courant de branche ni dans chaque LED. Pour les deux autres platines des LEDs de référence Lumileds LX18-P130-Y et LCW KPKR-5R8T, les résultats obtenus

ont été similaires. Dans les trois platines, il ressort que la matrice connectée offre le meilleur rendement lumineux comme nous pouvons constater sur la figure 56. L'optimum d'efficacité n'est toutefois pas obtenu pour la même valeur de puissance avec les trois types de LED montrant bien que chaque fabricant a son propre procédé de fabrication et synthèse des matériaux semi-conducteurs servant de base aux jonctions, de même chacun effectue des compromis concernant les dopages ou les dimensions de chaque LED élémentaire.

Chaque documentation technique des LEDs testées indiquait un courant d'alimentation préconisé de 350 mA (proche de 1 W de puissance consommée par LED). Le niveau de courant mesuré durant les tests expérimentaux pour fonctionner à une efficacité lumineuse maximale est bien plus faible, quel que soit les technologies (environ 40 mA pour une LED XPG-G2). Une importante chute d'efficacité entre la valeur optimale et le point de fonctionnement préconisé par les constructeurs a été observée comme cela avait été le cas pour les mesures individuelles de LEDs (chapitre 2). Cela va de 21 à 61 % selon les technologies testées. Pour une technologie donnée, il est également apparu que la puissance injectée pour obtenir ce point optimal était quasiment la même, quelle que soit la topologie. Globalement, les comportements d'efficacité lumineuse par rapport à la puissance fournie sont proches de ceux constatés pour une LED présentant un maximum marqué suivi d'une lente diminution liée à l'augmentation des pertes non radiatives et de la température comme il est mentionné dans la littérature [108].

Les mesures ayant été faites dans la sphère intégratrice LMS-100, il n'y avait pas la place pour effectuer les capteurs de courant à chaque branche. C'est pourquoi comme pour la figure 56, l'axe des abscisses est gradué en puissance et non pas en courant dans les figures 57 et 58. De plus la mise en œuvre d'un système de mesure des courants par élément reste compliqué alors que nous avons surtout besoin d'avoir dans ces essais un maximum de précisions sur les diverses émissions lumineuses. Pour les mêmes raisons, les aspects thermiques ont été limités au maximum lors des tests. Dans le cas de mesure à 350 mA, les mesures électriques ou thermiques sont effectuées presque instantanément donc la platine n'avait pas le temps de chauffer. Et dans le cas de mesure à courant optimal (inférieur à 100 mA), la température de la platine n'augmentait pas même après plusieurs minutes.

Type de LED	Topologie	Rendement lumineux à 350 mA (lm/W)	Rendement lumineux maximal (lm/W)
XPG-G2	Série	68,9	84,1
	Non connecté	66,7	81,8
	Connecté	71,1	88,1
Lumiled	Série	54,3	69,3
	Non connecté	55,4	73,9
	Connecté	56,3	75,7
Osram	Série	40,4	62,1
	Non connecté	39,7	63,8
	Connecté	39,9	64,3

Tableau 11 : Bilan des rendements lumineux à 350 mA et à courant optimal

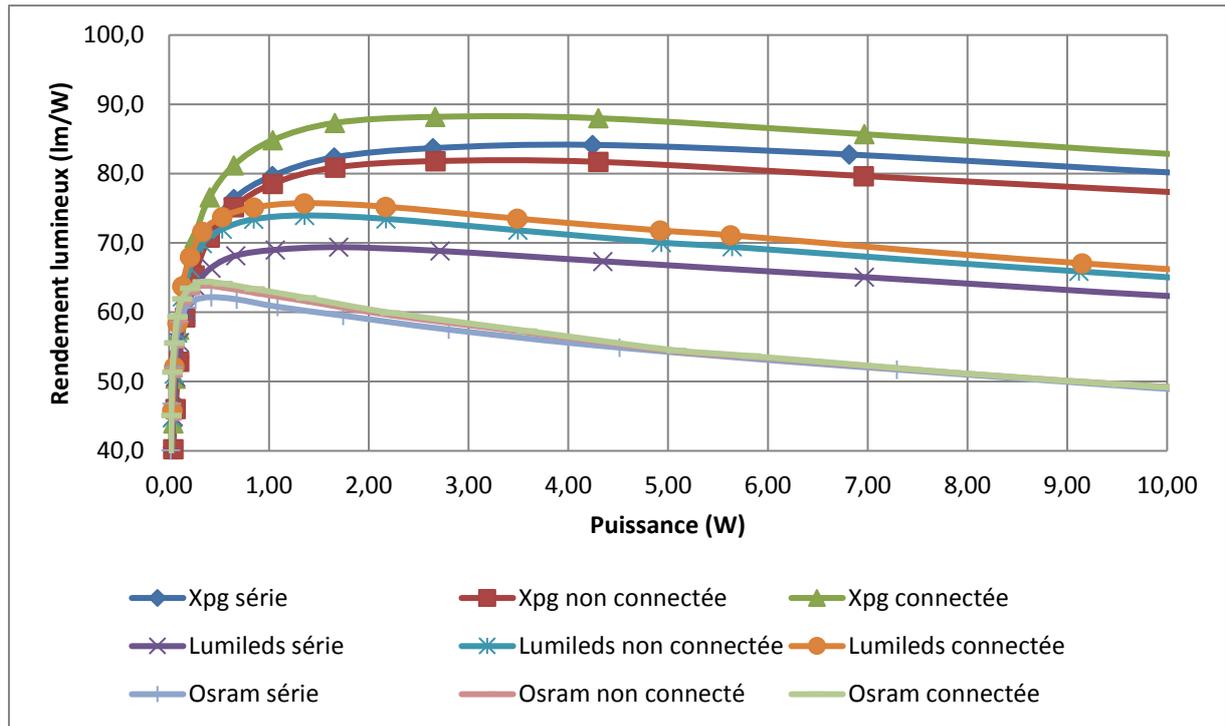


Figure 57 : Rendement lumineux en fonction de la puissance pour les différentes LEDS étudiées entre 0 à 10 W

La figure 57 illustre le rendement lumineux des LEDS testées durant les travaux de thèse. Comme la technologie et le dopage diffèrent dans chaque composant étudié, les comportements ne sont pas exactement les mêmes. En conséquence, les XPG-G2 atteignent leur efficacité de conversion maximale à 40 mA, soit à 170 mW. Le rendement des Lumileds est atteint à 20 mA, soit 54,2 mW et enfin, pour les LCW, il faut un courant de 5 mA, soit 13,4 mW pour atteindre le point optimal. Ces courants sont extrêmement faibles par rapport à ceux préconisés par les constructeurs. En figure 58, nous montrons sur une plage plus importante de puissance l'évolution globale des efficacités. Ceci permet de constater que la topologie Osram présente beaucoup plus de pertes que les deux autres à fort courant.

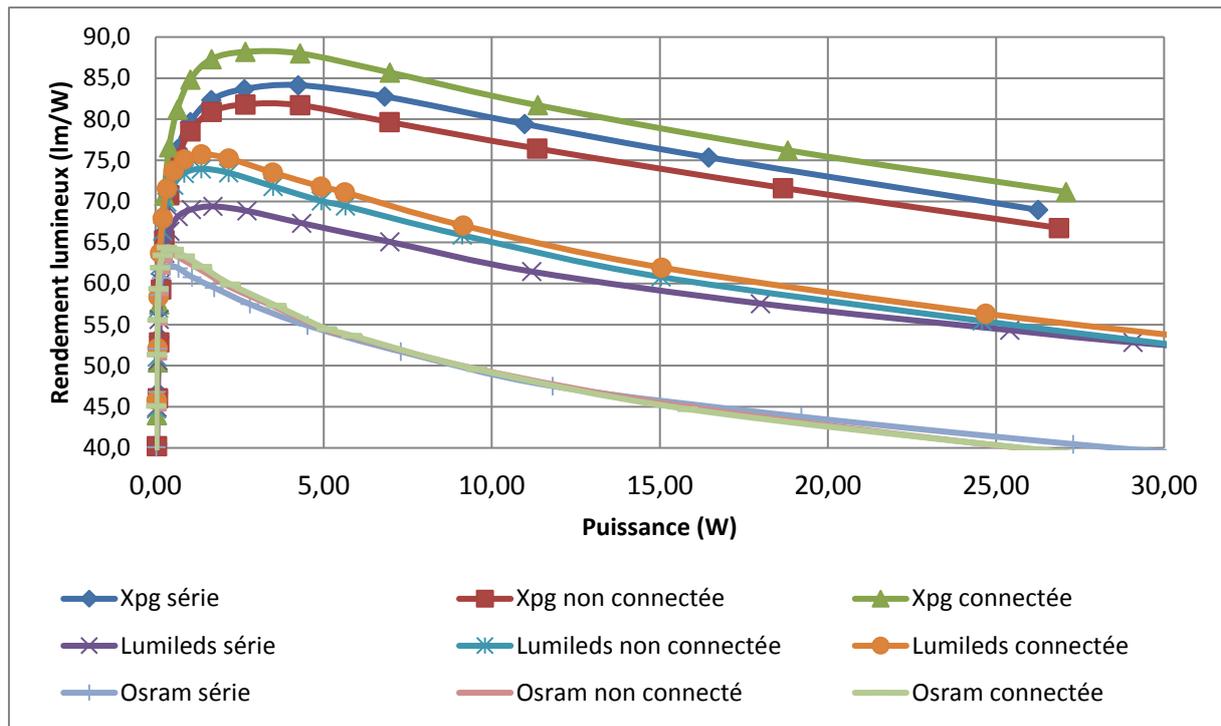


Figure 58 : Rendement lumineux en fonction de la puissance pour les différentes LEDs étudiées entre 0 à 30 W

Les trois types de LEDs sélectionnées pour ces essais sont des LEDs dites à haute intensité et la puissance en fonctionnement nominal est de 1W. Ce qui pour une platine de 25 LEDs, donne une puissance de fonctionnement nominale de 25 W et montant jusqu'à 30 W en fonction des topologies pour tenir compte des pertes des connectiques et des mesures. Globalement, ce qui est à noter, c'est que, quelles que soient la technologie et la topologie, il existe une différence importante de rendement en fonctionnement normé et en fonctionnement optimal.

3.5.1 Les différentes variantes des matrices connectées

La définition de la topologie de type matrice connectée est aujourd'hui non normée par rapport aux autres topologies fréquemment utilisées dans les luminaires du commerce. Nous pouvons donc voir que pour constituer une matrice connectée avec plusieurs LEDs, cette dernière peut être de type carré ou de type rectangulaire comme illustrées dans l'exemple de la figure 59a et 59 b pour 16 LEDs en considérant le nombre de LEDs mis en série puis en parallèle pour aboutir à une association équilibrée. D'autre part, le nombre d'interconnexions par branche joue également un rôle en termes de rééquilibrage des courants. Globalement, cela ne change pas le type de topologie matrice connectée mais cela a un impact sur l'efficacité lumineuse de l'ensemble. Les courbes présentées précédemment ont ainsi été réalisées avec une platine de test permettant de mettre en œuvre jusqu'à une matrice connectée carrée de 5*5 LEDs avec une interconnexion par LED.

Nous avons testé sur une des platines les deux topologies matrices connectées de 16 LEDs avec le maximum d'interconnexions pour effectuer une première étude comparative.

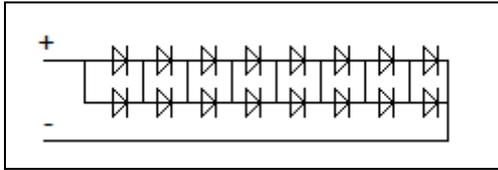


Figure 59a : Exemple de topologie de LEDs de type matrice connectée rectangulaire (2*8)

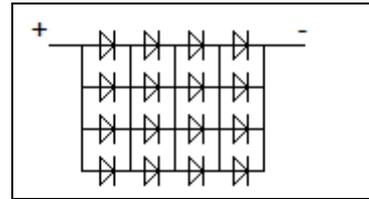


Figure 59 b : Exemple de topologie de LEDs de type matrice connectée carrée (4*4)

La platine de tests bien que flexible en termes de connectiques ne permet pas de faire beaucoup de combinaisons pour avoir une répartition équilibrée par branche et niveau, les comparaisons ont pu toutefois être réalisées entre une topologie matrice connectée de 2*8 LEDs et une matrice de 4*4. Les mesures ont été réalisées en injectant un courant compris entre 1 et 100 mA par LED.

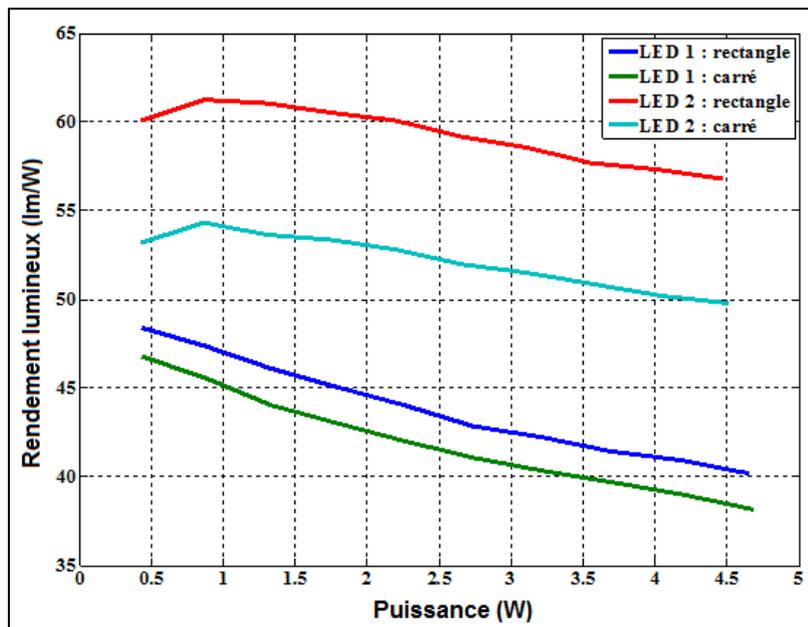


Figure 60 : Comparaison des deux types de matrices connectées avec les LEDs de type Osram (LED 1) et Lumileds (LED 2)

La figure 60 montre que la topologie matrice connectée de type rectangulaire présente un meilleur rendement lumineux que la matrice carrée (supérieur de 5 à 10 %). Une des raisons est qu'en alimentant 2 branches de LEDs interconnectées comparé à 4 branches de LEDs, la dispersion en courant par élément n'est pas la même et donc l'efficacité de conversion est impactée. Il semble également que l'équilibrage s'effectue plus aisément dans la topologie rectangulaire. Pour vérifier cela, il serait également nécessaire de faire varier le nombre d'interconnexions pour en mesurer l'impact sur le rééquilibrage des courants.

En outre ici, pour un courant entre 1 et 100 mA, il peut être remarqué un comportement différent d'un type de LED à l'autre. En effet, les courbes en lien avec la LED Osram de type LCW KPKR-5R8T sont seulement décroissantes, cela signifie que le point d'efficacité maximale se situe à très faible courant pour ce type de LED comme nous l'avons constaté en figure 55. Les courbes obtenues avec la LED de type Lumileds LX18-P130-Y montrent bien que le point d'efficacité maximale est atteint pour une puissance consommée de 0,86 W (LED 2). Pour la topologie matrice connectée, des études d'optimisation restent encore à faire pour déterminer si le type rectangulaire est plus intéressant quel que soit le nombre de LEDs. À ce jour, nous n'avons pas approfondi ces études faute de temps. Cela nous a en revanche amené à étudier plus en détail la répartition des courants par LED dans ce type de structure comme il est mentionné dans la suite de ce manuscrit.

3.6 Etude de la dispersion en courant des LEDs

3.6.1 Conditions d'essais

Le test sur l'équilibrage des courants a été effectué sur la platine des LEDs XPG pour les topologies matrice connectée et non connectée. Pour cette dernière, les essais ont été effectués avec et sans résistance d'équilibrage. Les mesures de courant ont été effectuées en utilisant une résistance de shunt de 50 m Ω insérée en série avec chaque LED. Cette valeur est choisie suffisamment faible pour être considérée a priori négligeable par rapport à la résistance équivalente série de chaque LED qui est estimée de l'ordre de 500 m Ω . La valeur de chaque shunt a été vérifiée à l'aide du Modulabs par une spectroscopie d'impédance pour bien s'assurer d'avoir une valeur homogène de 50 m Ω .

Comme vu précédemment la topologie de type matrice connectée est celle qui offre le meilleur rendement lumineux quel que soit son agencement et le taux d'interconnexions vis-à-vis des autres types de connections. Cependant, dans ce type de topologie le problème de répartition des courants entre LED, engendre encore des pertes de rendement lumineux associé à des échauffements locaux qui doivent jouer sur la durée de vie des LEDs les plus alimentées en courant. Bien que les processus de fabrication industriels des LEDs aient été améliorés ces dernières années, il reste encore des disparités en termes de performances entre les LEDs qui ne sont pas parfaitement identiques, même lorsqu'elles ont issues du même processus technologique et découpées sur un même wafer. Le paramètre principal qui joue un rôle important sur la répartition du courant est la résistance interne équivalente série de chaque LED. Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons effectué une série de tests électriques préliminaires sur une platine en prenant tout d'abord 5 LEDs en parallèle puis les 25 en matrices connectée et non connectée pour examiner par rapport à un lot de LEDs acheté en petite série où nous avons à faire à des LEDs de même technologie mais pas forcément de mêmes lots de fabrication, n'ayant pas pu nous procurer des LEDs prétriées réservées aux clients achetant des grands volumes. L'objectif de ces tests a été d'évaluer quelle était la disparité des courants traversant chaque LED dans un même niveau (les 5 LEDs d'un même regroupement parallèle) pour différentes valeurs de courant injecté. Les mesures expérimentales présentées dans ce manuscrit ont été effectuées sur les 25 LEDs XPG-G2. Les relevés des mesures de courant traversant chaque LED ont été effectués aux bornes du shunt associé mis en série.

3.6.2 Essais sur 5 LEDs en parallèle

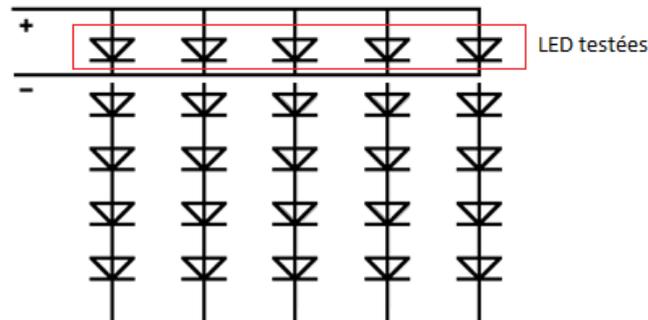


Figure 61 : Connexion des 5 LEDs XPG-G2 testées en parallèle

Courant global injecté sur la platine (mA)	50	100	200	350	700	1400	1750
Courant moyen théorique par LED (mA)	10	20	40	70	140	280	350
Courant minimum mesuré (mA)	6,4	13,2	26,3	45,6	89,3	171,5	213,6
Courant maximum mesuré (mA)	12,8	26,4	58,9	103,4	204	383,4	467,5
Ecart-type sur les courants (mA)	1,4	3,4	8,4	15,0	28,8	50,3	56,5
Ecart-type sur les courants (%)	14,4	17,3	21,1	21,5	20,6	17,9	16,1

Tableau 12 : étude de la dispersion entre les LEDs XPG-G2

L'écart-type E (mA) sur les courants en mA est calculé suivant l'équation suivante :

$$E(mA) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (i_i - \bar{i})^2} \quad (3,1)$$

Avec :

n : le nombre mesure

i : les courants mesurés

\bar{i} : le courant moyen

L'écart-type E (%) sur les courants en % est calculé suivant l'équation :

$$E(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (i_i - \bar{i})^2}}{\bar{i}} * 100 \quad (3,1)$$

Avec :

n : le nombre mesure

i : les courants mesurés

\bar{i} : le courant moyen

Le tableau ci-dessus montre les mesures de courant absorbé par LED sur un même niveau de 5 LEDs en parallèle, les autres LEDs de la platine n'étant pas connectées. L'évolution de l'écart type pour différents niveaux de courants globaux injectés présente un maximum pour un courant injecté de 350 mA soit un écart de 70 mA maximum d'une LED à l'autre. Il apparaît que cet écart type diminue à nouveau à courant plus élevé, cependant l'écart de courant réel entre deux LEDs se situe alors à plus de 200 mA, écart qui a un impact sur une dispersion de luminosité visible par l'œil humain.

Ces mesures révèlent une dispersion importante pour un même jeu de LEDs allant d'un courant minimum à un courant maximum avec un facteur 2. Dans le cas d'une alimentation à faible courant global, cette dispersion n'entraînera par une différence notable de lumière émise détectable par l'œil. Par contre à fort courant, cela peut engendrer des risques d'éblouissement en vision directe.

Théoriquement, lorsque deux LEDs de caractéristiques proches (ou plus) sont connectées en parallèle, elles devraient se partager le courant de manière équitable. Les mesures ci-dessus des disparités de courant importantes prouvent que ces LEDs de même technologie ne sont pas forcément du même lot de fabrication ou qu'il y a eu des disparités au découpage des wafers (moins précis en périphérie qu'au centre selon le mode de découpage). Cela implique une différence de valeur de la résistance série de chaque LED. Si nous traçons l'évolution du courant par LED en fonction du courant global injecté (figure 62), nous voyons que le phénomène s'aggrave au fur et à mesure que le niveau de courant global augmente bien que l'évolution du courant par LED ne soit pas totalement linéaire.

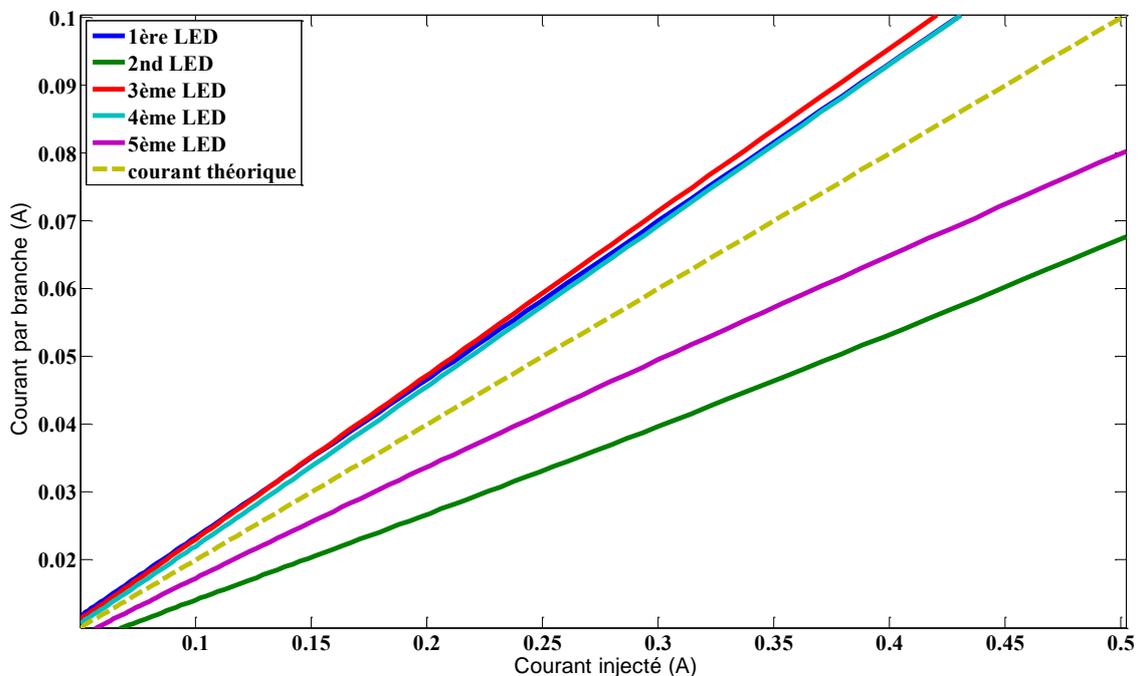


Figure 62 : Répartition des 5 courants des LEDs XPG-G2en parallèle

Nous avons représenté en pointillé l'évolution moyenne du courant par LED si une répartition homogène s'effectuait pour mieux voir les répartitions des courants en surplus et en sous-alimentation. Ainsi, nous pouvons constater que trois LEDs ont des comportements proches (la 1^{ère}, la 3^{ème} et 4^{ème}). Pour ces trois LEDs, la courbe de la 1^{ère} LED est au début confondu avec la courbe de la 3^e LED et à la fin, elle recouvre la courbe de la 4^e LED. Cette translation est due au fait que la résistance série des LEDs dépend aussi de la température qui augmente en augmentant le courant entraînant une faible variation de valeur de la résistivité. Ce phénomène n'est toutefois pas assez important pour compenser la différence de résistance initiale liée aux dispersions de valeurs selon les lots. Nous nous sommes donc intéressés à ces dernières pour voir quelles solutions apporter.

3.6.3 Matrice non connectée

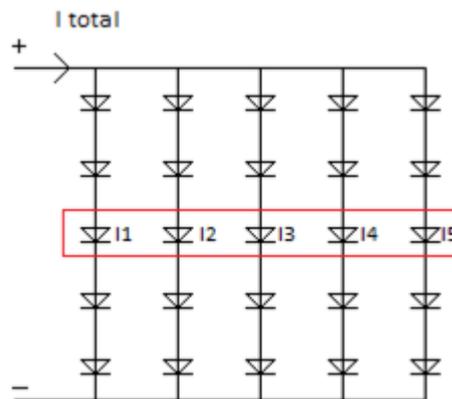


Figure 63 : Topologie de type matrice non connectée 5*5 utilisée pour les tests en courant

Courant injecté (mA)	50	100	200	350	700	1400	1750
Courant minimum mesuré (mA)	9	18	38,3	65,1	124,8	248	310
Courant maximum mesuré (mA)	10,3	20,7	43,8	75,5	149,9	305,1	378,2
Moyenne des courants (mA)	9,68	19,42	40,78	70,36	137,34	277,06	346,3
Ecart-type des courants (%)	1,18	1,21	1,19	1,31	1,59	1,90	1,82

Tableau 13 : Ecarts de courant mesurés pour différents courants injectés en topologie matrice non connectée

De la même manière que précédemment, nous avons effectué des relevés de courants pour les mêmes cinq LEDs signalés en figure 63 mais connectés aux autres en topologie matrice non connectée et sans ajout de résistance d'équilibrage. Les mesures en courant indiquent que l'écart-type est inférieur pour cette topologie par rapport aux essais sur les 5 LEDs en parallèle. Nous pouvons constater que l'écart-type n'évolue pas selon une loi linéaire en fonction du niveau de courant global injecté. Il serait intéressant d'approfondir ces essais en prenant en compte l'évolution de température par LED dans ce type d'essais pour mesurer son influence. Ce qui à ce jour n'a pu être fait faute de temps.

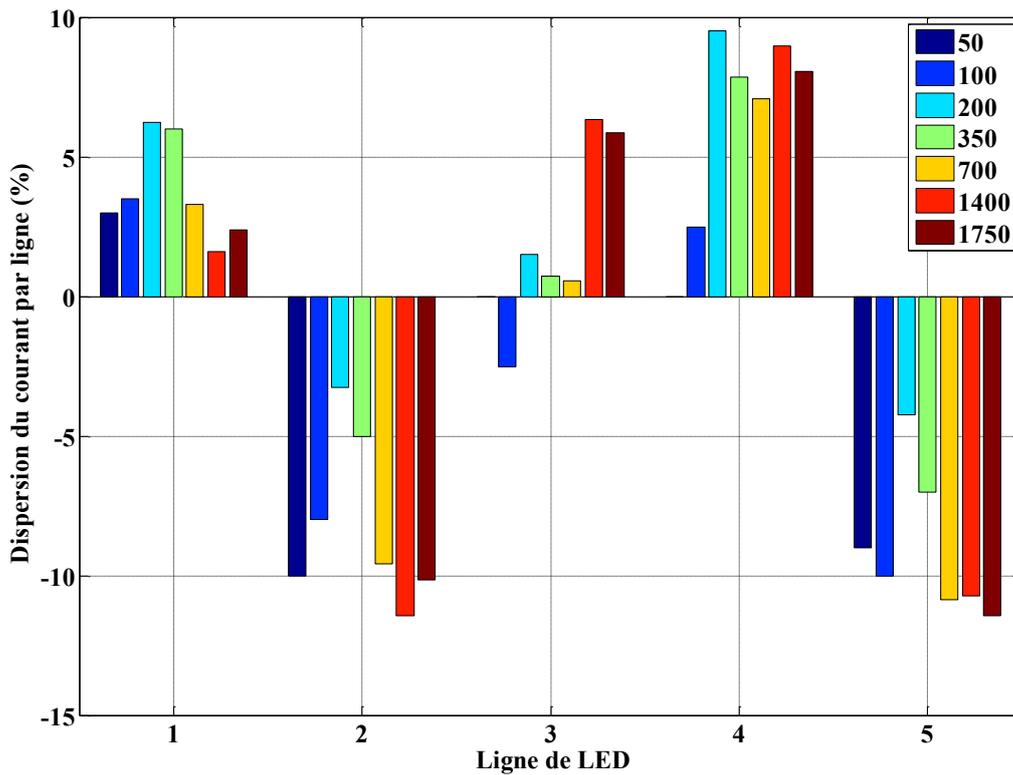


Figure 64 : Représentation de la dispersion des courants pour les 5 LEDs fonctionnant dans la topologie matrice non-connectée à différents courants injectés

La figure 64 présente la dispersion de courant en pourcentage entre le courant théorique par branche sans problème de répartition de courant et le courant mesuré pour différents courants injectés. Il faut noter que la dispersion est aléatoire en fonction de l'augmentation du courant injecté.

3.6.4 Matrice non connectée équilibrée

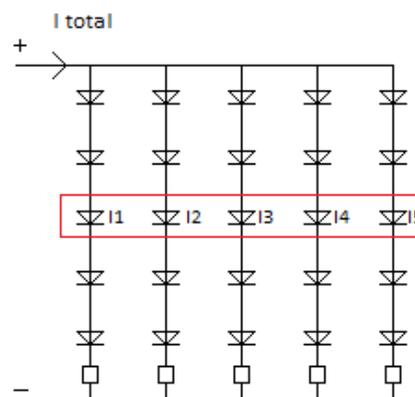


Figure 65 : Topologie de type matrice non connectée équilibrée

Cette topologie est une dérivée de la matrice non connectée se différenciant par l'ajout d'une résistance de 100 Ω sur chaque branche de LED. Cette résistance a pour rôle d'équilibrer les courants en rajoutant une valeur prépondérante sur chaque ligne. Cette manière d'associer les LEDs avec des résistances est encore aujourd'hui très utilisée dans les lampes ou réglettes à LED domestiques avec des valeurs similaires lorsque le processus de tri des LEDs n'était pas mis en œuvre (figure 66).



Figure 66 : Exemple de réglette à LEDs pour application domotique avec les résistances d'équilibrage

Courant injecté (mA)	50	100	200	350	700	1400	1750
Courant minimum mesuré (mA)	9,7	19,4	39	68	136	275	343
Courant maximum mesuré (mA)	10,7	20,9	41	72	143	286	358
Moyenne des courants (mA)	10,22	20,18	40,18	70,44	140,2	281,4	351,6
Ecart-type des courants (%)	0,96	0,66	0,45	0,51	0,43	0,36	0,36

Tableau 14 : Ecarts de courant mesurés pour différents courants injectés en topologie matrice non connectée équilibrée

Cette association présente le grand avantage d'avoir un écart-type de courant très faible, assurant une très bonne uniformité de la lumière émise, notamment à fort courant d'alimentation. La contrepartie de cet ajout vient des pertes engendrées par ces résistances qui n'émettent pas de lumière qui sont quand même de forte valeur et font chuter le rendement. En outre, il apparaît que le maximum d'écart-type va aller en décroissant avec l'augmentation du courant et des pertes.

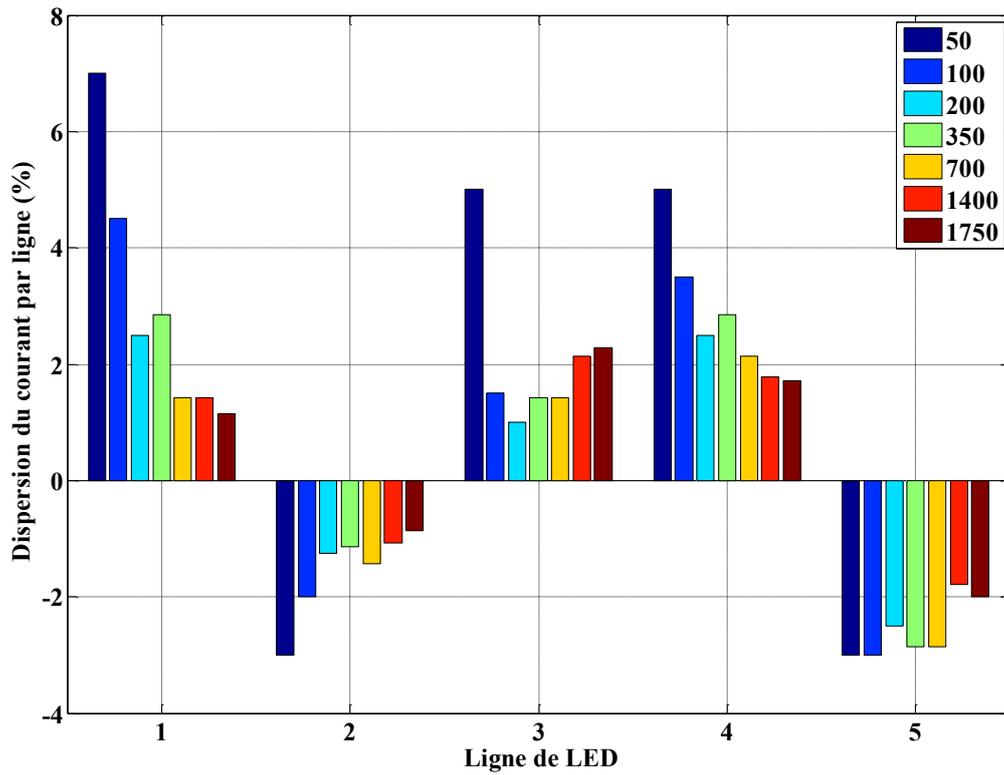


Figure 67 : Dispersion du courant pour 5 LEDs en matrice non connectée équilibrée à différents courants injectés

Le principal avantage de la matrice non connectée équilibrée réside dans sa capacité à avoir des courants presque similaires par branche. La figure 67 le prouve en affichant des pourcentages de dispersion qui convergent vers de faibles valeurs.

3.6.5 Matrice connectée

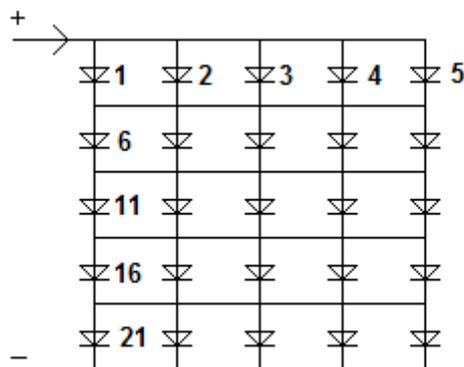


Figure 68 : Topologie de type matrice connectée

Pour cette topologie, les 25 LEDs ont été connectées comme les figure 68.

Courant injecté (mA)	50	100	200	350	700	1400	1750
Courant minimum mesuré (mA)	6,4	13,2	26,3	45,6	89,3	171,5	213,6
Courant maximum mesuré (mA)	12,8	26,4	58,9	103,4	204,0	383,4	467,5
Moyenne des courants (mA)	10,3	20,1	40,1	70,1	139,5	279,3	351,1
Ecart-type des courants (%)	2,9	3,5	4,2	4,3	4,1	3,6	3,2

Tableau 15 : Ecarts de courant mesurés pour différents courants injectés en topologie matrice connectée

Le tableau 15 montre les dispersions de courant pour la matrice connectée. Il est possible de constater que les écarts types sur les courants par LED sont plus importants que dans le cas de la matrice non-connectée. Cela est évident, car la matrice connectée a beaucoup plus de nœuds de courants et donc il y a plus d'influence due aux résistances série. Il est aussi possible de constater que l'écart-type est minimum pour des faibles et des fortes valeurs de courant. Et qu'en alimentant les LEDs à 350 mA qui est une valeur courante dans les luminaires à LED, alors l'écart-type est maximum. Les mesures montrent que l'écart-type est faible pour de petits puis des forts courants. Cela indique qu'en alimentant les LEDs au niveau où l'écart-type est maximal, cela entraîne une hétérogénéité de la lumière émise et du vieillissement des LEDs. Celles qui absorbent le plus de courant ont plus de chance de se détériorer et donc de compromettre l'utilisation du luminaire au bout de quelques milliers d'heures de fonctionnement, bien qu'aux premiers incidents, le luminaire puisse continuer à fonctionner.

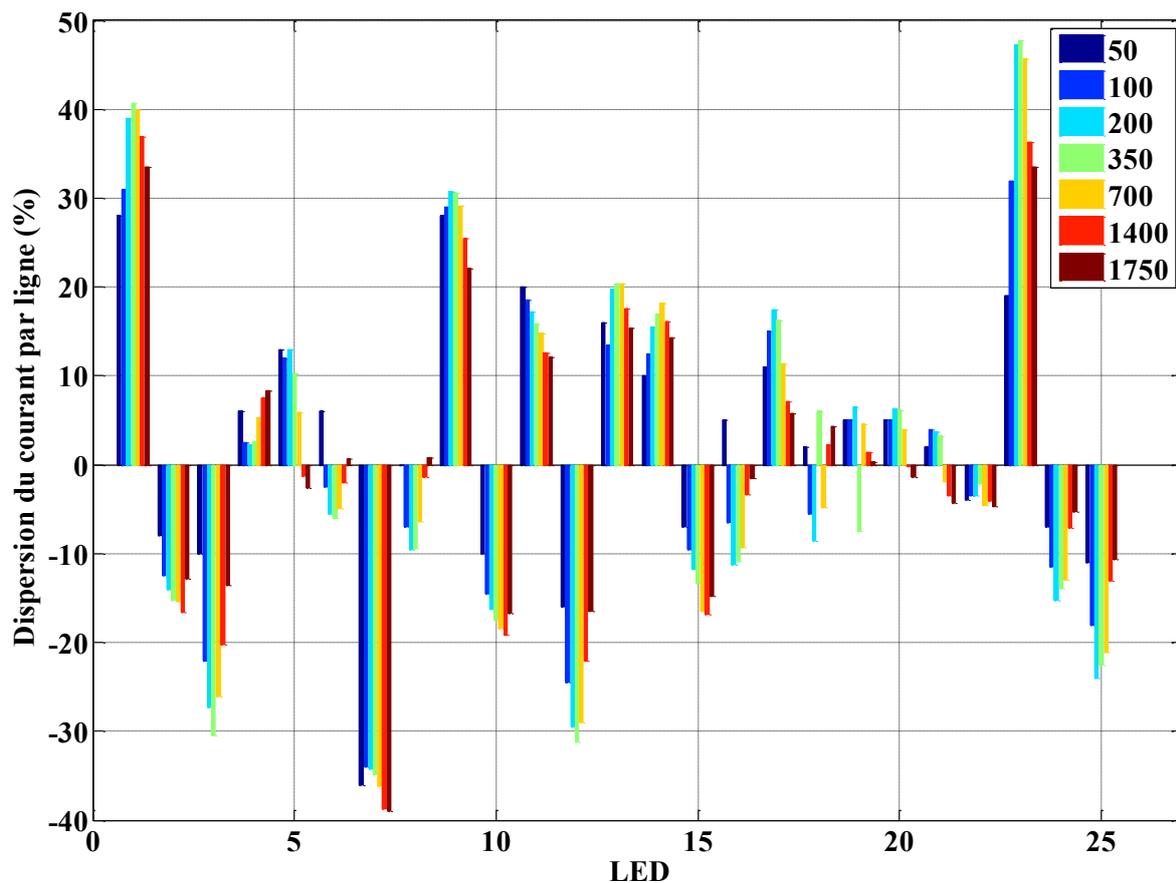


Figure 69 : Dispersion du courant pour 5 LEDs en matrice connectée à différents niveaux de courants injectés

De la même manière que pour la matrice non connectée, la figure 69 présente la dispersion de courant en pourcentage entre le courant théorique par LED et les courants mesurés. Les dispersions sont beaucoup plus prononcées dans le cas de la matrice connectée par rapport à la matrice non connectée. Les interconnexions ne permettant pas un rééquilibrage de courant en fonctionnement normal. Sans LEDs présélectionnées pour avoir des caractéristiques proches ce type de connectique peut finalement poser plus de soucis que la solution matrice non connectée avec résistance d'équilibrage. En effet, nous avons pu constater sur nos essais des valeurs de dispersion allant jusqu'à 48 %, c'est-à-dire que l'une des LEDs consomme, à niveau de courant global injecté 350 mA, presque 50 % de courant en plus par rapport à ce qu'elle devrait consommer en moyenne. Ce qui n'est pas négligeable comme fatigue sur le long terme. Pour la réalisation d'un prototype plus avancé, nous tiendrons compte de cet état de fait.

3.6.6 Etude de la disparité de la tension sur les caractéristiques I(V) de l'ensemble des LEDs de la platine de LEDs Lumileds

Au vu du taux de dispersion de courant constaté dans les essais précédents, nous avons voulu étudier le taux de dispersion des caractéristiques I(V) de l'ensemble des LEDs d'une même référence. Pour cela, chaque LED est traversée par un même courant, la tension à ses bornes est alors relevée. Cependant un effet similaire est mesurable au niveau de la tension.

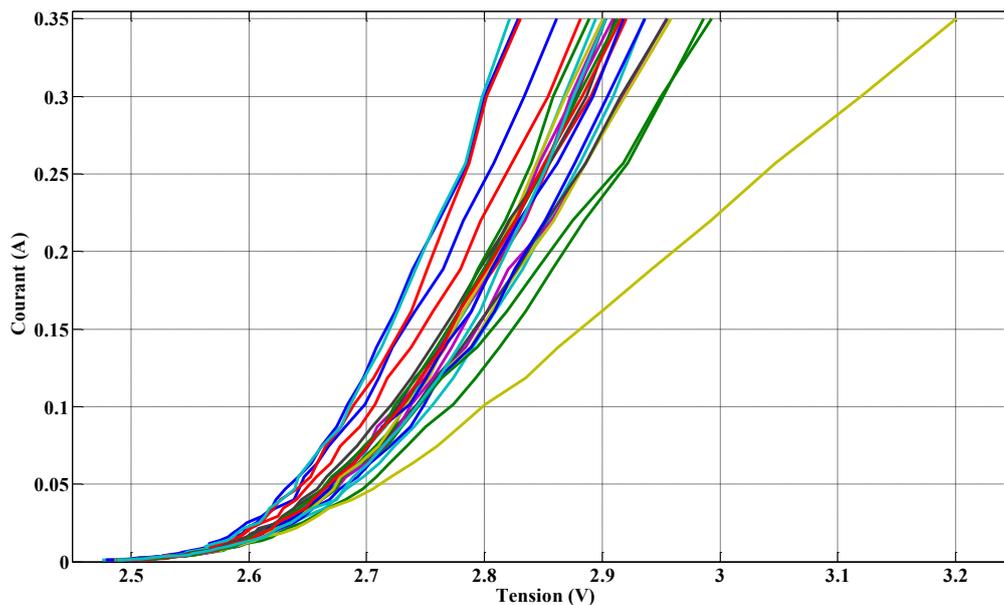


Figure 70 : Dispersion des caractéristiques I(V) pour une même rampe en courant sur 25 LEDs XPG-G2

Bien que les processus de fabrications en série aient beaucoup progressés, les relevés d'un même lot de LEDs référencées LX18-P130-Y montrent que les caractéristiques I(V) sont divergentes avec des variations de tension pour un même courant pouvant être importantes corroborant les résultats obtenus avec les LEDs mises en parallèle dans les différentes topologies.

Le tableau ci-dessous précise pour un courant donné pouvant aller jusqu'à 1,5 A, la différence entre les tensions aux extrêmes pour les 25 LEDs. Les relevés expérimentaux ont été obtenus en mode impulsionnel afin de limiter au maximum l'augmentation de température de jonction des LEDs par rapport à une température ambiante de 25 °C.

Courant (mA)	Différence entre les tensions extrêmes (mV)	Tension moyennes (V)	Ecart-type (%)
10	0,031 6	2 582	1,2
50	0,070 1	2,67	2,6
100	0,12	2 728	4,4
150	0,169	2 774	6,1
200	0,218	2 815	7,7
250	0,267	2 854	9,4
300	0,316	2 891	10,9
350	0,364	2 927	12,5
500	0,51	3,03	16,8
600	0,606	3,1	19,6
700	0,703	3,16	22,2
800	0,799	3,23	24,8
900	0,896	3,29	27,2
1000	0,992	3,35	29,6
1250	1,23	3,51	35
1500	1,47	3,66	40,1

Tableau 16 : Ecart type des tensions à différents niveaux de courant pour 25 LEDs LX18-P130-Y

Le tableau ci-dessus montre que la dispersion des tensions en réponse à un même courant est importante. Par exemple, en alimentant les LEDs à 1 A, il y a jusqu'à 1 V de différence entre les tensions de deux LEDs. Ces LEDs ayant la possibilité de fonctionner jusqu'à 1,5 A, cela peut entraîner 1,4 V de différence si elles sont connectées en série.

3.7 Établissement de modèles de groupements de LED en vue de la conception de l'alimentation

Les modèles sont obtenus après ajustement de la caractéristique tension courant d'une LED comme décrit dans le chapitre 2. Ces modèles peuvent être mis sous forme d'équations faciles à insérer dans le logiciel Psim pour effectuer des simulations globales et comparer les résultats obtenus avec les mesures expérimentales. Dans un premier temps, il y a une phase d'identification pour une LED de caractéristiques typiques par rapport à une référence constructeur donnée en suivant la méthodologie exposée dans le chapitre précédent. Ensuite, ce modèle élémentaire est associé de manière similaire à la platine. Dans un premier temps, toute résistance liée à la connectique est négligée.

3.7.1 Identification d'une LED de type Lumileds

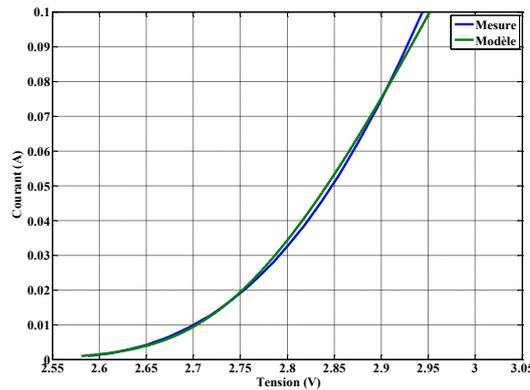


Figure 71 : Courbe I(V) expérimentale et la courbe I(V) simulée dans Psim pour une LED Lumileds

Cette étape est indispensable pour vérifier que l'ajustement réalisé est correct pour une série de LED donnée même si elles sont issues du même fabricant. L'extraction de paramètres réalisée a donné les coefficients suivants pour le modèle de Shockley : $n = 1,83$; $J_s = 2,87e^{-27}$; $R_s = 1,53$. Le coefficient R — est de 0,998 3 et l'erreur RMSE est de $4,2e^{-3}$.

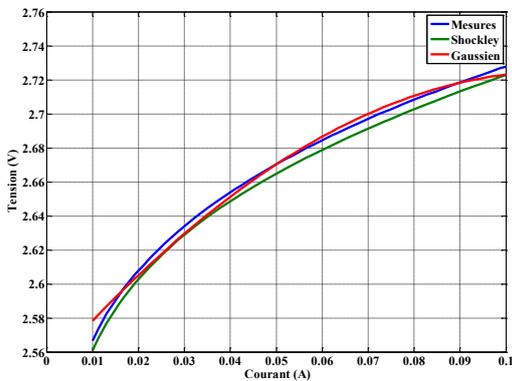


Figure 72a : Courbe $V=f(I)$ mesurée et sa courbe simulée dans Psim pour une LED

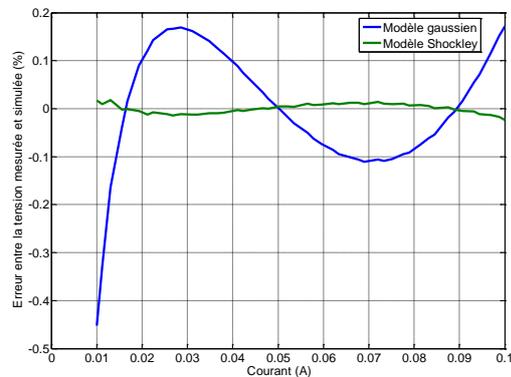


Figure 72 b : Erreur relative entre la tension mesurée et simulée dans Psim pour une LED

En comparant les erreurs relatives des deux modèles, il est possible d'observer que le modèle Gaussien est légèrement moins précis que le modèle de Shockley et notamment en observant les oscillations autour de la courbe de mesure. De plus, lors des calculs effectués sous Psim, le modèle de Shockley est beaucoup plus rapide pour converger vers une solution. En outre, il y a un peu plus de « warnings » lors des itérations de calcul dans Psim avec le modèle Gaussien. C'est pourquoi dans la suite des travaux, nous utiliserons exclusivement le modèle de Shockley.

Comme expliqué précédemment, nous utilisons la courbe $V(I)$ pour la mise au point des alimentations qui vont délivrer un niveau de courant donné comme l'indique la figure 72a, l'erreur relative est alors évaluée sur cette caractéristique (figure 72 b). Le résultat montre que l'erreur est comprise entre +0,17 % et +0,21 % pour un courant compris entre 1 et 100 mA. À ce stade, nous supposons que le modèle de la LED référencée Lumileds LX18-P130-Y est suffisamment précis pour simuler les différentes topologies.

3.7.2 Modélisation de la topologie série

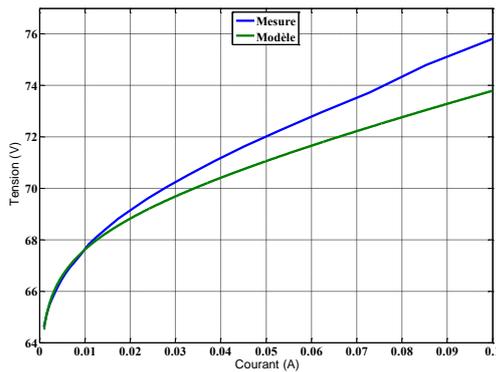


Figure 73a : Courbe $V=f(I)$ mesurée et sa courbe simulée dans Psim pour 25 LEDs en série

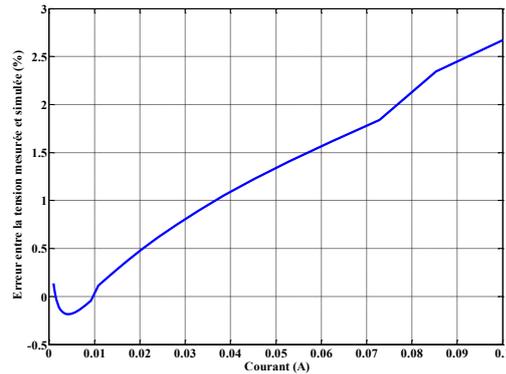


Figure 73 b : Erreur relative entre la tension mesurée et simulée dans Psim pour 25 LEDs en série

Dans le cas de la topologie série, nous avons associé 25 modèles élémentaires en série dans PSIM sans tenir compte de la connectique. Les premiers résultats obtenus présentent une erreur relative exclusivement positive exceptée entre 1 et 10 mA. De plus, elle augmente linéairement en fonction de l'augmentation du courant, il semble qu'un phénomène résistif soit présent notamment lié aux résistances des shunts de mesure, de la connectique de la platine ajoutées à celles des pistes. Elle entraîne alors une erreur de 2,2 % à 100 mA.

Nous ne dépassons pas les études pour un courant supérieur à 100 mA par LED en raison de la trop grande perte d'efficacité lumineuse qui dans notre cas ne nous permettrait pas d'atteindre les objectifs en termes de baisse de consommation visée dans ces travaux. En effet, le rendement maximal étant situé pour ces LEDs à environ 40 mA.

3.7.3 Modélisation de la matrice non connectée

Nous avons utilisé le modèle unitaire dans PSIM qui sans modification a été associé en 5 branches de 5 LEDs en série. Les résultats obtenus sont consignés dans les figures 62a et 62 b ci-dessous.

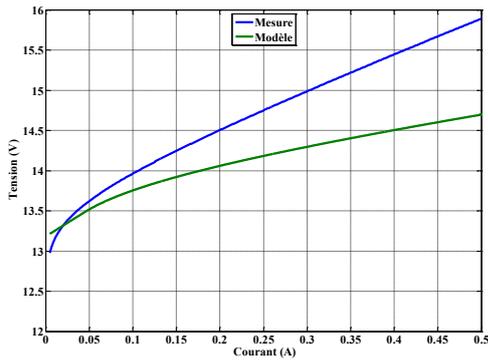


Figure 74a : Courbe $V=f(I)$ mesurée et sa courbe simulée dans Psim pour 25 LEDs en matrice non connectée

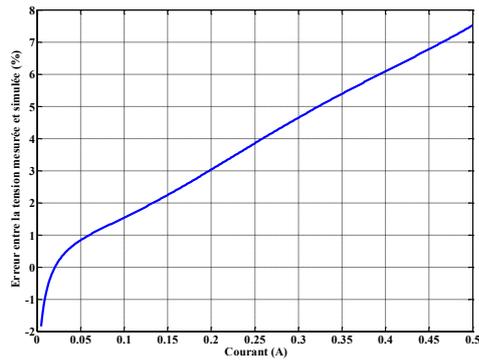


Figure 74 b : Erreur relative entre la tension mesurée et simulée dans Psim pour 25 LEDs en matrice non connectée

Comme pour la topologie série, il est possible de voir apparaître une différence entre les mesures sur la platine et les résultats de simulation. L'erreur relative a été calculée en fonction du niveau de courant. Elle est comprise entre -1,8 et 7,5 % pour un courant allant de 1 à 100 mA par branche.

3.7.4 Modélisation de la matrice connectée

Pour la dernière topologie, nous obtenus de meilleurs résultats, car la disparité des courants entre LED a été réduite par rapport à la topologie précédente.

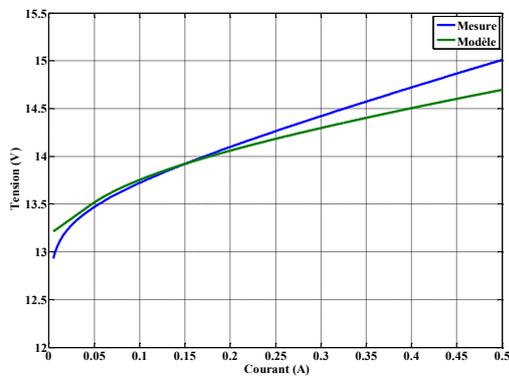


Figure 75a : Courbe $V=f(I)$ mesurée et sa courbe simulée dans Psim pour 25 LEDs en matrice connectée

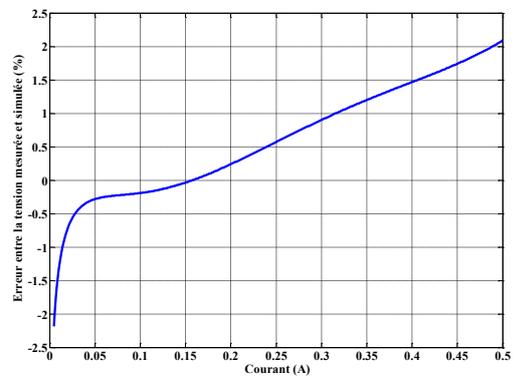


Figure 75 b : Erreur relative entre la tension mesurée et simulée dans Psim pour 25 LEDs en matrice connectée

L'erreur relative entre la mesure et les résultats de simulation est comprise entre -2,2 et 2,1 % pour un courant entre 1 et 100 mA par LED.

3.7.5 Synthèse

La méthodologie de modélisation employée dans ce paragraphe montre qu'en associant les modèles comme dans la réalité, l'ensemble décrit globalement le comportement d'une topologie donnée mais à 100 mA les écarts entre les mesures et les résultats de simulation sont quand même

importants. Nous avons cherché à appliquer une autre méthode d'identification de paramètres pour avoir plus de précision. Nous présentons les premiers résultats obtenus dans les parties suivantes.

3.8 Evolution des modèles en fonction du nombre de LED et de la topologie

Pour les aspects modélisation présentés ci-après, nous cherchons avant tout à généraliser notre approche en termes d'association et voir s'il existe des corrélations possibles pouvant générer des modèles simples respectivement à n LEDs en série, en matrice non connectée et en matrice connectée. L'objectif est d'extrapoler l'association d'un grand nombre de LEDs comme c'est le cas par exemple dans les luminaires encastrés Lucipanel du constructeur Lucibel présentant dans un même luminaire l'association de 400 LEDs. Ceci nous est indispensable pour la conception de l'alimentation électrique pour connaître le comportement de l'ensemble. Nous avons arrêté nos études à un niveau de courant injecté de 100 mA par LED pour couvrir la plage de courant générant le rendement lumineux maximum situé autour de 40 mA.

Pour cela sur la base des platines à notre disposition pouvant avoir des connexions variables, nous avons ajouté progressivement les LEDs pour effectuer des mesures de manière incrémentale pour une topologie donnée.

À chaque nouvelle LED ajoutée, une série de mesure a été effectuée. Sur la base du modèle de type Shockley, nous avons étudié l'évolution des paramètres en fonction du nombre de LEDs associées. La limite a été de 16 LEDs pour l'association série et 13 LEDs pour l'association parallèle en lien avec la limite de puissance délivrable par le Keithley 2602A (1A-40V par sortie). Dans le cas de la matrice connectée, seul le cas d'une matrice carrée a été étudié d'un maximum de 5x5. Nous avons recherché à voir l'évolution des différents coefficients présentés ci-après définis par l'équation (2.10) présentée dans le chapitre II.

3.8.1 Etude de la modélisation de LEDs en série

En série, chaque LED est traversée par le même courant. Les équations 3.1 et 3.2 sont les courants respectifs de chaque LED selon son potentiel de jonction V_D :

$$I_1 = I_{S1} * \exp\left(\frac{q V_{D1}}{n_1 k T}\right) \quad (3.1)$$

$$I_2 = I_{S2} * \exp\left(\frac{q V_{D2}}{n_2 k T}\right) \quad (3.2)$$

En partant d'une première approximation faisant intervenir la résistance série :

$$V_D = V_d + R_s I \quad (3.3)$$

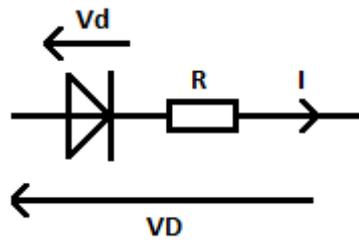


Figure 76 : Schéma équivalent d'une LED avec sa résistance série

Dans la mise en série, le courant traversé par chaque composant est le même, la tension totale V_T aux bornes de l'ensemble correspond à la somme des deux tensions aux bornes de chaque LED :

$$V_T = V_{d1} + V_{d2} + R_{s1}I_1 + R_{s2}I_2 \quad (3.4)$$

En inversant les relations (3.1) et (3.2) et en remplaçant V_{d1} et V_{d2} dans (3.4), nous obtenons :

$$V_T = (\ln(I_1) - \ln(I_{s1})) * \frac{n_1 k T}{q} + (\ln(I_2) - \ln(I_{s2})) * \frac{n_2 k T}{q} + R_{s1}I_1 + R_{s2}I_2 \quad (3.5)$$

Cette expression est factorisable comme suit :

$$V_T = \log(I) * \left((n_1 + n_2) \frac{k T}{q} \right) - \left(\log(I_{s1}) * \frac{n_1}{n_1 + n_2} + \ln(I_{s2}) * \frac{n_2}{n_1 + n_2} \right) * \frac{(n_1 + n_2) k T}{q} + R_{s1}I_1 + R_{s2}I_2 \quad (3.6)$$

Par identification, nous obtenons que la mise en série de deux diodes se comporte comme une seule diode avec les coefficients suivants, $n_1 + n_2$, de courant de saturation $\ln(I_{s1}) * \frac{n_1}{n_1 + n_2} + \ln(I_{s2}) * \frac{n_2}{n_1 + n_2}$ et de résistance série $R_{s1} + R_{s2}$. Par une approche expérimentale, nous pouvons voir que nous pouvons généraliser cette approche à l'ordre n comme le montre le tableau ci-dessous.

Nombre de LED en série	n	Is (A)	Rs (Ω)	R ²	RMSE
1	1,31	2,09 x10 ⁻³⁶	505,26 e ⁻³	0,99998	1,93 x10 ⁻⁴
2	2,64	2,91 x10 ⁻³⁶	1,07	0,99998	3,73 x10 ⁻⁴
3	3,98	3,89 x10 ⁻³⁶	1,58	0,99998	5,68 x10 ⁻⁴
4	5,33	5,28 x10 ⁻³⁶	2,44	0,99998	8,06 x10 ⁻⁴
5	8,02	6,45 x10 ⁻³⁶	3,82	0,99998	1,11 x10 ⁻³
6	8,01	5,62 x10 ⁻³⁶	3,62	0,99998	1,11 x10 ⁻³
7	9,31	4,35 x10 ⁻³⁶	3,95	0,99998	1,30 x10 ⁻³
8	10,62	3,77 x10 ⁻³⁶	4,49	0,99998	1,49 x10 ⁻³
9	11,93	3,47 x10 ⁻³⁶	4,93	0,99998	1,67 x10 ⁻³
10	13,24	3,05 x10 ⁻³⁶	5,25	0,99998	1,87 x10 ⁻³
11	14,54	2,68 x10 ⁻³⁶	6,02	0,99998	2,06 x10 ⁻³
12	17,45	3,07 x10 ⁻³³	7,38	0,99997	2,81 x10 ⁻³
13	18,48	619,78 x10 ⁻³⁶	7,72	0,99996	3,46 x10 ⁻³

Tableau 17 : Evolution des coefficients du modèle de Shockley en fonction du nombre de LED connectée en série

Pour un nombre de LED allant de 1 à 13 connectée en série, une mesure de caractéristique I(V) a été effectuée et sa courbe a été ajustée afin d'en extraire les 3 coefficients de l'équation (2.7). L'objectif est d'observer l'évolution de ces derniers. Il apparaît que les coefficients n et R_s augmentent linéairement au fur et à mesure du nombre de LEDs en série, le coefficient Is semble rester constant. Nous proposons donc pour le modèle de n LEDs en série décrit par l'équation suivante :

$$V_T = n_i \frac{kT}{q} \log(I_i) - n_i \frac{kT}{q} \log(Is_i) + R_i I_i \quad (3.7)$$

3.8.2 Modélisation de LEDs en parallèle

Le processus d'identification entre courbe I(V) relevée expérimentalement et identification des paramètres du modèle est le même que précédemment.

Nombre de LED en parallèle	n	Is (A)	Rs (Ω)	R ²	RMSE
1	1,29	2,60 e ⁻³⁷	740 e ⁻³	0,99997	1,99 e ⁻⁴
2	1,52	3,49 e ⁻³²	610 e ⁻³	0,99993	3,75 e ⁻⁴
3	1,70	5,85 e ⁻²⁹	530 e ⁻³	0,99988	5,78 e ⁻⁴
4	1,89	2,90 e ⁻²⁶	490 e ⁻³	0,99986	7,37 e ⁻⁴
5	1,99	7,15 e ⁻²⁵	470 e ⁻³	0,99992	6,10 e ⁻⁴
6	2,14	3,19 e ⁻²³	450 e ⁻³	0,99991	7,13 e ⁻⁴
7	2,29	8,29 e ⁻²²	430 e ⁻³	0,99989	8,80 e ⁻⁴
8	2,45	1,57 e ⁻²⁰	420 e ⁻³	0,99986	1,08 e ⁻³
9	2,66	4,92 e ⁻¹⁹	430 e ⁻³	0,99982	1,37 e ⁻³
10	2,99	4,03 e ⁻¹⁷	410 e ⁻³	0,99904	3,45 e ⁻³
11	2,78	3,45 e ⁻¹⁸	420 e ⁻³	0,99980	1,64 e ⁻³
12	3,30	7,85 e ⁻¹⁶	350 e ⁻³	0,99935	3,03 e ⁻³
13	3,77	4,50 e ⁻¹⁴	310 e ⁻³	0,99921	3,53 e ⁻³

Tableau 18 : Evolution des coefficients en fonction du nombre de LED en matrice non connectée

Le tableau ci-dessus montre l'évolution des coefficients pour un nombre incrémental de LED connectées en parallèle. Comme pour le cas série, il y a plusieurs choses notables : en négligeant la 11^e LED qui donne des résultats aberrants, le coefficient n évolue toujours presque linéairement. Ensuite le coefficient Rs semble tendre vers une valeur proche de 300 m Ω en augmentant le nombre de LED en parallèle. Et l'exposant de Is ne suit aucune logique et ne peut être prédit.

3.8.3 Modélisation de LEDs en matrice connectée

Nombre de LED par côté de matrice	n	Is (A)	Rs (Ω)	R ²	RMSE
1	1,29	2,60 e ⁻³⁷	740e ⁻³	0,99997	1,99e ⁻⁴
2x2	2,58	7,51 e ⁻³⁷	790e ⁻³	0,99982	1,59e ⁻³
3x3	4,18	3,13 e ⁻³⁴	840e ⁻³	0,99979	2,58e ⁻³
4x4	5,61	6,40 e ⁻³⁴	720e ⁻³	0,99952	5e ⁻³
5x5	7,18	4,23 e ⁻³³	760e ⁻³	0,99922	7,85e ⁻³

Tableau 19 : Evolution des coefficients en fonction du nombre de LED en matrice connectée

Et enfin, en prenant une matrice connectée carrée et en effectuant le même processus que décrit précédemment, de nouveaux coefficients ont été extraits. Dans le cas de la matrice connectée, le nombre de LED augmente très vite pour assurer une matrice carrée. C'est pourquoi il n'y a pas eu beaucoup d'essais qui n'ont pu être effectués avec 25 LEDs. Néanmoins, en s'appuyant sur ces 5 essais, le coefficient n reste linéaire, l'exposant de Is convergent vers une valeur et la résistance série Rs semble rester constante.

3.9 Homogénéité lumineuse

D'après les normes pour l'éclairage, dans le cas d'un contexte en intérieur, le niveau d'éclairage doit être suffisant afin de travailler dans de bonnes conditions. Cependant, le niveau d'homogénéité de la lumière (aussi appelé uniformité) doit aussi être respecté sur le plan de travail. Dans le cas des sources de lumière comme les lampes fluocompactes ou à incandescence, elles émettent de la lumière dans plusieurs directions. Il est alors relativement facile d'adapter le flux global pour arriver à un bon niveau d'homogénéité. Dans le cas des LEDs, elles émettent un faisceau de lumière unidirectionnel et intensif. Cela peut créer des effets de spots sur les luminaires ou sur les plans de travail. Dans le cas d'une utilisation de LED pour créer un luminaire, en plus d'être performant d'un point de vue énergétique, il est nécessaire de se préoccuper de la répartition de la lumière pour qu'elle soit uniforme.

Comme le flux lumineux émis est proportionnel au courant électrique traversant chaque LED et que les tests présentés précédemment montrent que le courant n'est pas le même pour toutes les LEDs dans certaines topologies, notamment la matrice connectée, il est intéressant d'en étudier l'impact sur la lumière émise globale.

3.9.1 Matériel et méthode utilisés :

Pour pouvoir établir la corrélation courant/flux lumineux, nous avons utilisé la seconde voie du Keithley, la première servant à alimenter la platine de LEDs testée. Pour mesurer la lumière émise, nous avons utilisé un appareil de cartographie de luminance nommé photo-luminancemètre qui est à la base un appareil photo Canon EOS 30D reconverti en appareil de mesure. Ce dispositif prend une série de photos et les compile pour obtenir une carte de luminance en agissant sur le temps d'exposition et sur l'ouverture du diaphragme comme degré de liberté.

Le dispositif est placé à 30 cm de la platine de 25 LEDs et de manière perpendiculaire afin de capter la luminance maximale. Les données sont ensuite compilées par le logiciel Photolux [109].

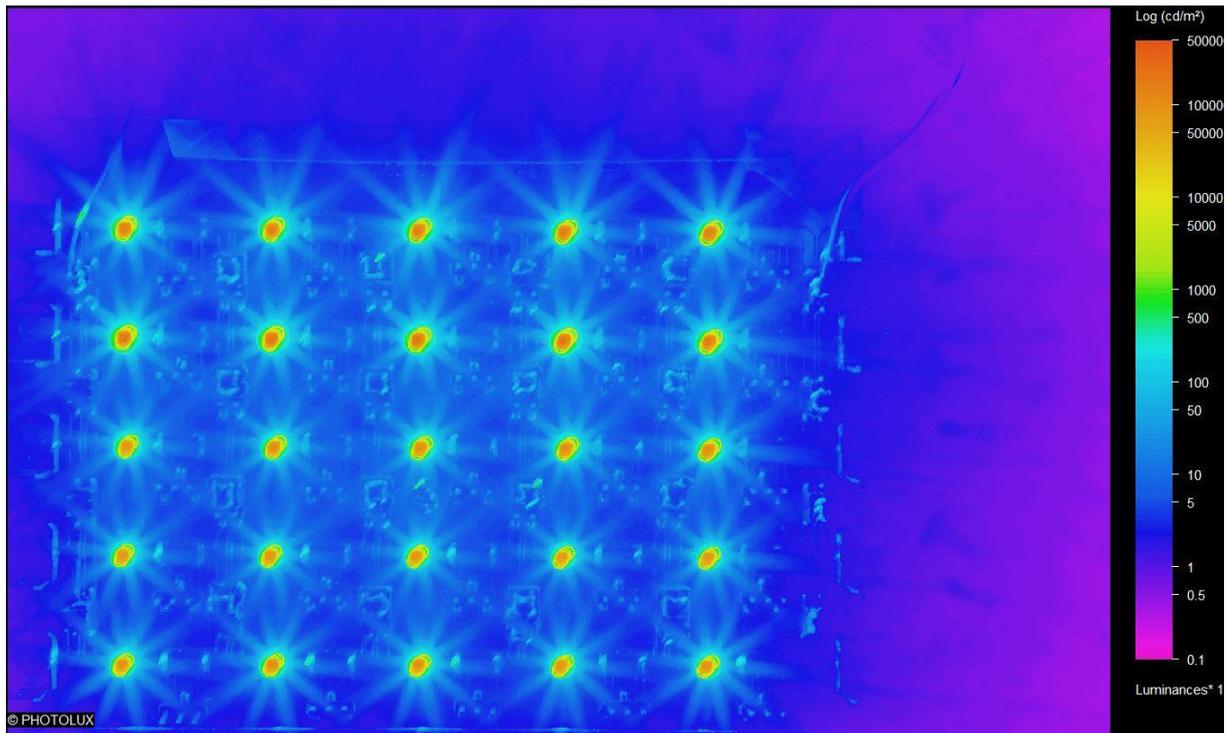


Figure 77 : Exemple de carte de luminance après exploitation des mesures dans le cas de la platine de Lumileds connectées en topologie série

La figure ci-dessus montre un exemple de carte de luminance brute fournie par le logiciel Photolux après compilation des mesures. Nous pouvons remarquer que les LEDs ne présentent pas des points lumineux circulaires mais plutôt elliptiques. Ceci se produit malheureusement lors de prises de photos où l'appareil n'a pas été suffisamment stabilisé. En effet, le moindre décalage a un impact sur le résultat final. Nous avons pu toutefois effectuer les mesures du maximum de luminance qui peut être calculé malgré les micro décalages de l'appareil entre 2 photos.

3.9.2 Etude de la luminance pour la matrice non connectée

La première topologie présentée est celle qui est la plus commune dans les luminaires à LED, à savoir la matrice non connectée. Une fois compilée par Photolux, un tableau est extrait et contenant les valeurs de luminances pour chaque pixel issu des photos. La figure ci-dessous montre le résultat sous Matlab après traitement des données.

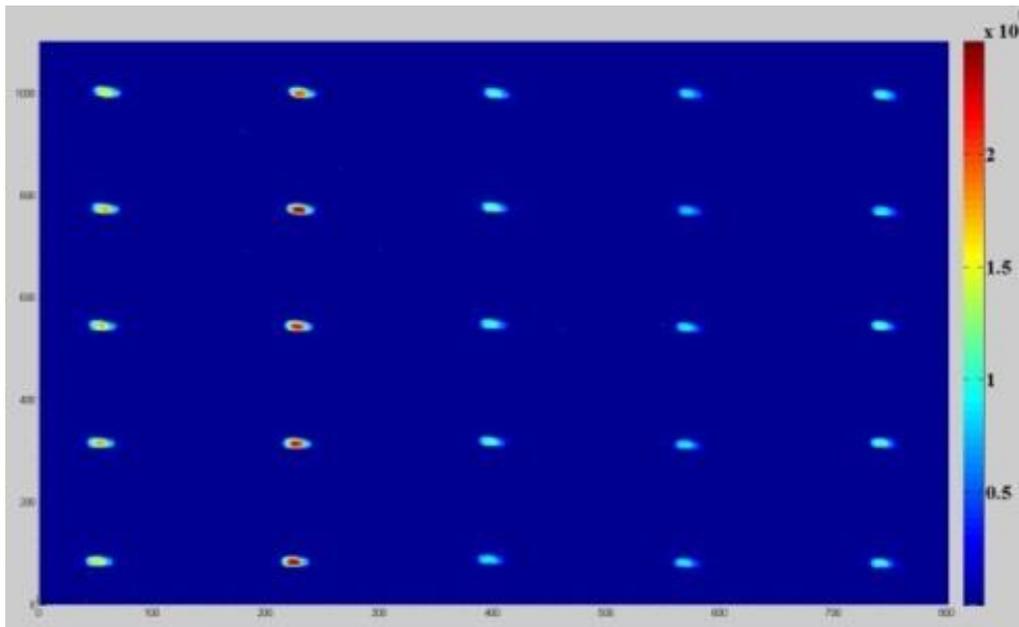


Figure 78 : Carte de luminance de la topologie matrice non connectée pour 25 LEDs Lumileds

En observant la figure 78, il apparaît que la seconde colonne de LED en partant de la gauche est celle qui émet le plus de lumière indiquant que plus de courant doit circuler dans cette branche de LED.

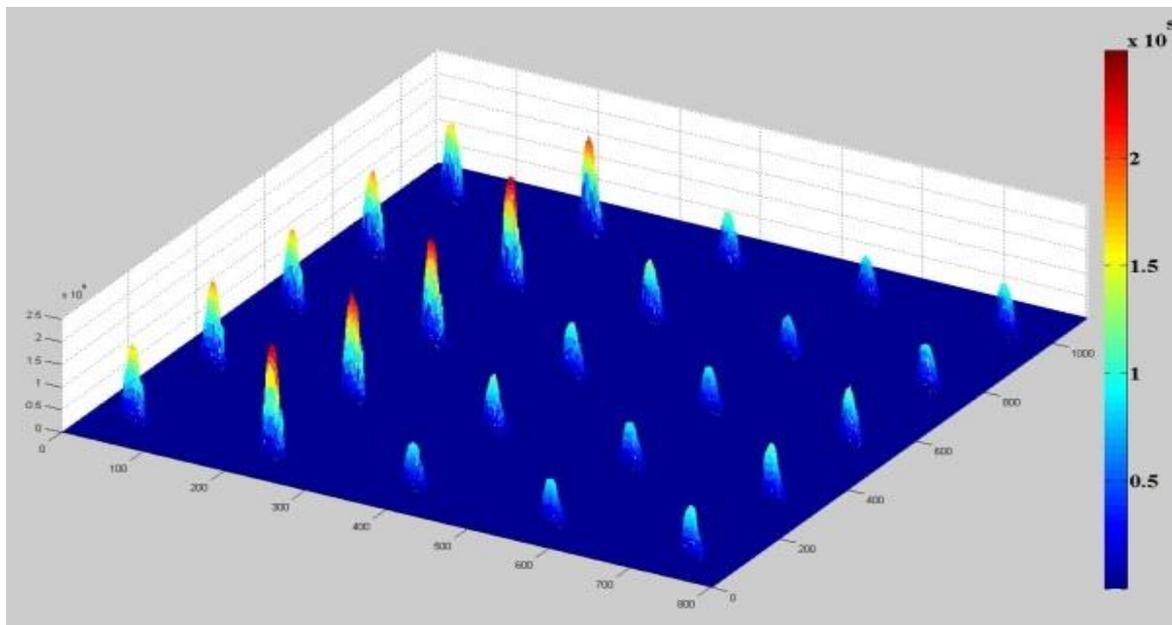


Figure 79 : Carte de luminance en 3D de la matrice non connectée

La carte présentée à la figure 79 est générée grâce à la fonction mesh de Matlab. Cela permet d'avoir une meilleure vision du taux d'émission de lumière que la figure 78. Il apparaît ainsi bien que la seconde

branche de LED est la plus consommatrice de courant suivi de la première, les trois autres ayant des niveaux nettement plus faibles.

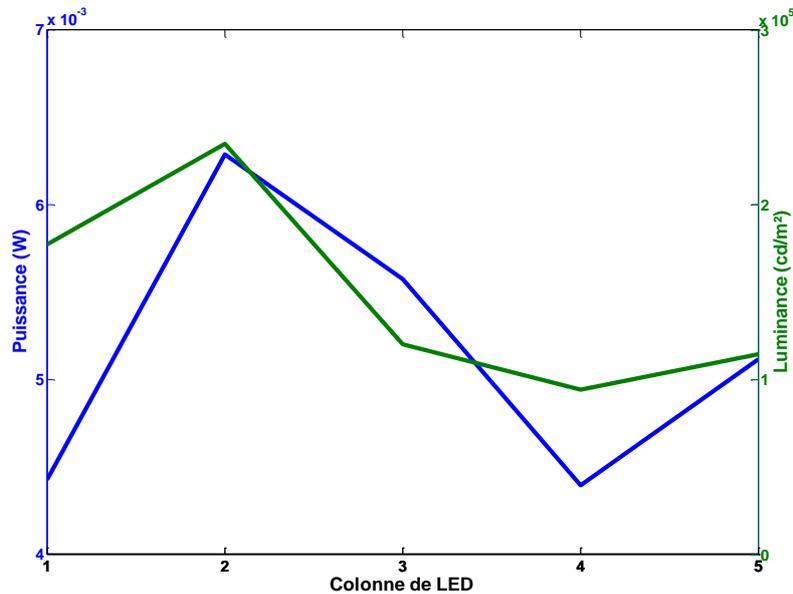


Figure 80 : Représentation de la puissance consommée et de la luminance émise pour chaque branche de la matrice non connectée

En prenant comme première hypothèse, le fait que le courant traversant les 5 LEDs de chaque branche induise une émission de lumière identique (négligeant la dispersion entre composants), la luminance peut être moyennée et comparée avec la puissance consommée par chaque branche comme le montre la figure 80. Ces courbes ont été obtenues en alimentant l'ensemble de 25 LEDs à 10 mA.

Courant injecté (mA)	Puissance moyenne (W)	Ecart-type de puissance (W)	Ecart-type de puissance/puissance moyenne (%)	Luminance moyenne (cd.m²)	Ecart-type de luminance (cd.m²)	Ecart-type de luminance/luminance moyenne (%)
1	$5,06 \times 10^{-4}$	$9,11 \times 10^{-7}$	0,18	5 774	374	0,6
10	$5,16 \times 10^{-3}$	$1,27 \times 10^{-5}$	0,25	119 453	6 647	0,06
20	$11,84 \times 10^{-3}$	$2,94 \times 10^{-5}$	0,25	287 752	10 677	0,04
30	$17,45 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{-5}$	0,34	422 975	16 142	0,04

Tableau 20 : Ecart type de luminance et luminance moyenne pour la matrice non connectée

Le tableau ci-dessus montre l'impact de la répartition du courant sur la luminance pour 4 courants injectés. La puissance moyenne est calculée pour 25 LEDs et l'écart type de puissance est calculé pour 5 lignes de LED. Le ratio écart-type divisé par la puissance moyenne pourrait être assimilé à un facteur de répartition du courant. Dans le cas du ratio pour des puissances, si le coefficient est égal à zéro, il

n'y a pas de problème de répartition du courant. Une analogie est faite à la dernière colonne pour le ratio des luminances.

3.9.3 Etude de la luminance pour la matrice connectée

La seconde topologie présentée est la matrice connectée avec 25 LEDs Lumileds.

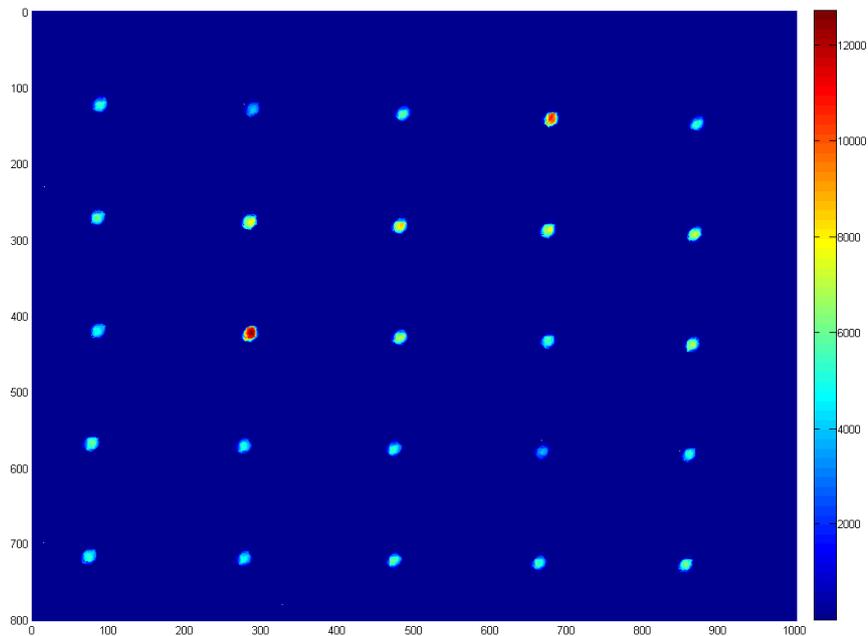


Figure 81 : Carte de luminance de la topologie matrice connectée pour 25 LEDs Lumileds

En observant la figure 81, il apparaît que contrairement à la matrice non connectée, les points ne sont plus répartis sur une même ligne mais à des endroits selon le niveau de courant injecté dans chaque LED. La LED (1,4) par exemple ou la LED (3,2) sont celles qui émettent le plus de lumière et sont donc les plus consommatrices de courant.

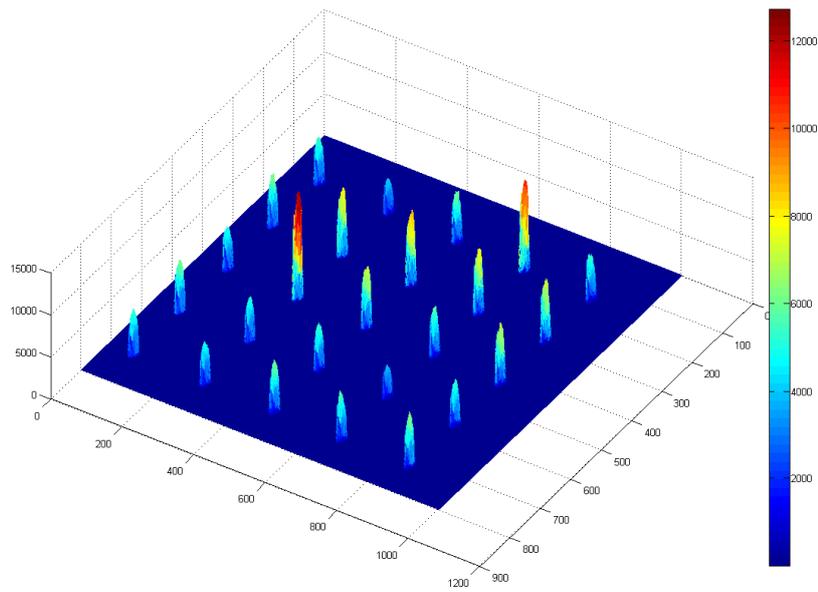


Figure 82 : Carte de luminance en 3D de la matrice connectée

La figure 82 est la même que la figure précédente mais en 3D pour permettre une meilleure observation des dispersions. Les 2 LEDs citées précédemment sont bien celles qui émettent plus de lumière que les LEDs adjacentes.

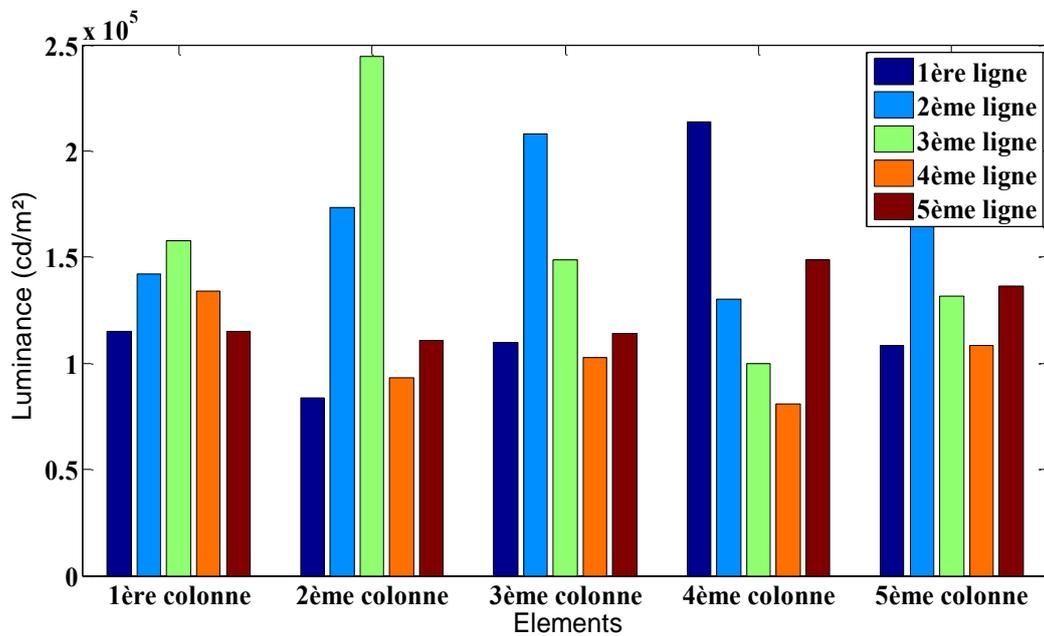


Figure 83 : Luminance émise en matrice connectée pour 25 LEDs Lumileds

La figure 83 montre pour 10 mA injecté la répartition des luminances dans les 25 LEDs. Pour faire la corrélation avec la carte de luminance ci-dessus, nous voyons bien que les LEDs (1,4) et (3,2) sont celles qui émettent le plus. Pour faire la corrélation entre la figure 83 et la figure 81, il faut dans un premier temps choisir la colonne où se trouve la LED avec les abscisses et choisir ensuite la LED parmi les 5 barres celle qui correspond à la ligne. Ce graphique permet de voir que les LEDs en 2 et 4^{ème} colonne sont les plus brillantes mais il révèle qu'il y a une autre LED qui se trouve en 3^{ème} colonne qui n'avait pas été détectée précédemment juste en observant les précédents graphiques.

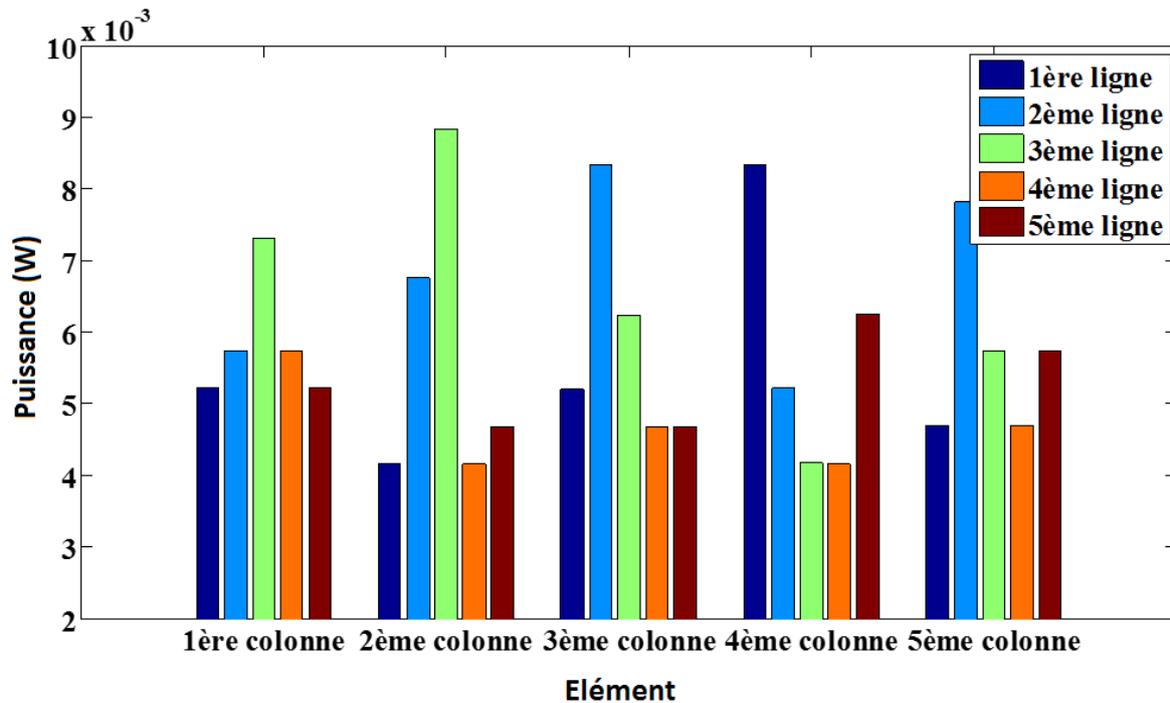


Figure 84 : Puissance consommée en matrice connectée pour 25 LEDs Lumileds

La figure 84 montre la répartition des puissances pour 25 LEDs en matrice alimentées par un courant de 10 mA. En observant les profils pour chaque ligne ou colonne, il apparaît qu'il y a un comportement proche entre l'émission de lumière et la consommation.

Courant injecté (mA)	Puissance moyenne (W)	Ecart-type de Puissance (W)	Ecart-type de puissance / Puissance moyenne (%)	Luminance moyenne (cd.m ²)	Ecart-type de luminance (cd.m ²)	Ecart-type de luminance / Luminance moyenne (%)
1	1,37 x10 ⁻³	1,23 x10 ⁻⁴	8,9	6 575	1 097	0,17
10	5,75 x10 ⁻³	1,42 x10 ⁻³	24,6	135 702	17 132	0,13
20	1,14 x10 ⁻²	3,67 x10 ⁻³	32,2	282 974	37 414	0,13
30	1,66 x10 ⁻²	6,36 x10 ⁻³	38,2	441 061	54527	0,12

Tableau 21 : Ecart type de luminance et luminance moyenne en matrice connectée pour 25 LEDs Lumileds

Le tableau 21 montre comme précédemment les dispersions et moyennes de puissance et luminance pour la matrice connectée à différents courants d'alimentation. En comparant avec la

matrice non connectée, il est possible de dire que le ratio écart-type divisé par la moyenne des luminances est 3 fois supérieur dans le cas de la matrice-connectée. Il est aussi possible de noter que le ratio concernant les puissances est très supérieur (entre 50 et 115 fois).

3.9.4 Etude de la luminance pour la topologie série

La dernière topologie étudiée concerne la connexion en série. L'étude présentée précédemment concerne l'impact de la répartition de courant sur la luminance. Dans le cas d'une topologie série, il n'y a pas de répartition de courant. Cependant même avec le même courant, nous avons pu constater que l'émission de lumière n'est pas similaire.

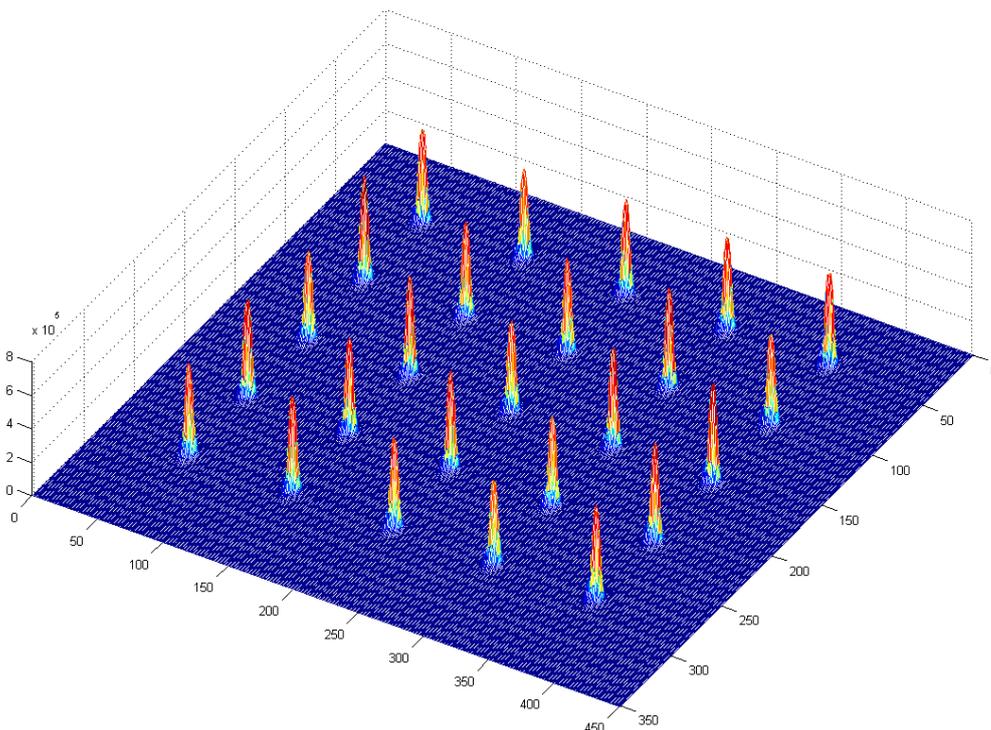


Figure 85 : Carte de luminance en 3D de la topologie série pour 25 LEDs Lumileds

La figure 85 montre la carte de luminance pour la topologie série. Il est très compliqué de voir les différences de luminance même en changeant l'orientation. Cela, car en série, par définition, le courant est le même dans les LEDs.

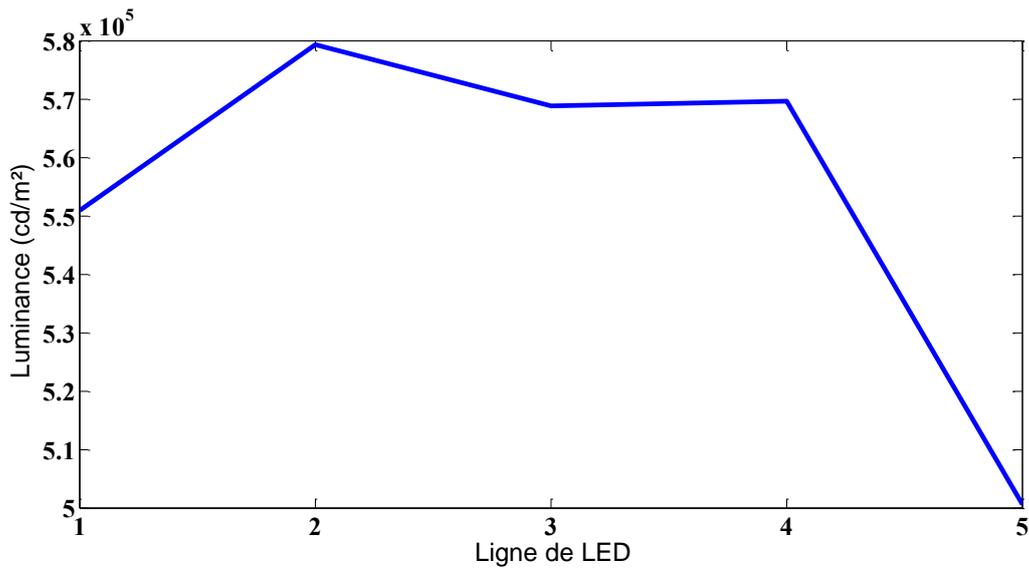


Figure 86 : Luminance émise pour chaque ligne de la topologie série

La figure 86 montre le résultat après avoir moyenné les luminances de 5 lignes de 5 LEDs en série, il apparaît qu'elles ne sont pas les mêmes. Il y a un différentiel de 80 000 cd/m — qui est mesuré ce qui correspond à 15 % de la luminance maximale. Cet écart est dû aux différences de tension qui apparaissent entre les différentes LEDs en série, ces dernières sont principalement dues de la disparité des composants.

3.9.5 Sensibilité des topologies :

La sensibilité d'une topologie aux dispersions de puissance et donc aux répartitions de courant peut être calculée avec la formule :

$$S = \frac{\frac{\text{Ecart-type de luminance}}{\text{Luminance moyenne}}}{\frac{\text{Ecart-type de puissance}}{\text{Puissance moyenne}}} \quad (3.7)$$

Topologie	Courant injecté (mA)	Ecart-type de puissance / Puissance moyenne (%)	Ecart-type de luminance / Luminance moyenne (%)	Sensibilité
Matrice non connectée	1	0,18	0,6	3,33
	10	0,25	0,06	2,4 x10 ⁻¹
	20	0,25	0,04	1,6 x10 ⁻¹
	30	0,34	0,04	1,18 x10 ⁻¹
Matrice connectée	1	8,9	0,17	1,91 x10 ⁻¹
	10	24,6	0,13	5,28 x10 ⁻¹
	20	32,2	0,13	4,04 x10 ⁻¹
	30	38,2	0,12	3,14 x10 ⁻¹

Tableau 22: Sensibilité de la luminance aux répartitions de courant pour les deux matrices

Le tableau ci-dessus montre que pour la topologie matrice connectée, les dispersions vont augmenter proportionnellement au courant qui l'alimente, la sensibilité du montage va en diminuant. Il est possible de noter qu'il y a un facteur 10, voire 100 entre les deux topologies pour un même niveau de courant injecté.

3.10 Contraste de lumière et uniformité

Les plaintes les plus fréquentes résultant de mauvais système d'éclairage concernent les difficultés à lire un document ou un écran d'ordinateur (trop de lumière, l'éblouissement, l'apparition de reflets, trop peu de lumière ou d'ombres), induisant de la fatigue visuelle ou des maux de tête. La lumière a en effet un impact sur la physiologie humaine, mais les problèmes induits par la répartition des courants ne peuvent pas être directement remarqués par les yeux. Notre système visuel ne voit que le contraste de lumière pour reconnaître les personnes, les objets, les mots ou notre environnement plus généralement. La première partie de l'étude suivante est sur le contraste de la lumière émise par les LED de la plaque et la deuxième sur l'uniformité de la lumière.

Contraste de lumière à l'émission des LEDs :

Le contraste de luminance est défini par la formule de Weber-Fechner:

$$\text{Contraste} = \frac{L_t - L_b}{L_b} \quad (3.8)$$

Avec :

L_t : la luminance de la cible,

L_b : la luminance de fond.

Une carte de luminance est composée de points représentant une luminance ponctuelle. Chacune des cartes est faite de plusieurs centaines de milliers de points de luminance. Pour chaque LED, un carré est isolé et deux surfaces sont étudiées :

- La première qui correspond à la surface émettrice de la LED est considérée comme tel si elle a une luminance supérieure à quelques cd/m — et sera assimilée à la luminance de la cible,
- La seconde correspond à la platine de LED et qui sera considérée comme la luminance de fond.

La formule de Weber-Fechner suit une loi logarithmique. Ainsi, une différence de 5 amplitudes correspond à un facteur de 100 en intensité lumineuse.

Etude du contraste pour la matrice non connectée

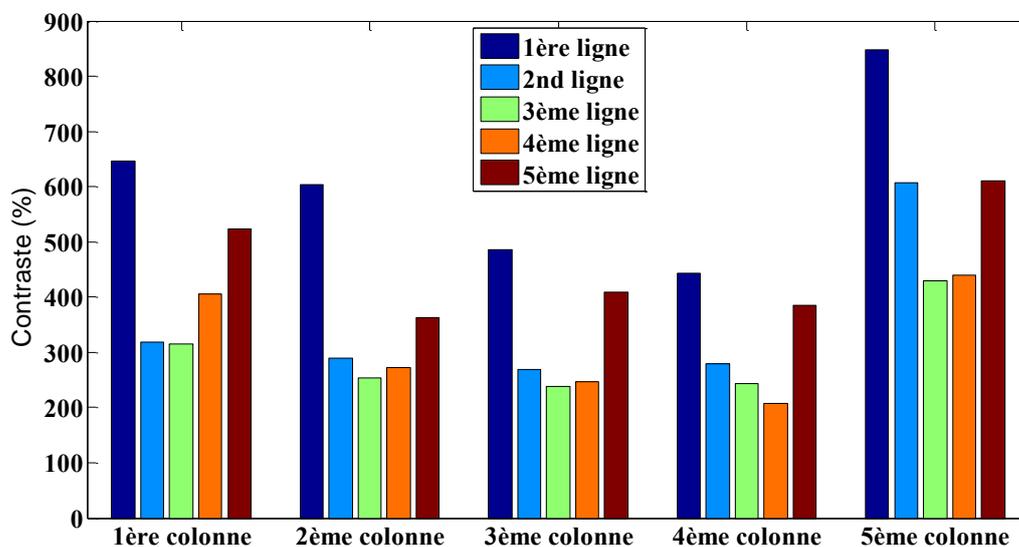


Figure 87 : Contraste de lumière dans la matrice non connectée

La figure 87 illustre que, bien qu'un même courant traverse une ligne de 5 LEDs, l'émission de lumière n'est pas identique. En observant l'écart maximum sur la première ligne, il apparaît qu'il y a un rapport de 400 %. En calculant le différentiel entre le contraste le plus faible et le plus fort sur la platine, il y a plus de 550 % de différence. Là aussi cet aspect devra être mieux étudié dans le cas d'un nouveau prototype pour éviter une aussi grande dispersion de contraste lumineux.

Etude du contraste pour la matrice connectée

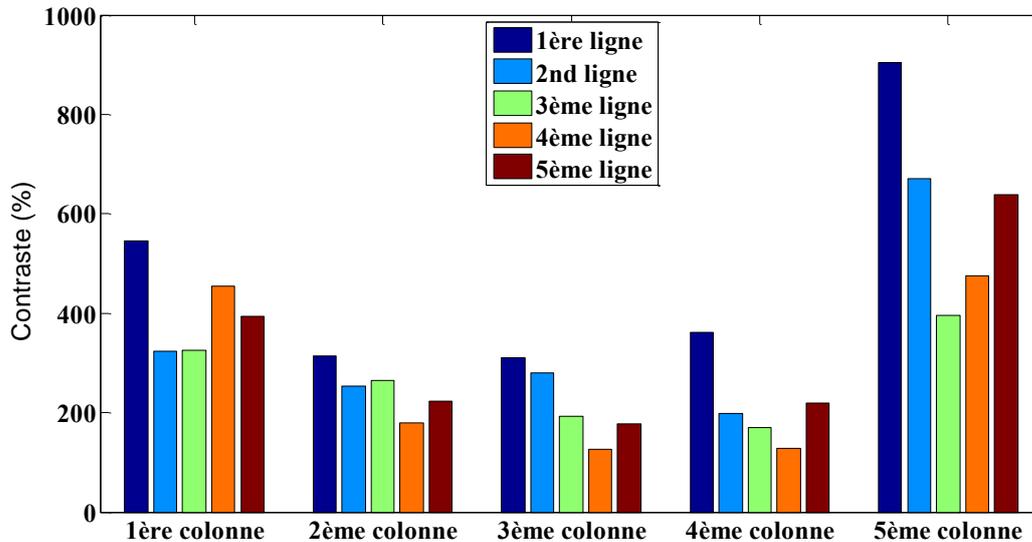


Figure 88 : Contraste de lumière dans la matrice connectée

La matrice connectée ayant plus de problèmes de répartition de courant, la conséquence est que les contrastes sont encore plus marqués. Cette topologie fait que chaque LED est indépendante des autres contrairement au cas précédent où 5 LEDs ont leurs grandeurs un peu plus moyennées. Ici, la différence de contraste maximale induit un ratio de 850 % dans le pire cas. Ce n'est finalement pas aussi important que ce que la différence des courants.

3.10.1 Etude de l'uniformité théorique pour les matrices :

L'uniformité de la lumière sur une surface se définit comme le rapport entre l'éclairement minimal sur l'éclairement moyen. L'éclairement ponctuel peut être obtenu en utilisant l'intensité lumineuse et la relation de Bouguer en connaissant la distance :

$$E = \frac{I}{D^2} \tag{3.9}$$

Avec :

E : l'éclairement (lx)

I : l'intensité lumineuse (cd)

D : la distance (m²)

À partir de la luminance mesurée, il est possible d'avoir l'intensité lumineuse en connaissant la surface émettrice et en faisant l'hypothèse que la diffusion de la lumière se fait selon une distribution Lambertienne. Le photo-luminancemètre est placé perpendiculairement à la platine de LED en visant la LED au centre. La distance les séparant étant de 2 m. La surface émettrice sur la LED est de 1,4 μm.

Topologie	Eclairage minimum (lx)	Eclairage moyen (lx)	Uniformité (%)
Matrice non connectée	$3,77 \text{ e}^{-4}$	$5,88 \text{ e}^{-4}$	64
Matrice connectée	$4,6 \text{ e}^{-4}$	$2,29 \text{ e}^{-4}$	50

Tableau 23 : Eclairage minimum, moyen et uniformité de la lumière pour les deux matrices à 2 m

Les éclairages obtenus dans le tableau ci-dessus sont infimes, car le courant alimentant les LEDs est de 2 mA dans les tests. L'uniformité lumineuse dépend principalement de la répartition de courant lorsque les LEDs sont connectées en matrice. C'est pourquoi lorsque le phénomène de répartition de courant a été analysé, l'étude a été faite à faible et fort courant afin de voir si les répartitions pouvaient être similaires.

3.11 Conclusion

Au vu de l'ensemble des essais menés dans cette étude, nous en arrivons à la conclusion qu'avant tout, pour avoir une excellente qualité d'un luminaire à LEDs, une homogénéité des caractéristiques des LEDs est indispensable. D'où le besoin de faire appel à des échantillons de LEDs triées. D'autre part, la technologie mise en œuvre est aussi importante pour avoir des LEDs de bonne qualité qui génèrent de la lumière avec une faible consommation, soit un faible niveau de courant. Cependant, il est aussi important de savoir comment les agencer au mieux afin d'éviter d'autres problèmes comme la rupture en contact ouvert d'une LED en topologie série qui entraîne la mise immédiate hors service du luminaire. Lorsque les LEDs sont associées en matrice (connectée ou non), le fait qu'elles soient identiques est encore plus important, car les problèmes de répartition de courant qui en découlent entraînent ensuite des disparités au niveau de l'émission de lumière. À partir d'une LED, un modèle a été généré avec une série de coefficients ayant une signification physique et une précision proche de 100 % en comparant avec les mesures. Le modèle a été multiplié et connecté avec d'autres pour avoir des topologies comparables aux platines. Les courbes de courant tension résultante étaient d'une bonne précision mais les paramètres physiques en découlant présente des différences qui pourraient impacter l'alimentation et plus particulièrement l'asservissement de courant. C'est pourquoi un ajustement a été effectué pour prédire la valeur des paramètres. Enfin, nous avons pu constater que même avec des courants similaires, il reste encore pas mal de dispersion et de contraste qu'il est très important de rééquilibrer afin de ne pas éblouir, et en même temps, de ne pas fatiguer les yeux en cas de manque de lumière.

Références

[108] Saguatti D, Bidinelli L, Verzellesi G, Member S, Meneghini M, Meneghesso G, Zanoni E, Butendeich R and Hahn B 2012 Investigation of efficiency-droop mechanisms in multi-quantum-well InGaN/GaN blue light-emitting diodes IEEE Trans. Electron Devices 59 1402–9

[109] <http://www.photolux-luminance.com/>

Chapitre 4 : Prototype de luminaire à LED

4.1 Introduction

En se basant sur les études et conclusions obtenues dans les chapitres précédents, un luminaire prototype a été mis en œuvre utilisant la méthode de conception originale présentée dans le chapitre 3 où nous préférons faire fonctionner les LEDs à faible courant mais dans leur zone d'optimisation de rendement lumineux même s'il faut augmenter le nombre de LEDs nécessaires par rapport à un luminaire existant. Nous avons fait le choix d'associer en matrice connectée. Une alimentation électrique fournissant le courant au groupe de LEDs a été conçue spécifiquement à ce projet. Avant tout, nous nous sommes basées sur la modélisation globale du luminaire pour effectuer les diverses optimisations. De plus, l'alimentation a été réalisée afin de ne pas contenir de composants sensibles à la chaleur comme les capacités électrolytiques. L'objectif est que l'ensemble ait une fiabilité plus importante que l'existant. Une fois modélisé puis réalisé, le luminaire à LED a été étudié d'un point de vue thermique afin de s'assurer que la durée de vie des LEDs est convenable en mesurant la température au plus proche du PCB et en utilisant les analogies thermiques afin d'évaluer la température de jonction de la LED. En outre, une série de simulations sous Comsol ont été effectuées afin de confirmer que ces températures n'ont pas atteint des valeurs critiques. Finalement, une étude optique a été réalisée sur les LEDs composant le luminaire afin d'en déduire sa photométrie finale. À partir de l'évaluation de la répartition lumineuse, une simulation d'éclairage a été réalisée afin de comparer plus en détail les situations utilisant notre prototype dans le logiciel Dialux. Afin d'extrapoler les résultats obtenus dans cette thèse, une étude économique a été effectuée en tenant compte du type, du nombre de LEDs, la manière de les associer afin de prédire les consommations, le temps de retour sur investissement avec relampage de 3 ou 5 ans et en fonction du prix de l'électricité afin de déterminer si les solutions proposées avec le prototype sont viables puis prévoir un outil d'aide pour la conception des prochains prototypes.

4.2 Conception d'un prototype de luminaire à LED

À partir de l'évaluation du rendement des LEDs sur le marché, l'un des objectifs est d'évaluer s'il serait intéressant de privilégier un nombre de LED plus important alimenté à faible courant. L'une des perspectives est de pouvoir comparer une solution à 3 tubes fluorescents 14W ou 4 tubes fluorescents 18W et un luminaire avec les LEDs actuellement disponibles sur le marché et d'en évaluer le retour sur investissement.

4.2.1 Contexte des tests comparatifs

Plusieurs lieux de tests ont été identifiés pour comparer les performances d'un prototype issu des études de cette thèse avec des luminaires existants. Nous avons choisi d'orienter la conception de ces luminaires vers des lieux d'activités de type tertiaire à usage principal diurne (bureau, pièce technique, hall, salle de cours ...). Pour des raisons de facilité de maintenance et d'insertion dans l'existant, nous avons choisi une dimension de luminaire 600 x 600 mm pouvant être utilisée pour remplacer des luminaires fluorescents standards 3 x 14 W ou bien des équivalents encastrés à LEDs.

Dans les trois sites expérimentaux, l'ensemble des installations est monitorée avec recueil automatique des données expérimentales en termes de température et données électriques. Pour ADREAM, ces données peuvent en plus être corrélées à des capteurs mesurant le taux d'éclairement naturel. Les prototypes doivent avoir les mêmes dimensions que les produits industriels pour pouvoir s'insérer dans un contexte réel et être laissés pendant un temps important.

Le prototype de luminaire de bureau est le dernier appareil réalisé en lien avec les travaux de thèse. Sa conception s'appuie sur l'étude globale des LEDs et de son ballast associé. Ce dernier a été conçu pour être connecté à un bus continu 48V relié à une batterie de panneau photovoltaïque.

Analyse du luminaire original



Figure 89 : Photo mise en place en plafonnier du luminaire original Lucipanel

Pour faciliter la réalisation du prototype, un luminaire industriel a été recyclé. L'objectif est de récupérer une armature fonctionnelle et esthétique. Ses caractéristiques sont les suivantes :

Caractéristiques initiales du prototype commercial	
Puissance (W)	40
Équivalence fluorescente	2 x 36 W/2 x 56W
Flux lumineux (lm)	3 150
Angle d'ouverture (°)	120
Durée de vie estimée (h)	50 000
Efficacité (lm/W)	79

Tableau 24 : Caractéristiques du luminaire avant optimisation

Le luminaire original affiche un rendement lumineux de 80 lm/W, ce qui est comparable à un luminaire à tube fluorescent 3x14W. Il offre une durée de vie de 50 000 heures, soit 20 années de fonctionnement en prenant 2 500 heures de fonctionnement annuel. En comparant, un tube fluorescent est changé tous les 7 500 ou 12 500 heures de fonctionnement.

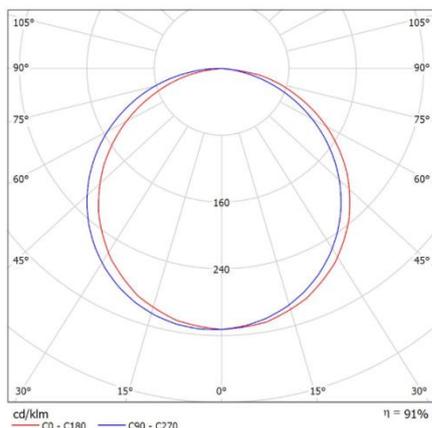


Figure 90 : Diagramme des intensités lumineuses

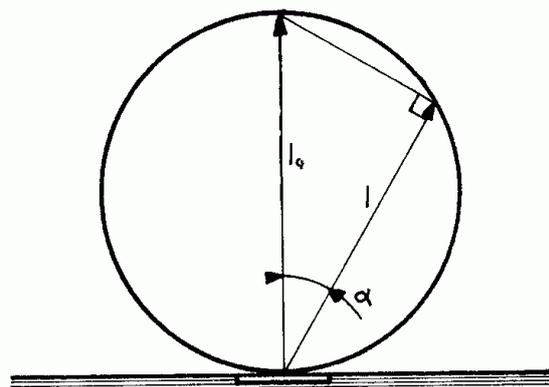


Figure 91 : Description de la fonction Lambertienne

La figure 90 montre le diagramme des intensités du luminaire original issu de la documentation technique, cette distribution est dite de type Lambertienne. C'est-à-dire que l'intensité lumineuse est réfléchie suivant la loi suivante : $I = I_0 \cos(\alpha)$. En outre, la luminance est constante, quelle que soit la direction qui observe le luminaire. Enfin, le rendement du luminaire est de 91 %.

Caractéristiques théoriques du prototype

Les LEDs utilisées pour réaliser le prototype sont sélectionnées parmi celles ayant le meilleur rendement lumineux dans toutes celles étudiées durant ces travaux. De même pour le choix de la topologie globale qui est choisie comme la plus efficace, c'est-à-dire la matrice connectée. À l'origine, 2 prototypes devaient être testés : l'un avec une matrice 5x20 LEDs et l'autre 10x10 LEDs. Le courant a été choisi pour permettre d'avoir l'efficacité de conversion maximale.

Caractéristique électrique du luminaire					
Matrice	Tension (V)	Courant (A)	Puissance (W)	Flux (lm)	Rendement (lm/W)
10x10	28	0,9	25,1	4 227	168
20x5	55,9	0,45			

Tableau 25 : Caractéristiques théoriques du prototype

Bien que la puissance soit similaire, les tensions d'entrée sont différentes et donc les ballasts associés seront aussi différents. Ici, pour un réseau 48V, l'un des luminaires sera associé à un convertisseur abaisseur Buck et l'autre à un élévateur Boost. De plus, en utilisant les mêmes systèmes optiques (plexiglas et diffuseur) pour la diffusion de la lumière, il devrait y avoir les mêmes pertes optiques. En conséquence, les 4227 lm qui sont émis par les LEDs tombent à 3762 lm et le nouveau rendement système qui est de 150 lm/W.

4.2.2 Choix des LED utilisées dans le prototype

Suite à l'ensemble des études menées dans cette thèse, les LEDs qui ont été sélectionnées pour la réalisation du prototype sont les : CREE XPGWHT-01-0000-00FE5. La première raison de ce choix est leur rendement lumineux qui surpasse tout ce qui a été mesuré au cours des travaux. Ensuite, elles émettent un blanc à 4000 K ce qui permet de faire une meilleure comparaison avec les tubes fluorescents. Et enfin, elles affichent un prix de moins de 2 € pour les particuliers ce qui est intéressant.

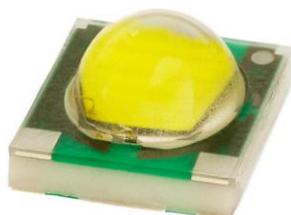


Figure 92 : CREE XPGWHT-01-0000-00FE5

Ses principales caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

Paramètres	unités	Valeur typique	Valeur maximale
Résistance thermique	°C/W	4	
Courant de fonctionnement	mA	350	1500
Tension inverse	V		5
Tension à 350 mA (à 25 °C)	V	2,9	3,25
Température de jonction (°C)	°C	80	150
Température de couleur (K)	K	4000	

Tableau 26 : Principales caractéristiques constructeur des LEDs référencées CREE XPGWHT-01-0000-00FE5

Les LEDs pour le prototype fonctionneront très en dessous des caractéristiques indiquées ci-dessus, le rendement en fonctionnement nominal avoisine les 170 lm/W.

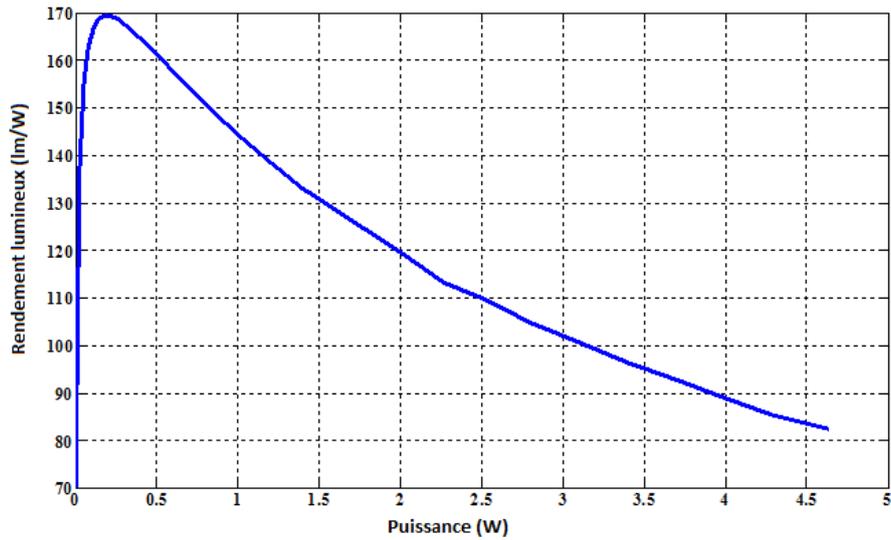


Figure 93 : Rendement lumineux en fonction de la puissance de la LED CREE XPGWHT-01-0000-00FE5 mesuré en laboratoire à 35 °C

Le rendement lumineux de la LED atteint 170 lm/W à une puissance consommée de 25 mW. À titre de comparaison, la lampe à incandescence a une efficacité de 15 lm/W et les tubes fluorescents atteignent 80-100 lm/W pour 14 W. Ce rendement maximum est calculé en injectant un courant de 70 mA, la température de la LED en régime établie est de 35 °C et le flux lumineux est de 33 lm. Pour chacune des mesures faites ci-dessus, une durée d'attente de 5 min a été respectée avant d'effectuer les mesures afin d'atteindre un régime permanent thermique.

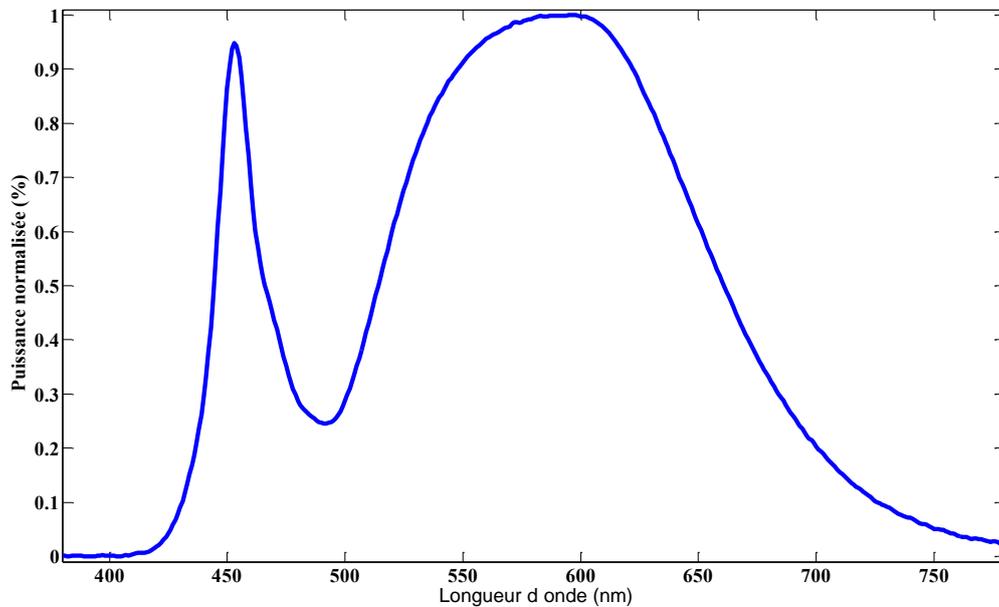


Figure 94 : Spectre énergétique de la LED CREE XPGWHT-01-0000-00FE5

Le spectre de la LED XPGWHT-FE5 se caractérise par un pic bleu à 453 nm. Pour la figure 91, il a été normalisé par rapport à la valeur maximale pour pouvoir quantifier l'énergie émise dans le « bleu ». Il est à noter que les niveaux d'énergie émis dans le bleu et dans les longues longueurs d'onde sont presque similaires. La température de couleur de la LED est de 4 000 K.

4.2.3 Études des gains d'efficacité et pertes de flux lumineux:

Pour réaliser un choix parmi les diverses technologies de LEDs, au vu des études effectuées dans le chapitre 3, nous avons opté pour que les LEDs fonctionnent dans leur régime optimal en termes de rendement lumineux. Nous résumons les divers résultats obtenus au point optimum comparés au fonctionnement à 350 mA dans le tableau ci-dessous.

Type de LED	Topologie	Rendement lumineux à 350 mA (lm/W)	Rendement lumineux maximum (lm/W)	Gain (%)
XPG-G2	Série	69,0	84,1 à 40 mA	22,0
	Non connecté	66,8	81,8 à 40 mA	22,5
	Connecté	71,2	88,2 à 40 mA	23,9
Lumiled	Série	54,3	69,4 à 25 mA	27,7
	Non connecté	55,4	74,0 à 25 mA	33,4
	Connecté	56,3	75,7 à 25 mA	34,4
LCW	Série	40,5	62,2 à 6 mA	53,6
	Non connecté	39,8	63,8 à 6 mA	60,5
	Connecté	39,9	64,4 à 6 mA	61,4
XPGWHT-FE5		140	169 à 90 mA	38,5

Tableau 27 : Rendement lumineux et gain de rendement lumineux en utilisant les LEDs à efficacité maximale

Le tableau 25 montre la différence qui apparaît lorsqu'une LED est utilisée au courant normé comparé à son courant optimal. En se concentrant sur les 3 premières LEDs étudiées, il y a entre 22 et 61 % de gain en efficacité en alimentant les LEDs à leur point d'efficacité nominale.

Toutefois, pour la réalisation d'un luminaire complet, le critère qui doit être pris en compte est avant tout le flux émis global. Une très grande efficacité est inutile s'il n'y a que quelques lumens qui sont émis n'assurant pas la fonction d'éclairage principale. Le principal compromis de l'étude de faisabilité de ces travaux se trouve sur le rapport efficacité/perte de flux ou efficacité/flux émis. Les paramètres comme la température de fonctionnement ou le courant d'alimentation découlent de ce compromis. Le tableau 26 montre la perte en flux lumineux lorsqu'une LED est utilisée à courant optimal et le nombre de LED nécessaires pour avoir le même flux lumineux tout en sous-alimentant l'ensemble. Dans le cas des LEDs émettant très peu de lumière, cela va considérablement multiplier le nombre de LEDs alors que pour les LEDs à forte émissivité, l'augmentation du nombre de LEDs est moindre. À ce stade, bien entendu, nous ne tenons pas compte des surcoûts que cela engendre dans le produit final.

		Flux à 350 mA par LED (lm)	Flux à efficacité maximale (lm)	Perte du flux (%)	Facteur multiplicatif nécessaire pour rattraper un flux à 350 mA
XPG	Série	72,42	14,272	80	6
	Non connecté	71,768	8,732	88	9
	Connecté	77,084	9,404	88	9
Lumiled	Série	55,212	4,712	91	12
	Non connecté	54,524	4,008	93	14
	Connecté	55,636	4,104	93	14
LCW	Série	44,168	1,052	98	42
	Non connecté	41,644	0,856	98	49
	Connecté	41,52	0,86	98	49
XPGWHT-FE5		122	42,3	71	4

Tableau 28 : Nombre de LEDs nécessaire pour compenser la perte de flux à efficacité maximale

4.2.4 Les convertisseurs statiques

Une alimentation a pour but de fournir une tension, en vue d'alimenter des appareils à partir du réseau électrique alternatif national ou d'un réseau continu d'une installation photovoltaïque. Ces alimentations ont la nécessité de réguler les tensions de sortie en fonction des charges et d'assurer l'isolement galvanique. En outre, il est important pour ces dernières d'avoir les meilleurs rendements, d'être petit et léger ou encore de pouvoir générer plusieurs tensions isolées et régulées. Ces exigences sont aujourd'hui possibles depuis le développement des composants de puissance. En effet, depuis 1975, les alimentations fonctionnant à très haute fréquence utilisent le principe du « découpage ». Et depuis lors, les alimentations, les techniques de réalisation ou d'intégration n'ont cessé de s'améliorer. Les convertisseurs statiques sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant, que cela soit au niveau de sa nature ou de sa valeur. Il est possible de les classer en 4 catégories selon leur action sur la tension : redresseur, hacheur, onduleur et gradateur.

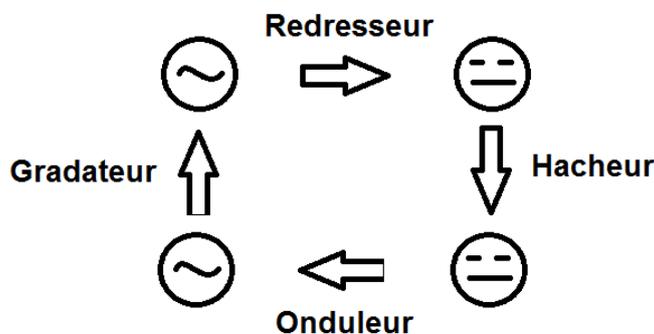


Figure 114 : La nature du courant électrique et les méthodes de transformation

Convertisseur Buck

Le ballast qui alimente le prototype est un convertisseur Buck. Il s'agit d'une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une tension de même nature et plus faible.

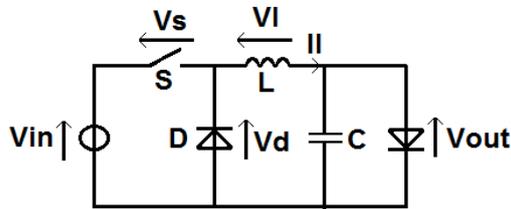


Figure 115 : Schéma électrique du Buck

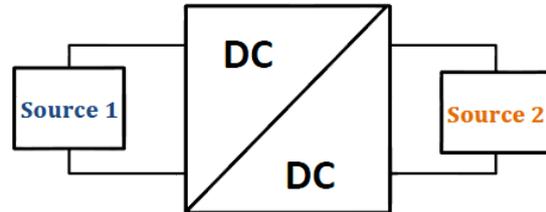


Figure 116 : Schéma de principe du Buck

Son fonctionnement est le suivant :

Sur une période de découpage \$T\$ avec un rapport cyclique \$\alpha\$ imposé, l'interrupteur \$S\$ est fermé de \$0\$ à \$\alpha T\$. La source 1 fournit de l'énergie à la charge \$R\$ et l'inductance \$L\$. Lors du blocage à l'instant \$\alpha T\$, la diode de roue libre \$D\$ assure la continuité du courant et la décharge de l'inductance dans \$R\$.

4.2.5 Dimensionnement des composants passifs

Pour le dimensionnement des éléments passifs et des interrupteurs, il est nécessaire de connaître les paramètres suivants :

- Courants d'entrée et de sortie maximaux,
- Tensions d'entrée et de sortie maximaux,
- Le mode de commande des interrupteurs actifs,
- La précision des tensions et des courants,

D'autres critères comme le rendement minimum (s'il est souhaité), la nature et le nombre de sources, les plages fréquentielles, les bandes passantes, la compacité et les puissances massique et volumique, les contraintes d'environnement comme la résistance aux radiations, l'influence de la température peuvent aussi entrer en compte.

Calcul du rapport cyclique moyen :

$$\alpha = \frac{V_{in}}{V_{out}} = 0,583 \quad (4.2)$$

Avec :

\$V_{in}\$, la tension de sortie = 27,5V

\$V_{out}\$, la tension d'entrée = 48V

Efficacité de 90 % minimum :

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{0,9} = 28 \text{ W} \quad (4.3)$$

Avec P_{out} , la puissance du récepteur = 25W

Inductance :

$$L_{buck} = \frac{V_{in \max} * \alpha (1-\alpha)}{\Delta i_l * f_{dec}} = 2,7 \text{ mH} \quad (4.4)$$

Avec :

F_{dec} , la fréquence de découpage = 500 kHz

Δi_l , l'ondulation de courant = $\frac{i_{max}}{10} = 90 \text{ mA}$

Courant max dans l'inductance :

$$I_{l_{max}} = I_{out} + \frac{I_{out}}{10*2} = 945 \text{ mA} \quad (4.5)$$

Avec :

I_{out} , le courant de sortie = 900 mA

Capacité de sortie :

$$C_{buck} = \frac{V_{in \max} D(1-D)}{8 * L_{buck} F_{dec}^2 \Delta v_{out}} = 818 \text{ pF} \quad (4.6)$$

Avec :

Δv_{out} , l'ondulation de tension = $\frac{v_{max}}{10} = 2,75 \text{ V}$

4.2.6 Contraintes sur les interrupteurs :

Les interrupteurs sont fortement sollicités avec les commutations à haute fréquence, mais il convient de calculer les contraintes en courant qui s'appliquent. Cela sera plus utile lors de la réalisation pour s'assurer que le composant n'ait pas sa durée de vie réduite parce qu'il ne supportera pas le courant le traversant.

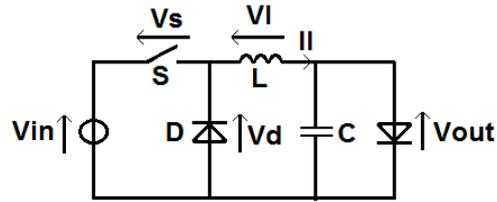


Figure 125 : Convertisseur Buck

Interrupteur S : $V_{smax} = V_{in} = 48V$ (4.10)

$$I_{smax} = I_s + \alpha(1 - \alpha) \frac{V_{in}}{2Lf_{dec}} = 529,3 \text{ mA}$$
 (4.11)

D : $V_{dmax} = V_{out} = 28V$ (4.12)

$$I_{dmax} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\alpha V_{in}}{2Lf_{dec}} = 1,269 \text{ A}$$
 (4.13)

$$I_{dmoy} = I_s = 525 \text{ mA}$$
 (4.14)

Pilotage des LEDs :

Les LEDs sont avant tout des diodes et de ce fait, elles présentent donc le même comportement électrique que les autres diodes. Comme nous avons vu en chapitres 2 et 3, il existe deux manières de les alimenter : en tension ou en courant. Chacun ayant ses avantages, inconvénients et induisant des impacts différents sur le groupement de plusieurs LEDs. Or, la principale raison justifiant qu'il faut les commander en courant est que, pour un même courant (et une même température), la tension de polarisation peut être très différente d'une LED à une autre. Et que cette tension varie de manière inversement proportionnelle à l'augmentation de la température.

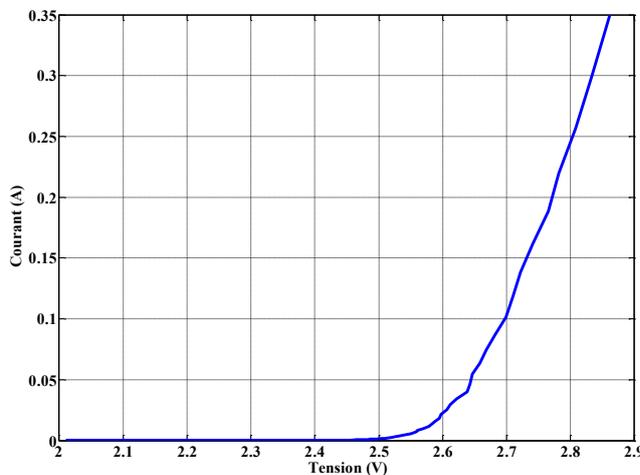


Figure 117 : Caractéristique I(V) d'une LED

Relative Forward Voltage
 $\Delta V_F = V_F - V_{F(25^\circ\text{C})} = f(T_j); I_F = 140 \text{ mA}$

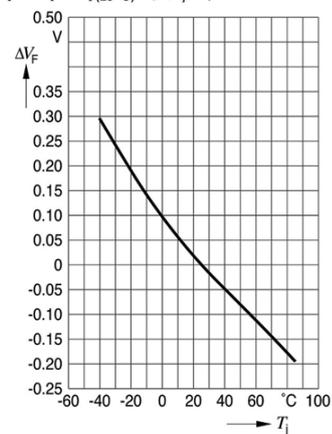


Figure 118 : Impact de la température sur la tension

En plaçant la LED dans un environnement thermique stable, même une légère augmentation de tension peut entraîner une grosse augmentation de courant en retour. Généralement, les caractéristiques photo-électriques des LEDs sont données pour une température de jonction à 25 °C, mais en fonctionnement, ce n'est jamais cette température qui est mesurée. La température de jonction va dépendre du courant injecté mais lorsque ce dernier augmente, la température va suivre la tendance. La conséquence directe est que la tension va diminuer et le régulateur va compenser cette chute de tension en augmentant à nouveau la tension et le courant. Cela va créer une boucle et finalement une avalanche thermique du composant. C'est pourquoi, en contrôlant en courant la LED, il y a un contrôle indirect de la température (les pertes joules sont proportionnelles au carré du courant). La température ayant un impact non négligeable sur l'émission de lumière ou la durée de vie, il est indispensable de la conserver constante et le plus faible possible.

4.2.7 Asservissement de courant :

Après avoir dimensionné les composants, le simulateur de circuit Psim a été utilisé pour modéliser les LEDs, le ballast et la régulation effectuée par un asservissement de courant. L'objectif a été de contrôler le courant à travers la variable de contrôle qui est le rapport cyclique α . La régulation est réalisée en utilisant un correcteur proportionnel-intégral suivant le schéma bloc suivant :

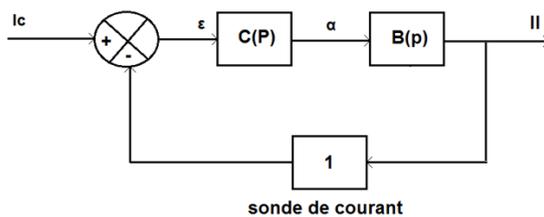


Figure 119 : Schéma bloc du Buck asservi

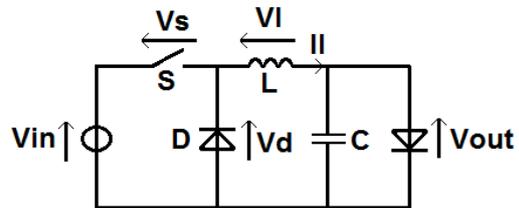


Figure 120 : Schéma électrique du Buck

En régime permanent, la tension aux bornes de la capacité étant constante, le courant dans cet élément est nul. Le courant alimentant les LEDs correspond au courant moyen traversant l'inductance, c'est donc ce dernier qui est asservi par la boucle en courant.

La fonction de transfert du Buck est la suivante :

$$B(p) = V_{in}(p) \frac{1+RCp}{R\left(1+\frac{L}{R}p+LCp^2\right)} = \frac{167,2}{2,182e^{-12}p^2+9,288e^{-3}p+1} \quad (4.7)$$

La fonction de transfert du correcteur PI est la suivante :

$$C(p) = K \frac{\tau p + 1}{\tau p} \quad (4.8)$$

À l'aide de l'outil Sisotool dans Matlab, il est possible de déterminer les paramètres K et τ du correcteur. Les conditions sont d'avoir une marge de phase de 60 ° et une marge de gain inférieure à 10 000 rad/s. Nous obtenons donc les paramètres du correcteur suivant :

$$C(p) = 1,0156 \frac{2,7e^{-3}p + 1}{2,7e^{-3}p} \quad (4.9)$$

4.2.8 Modèle utilisé pour mettre au point le prototype

La conception du prototype qui est présentée plus en détail dans le paragraphe suivant démontre qu'il faut utiliser au minimum 86 LEDs pour avoir le flux lumineux nécessaire en comparaison avec un luminaire utilisant 3 tubes fluorescents, il a donc été choisi arbitrairement de prendre 100 LEDs. À partir des tests effectués sur les topologies, la matrice connectée est celle qui sera privilégiée pour la connexion des LEDs, car son principal avantage est qu'elle offre le meilleur rendement lumineux.

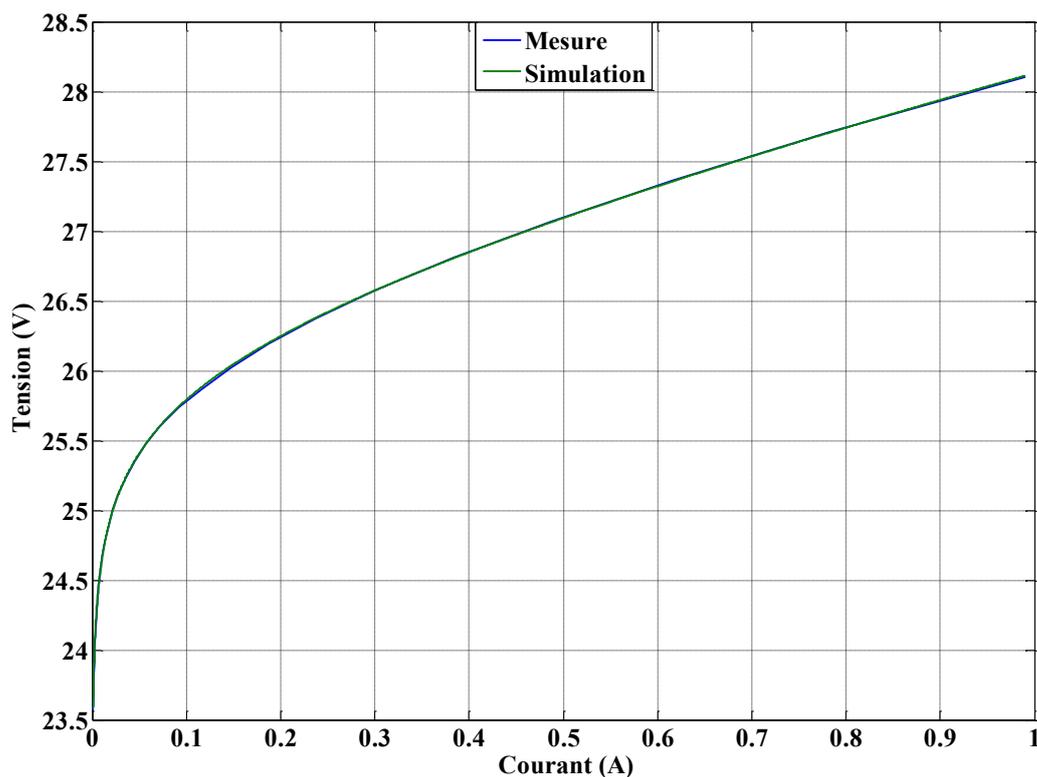


Figure 121 : Comparaison du modèle inséré dans Psim avec les mesures sur le prototype

À partir de l'ajustement des 25 LEDs connectées en matrice connectée, une extrapolation a été effectuée afin de pouvoir déterminer les coefficients qui représenteront le modèle équivalent du

prototype. Ensuite, une rampe de courant allant de 1 mA à 990 mA a été programmée pour effectuer une comparaison étendue du modèle avec les mesures. Dans ce cas présent, les deux courbes sont presque confondues donc le modèle est suffisamment représentatif du comportement réel du prototype. Il est ainsi possible de modéliser le prototype dans Psim pour la conception de l'alimentation.

4.2.9 Modélisation sous Psim :

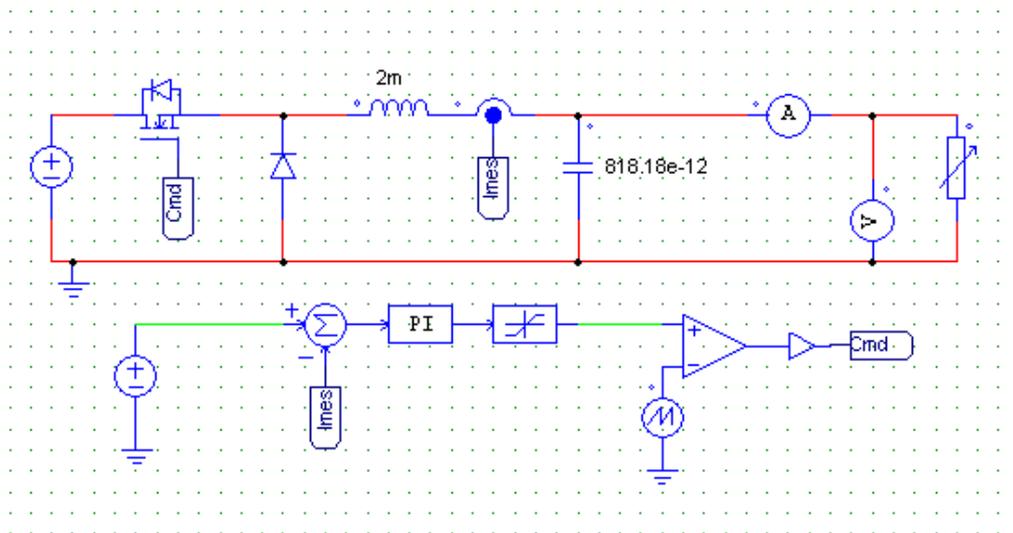


Figure 122 : Schéma électrique de l'alimentation avec son asservissement

Une fois tous les éléments dimensionnés, le convertisseur et sa boucle d'asservissement sont construits sur le logiciel Psim. Le courant de consigne a été fixé à 900 mA et le modèle employé ici est celui de Shockley.

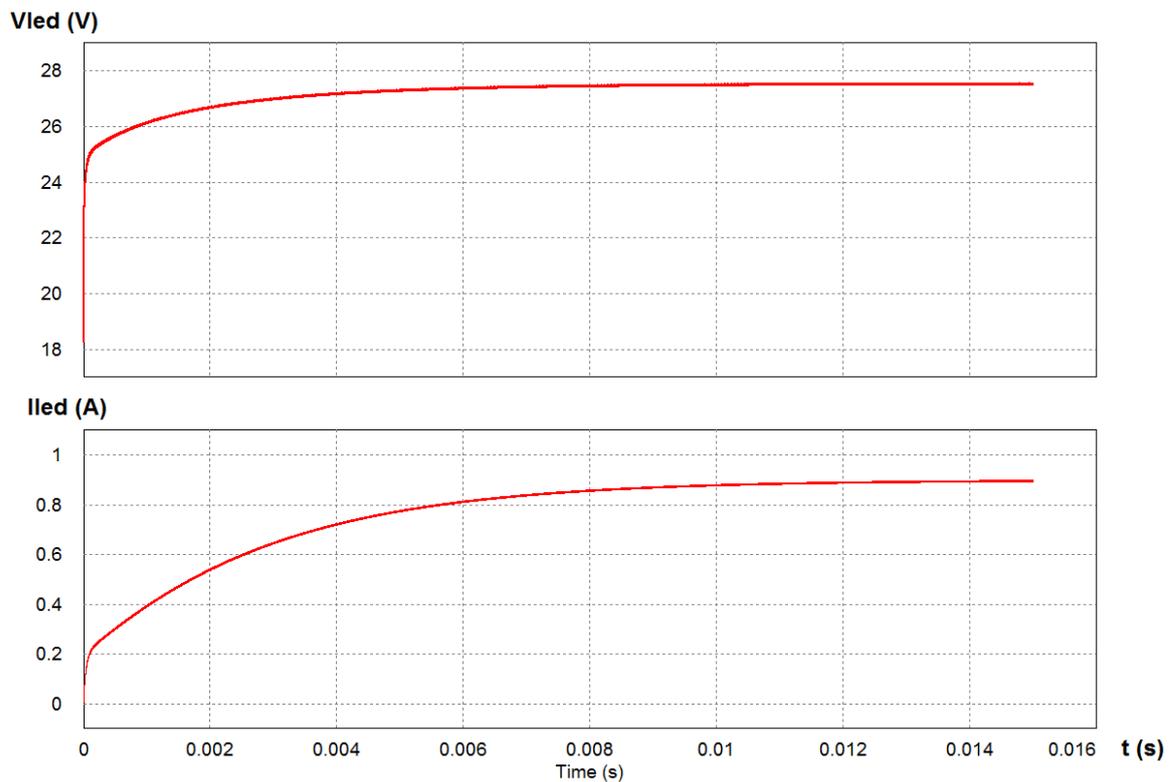


Figure 123 : Réponse en tension Vled pour une consigne en courant Iled du Buck

La valeur de consigne de 900 mA est atteinte en 12 ms, la tension mesurée est de 27,5 V, la valeur simulée étant de 28 V, cela donne une erreur est de 2 % ce qui est acceptable pour notre application.

4.2.10 Comparaison des simulations Psim et des mesures :

Afin de fournir une preuve supplémentaire de la validité du modèle, une expérience annexe a été effectuée. L'objectif étant de programmer une rampe en courant dans le logiciel, dans la réalité avec le Keithley et de comparer les différences de tension qui apparaissent. La rampe en courant est de $\pm 10\%$ du courant nominal, c'est-à-dire entre 810 et 990 mA.

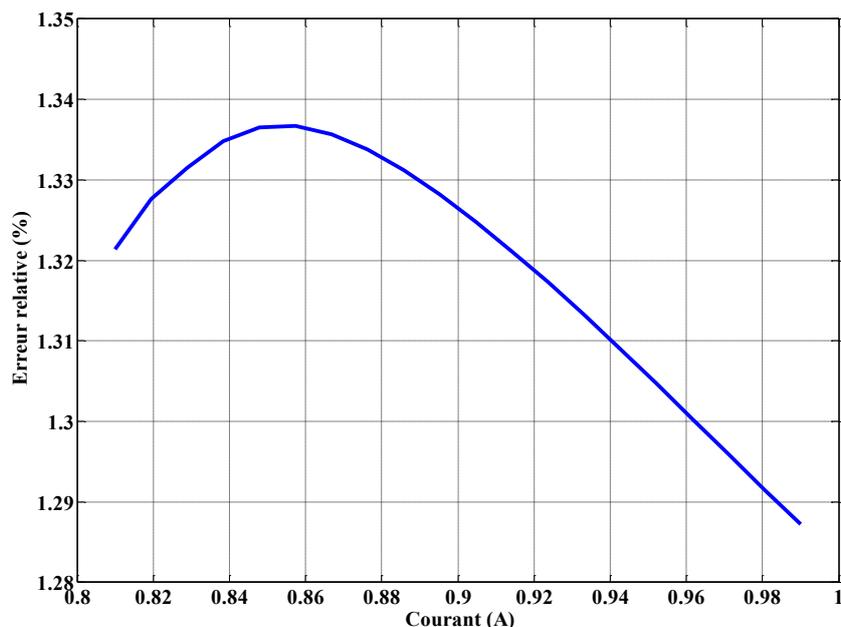


Figure 124 : Erreur relative sur la tension simulée dans Psim pour un courant injecté autour du courant nominal

La figure 124 montre l'erreur relative entre la tension mesurée et la tension simulée dans Psim. L'erreur est positive et comprise entre 1,2 et 1,3 %. Cela signifie que même si le courant est envoyé sous forme de rampe, le modèle reste conforme à la réalité avec une erreur inférieure à 2 %.

Test électrique de l'alimentation :

Une fois réalisé, le ballast a été connecté au prototype et des mesures de puissance ont été réalisées afin de déterminer son rendement.

	Tension (V)	Courant (mA)	Puissance (W)	Rendement (%)
Entrée	48	592	28,8	92
Sortie	27,5	960	26,4	

Tableau 34 : Caractéristiques électriques de l'alimentation

Le tableau ci-dessus montre les caractéristiques électriques mesurées pour le ballast réalisé. La tension de 48 V en entrée a été sélectionnée arbitrairement pour être cohérent avec un bus continu alimenté par des panneaux photovoltaïques. Le rendement du ballast est de 92 %, ce qui est plutôt bon vu que les moyens mis en œuvre pour la réalisation sont scientifiques. Les moyens industriels permettraient de monter à 95, voire 99 %. Cependant, en observant la puissance théorique de l'ensemble luminaire et alimentation, c'est-à-dire 29 W, c'est une valeur qui reste inférieure à 40 W des tubes fluorescents 3x14W.

4.3 Modélisation thermique

L'aspect thermique est fondamental pour une LED, car il influence tous les paramètres clés d'une LED comme les propriétés optiques, photométriques, électriques, colorimétriques et la durée de vie du composant. Les premières LEDs mises au point dites « de type 5 mm » consommant très peu d'énergie ne pouvaient pas chauffer de manière significative. Par contre, les LEDs employées dans l'éclairage sont un excellent exemple pour mesurer l'importance de la prise en compte thermique dans le système complet.

Il existe plusieurs manières pour pouvoir réaliser une étude thermique. La première approche est d'adopter des analogies électriques des transferts thermiques pour utiliser les mêmes outils de simulation que pour les LEDs et l'alimentation. La seconde est d'utiliser des outils descriptifs 2D et 3D pour simuler dans un logiciel à éléments finis le comportement du luminaire à LED. L'énergie thermique peut se transmettre par conduction, convection ou rayonnement.

La conduction correspond à la transmission d'énergie par la paroi (sa partie solide). Plus un matériau est isolant thermiquement, moins il y a de conduction. La convection est l'échange entre un corps gazeux et un autre corps, qu'il soit liquide, solide ou gazeux. Le rayonnement se manifeste quand des corps chauds émettent des rayonnements énergétiques (infrarouges dans ce cas). Ces derniers sont absorbés par d'autres corps et sont transformés en chaleur.

Dans un premier temps, nous avons étudié l'impact thermique sur un quart de la surface du prototype composé alors d'une barre avec un morceau de profilé en aluminium, du PCB et des LEDs. L'objectif est d'observer si les comportements thermiques et lumineux sont conformes à ce qui a été mesuré lors des tests. La première méthode utilise des analogies électriques/thermiques et peut s'insérer dans tout outil de simulation électrique. La seconde méthode a recouru à l'utilisation du logiciel Comsol pour la modélisation thermique du prototype. Nous avons utilisé les deux méthodes pour pouvoir les comparer.

4.3.1 Analogie thermique :

Cette première approche présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, car seules les puissances électriques et les résistances des matériaux sont nécessaires. Les informations concernant les résistances thermiques sont données en partie dans la documentation technique des différents éléments utilisés, pour les résistances de contact elles peuvent être obtenues par mesures. Cependant, cette méthodologie est approximative. Par exemple, elle ne tient pas compte des transferts de chaleur par convection et par rayonnement, seule la conduction est prise en compte. Pour notre application avec des LEDs, les puissances thermiques dégagées étant inférieures à 1 W, l'aspect convection peut effectivement être négligé et la puissance transmise par rayonnement est faible. En conséquence, le fait de négliger les deux autres modes de transfert de chaleur n'induit pas une erreur importante dans notre approche. Le logiciel utilisé sera le simulateur de circuit électrique Psim. Pour cela, nous utilisons des modèles équivalents électriques pour décrire ces phénomènes comme décrits dans la figure 92.

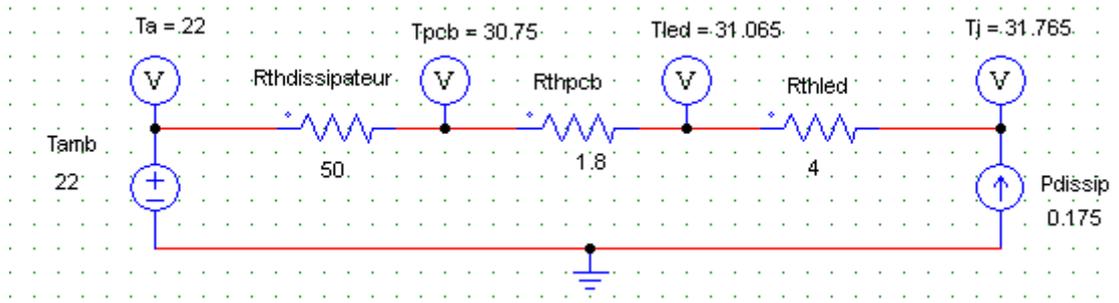


Figure 95 : Analogie électrique du modèle thermique utilisé

La modélisation thermique est bâtie alors comme un circuit électrique pour lequel il y a une analogie électrique thermique. Le tableau suivant résume les correspondances.

	Électrique	Thermique
Flux	Courant électrique (A)	Flux de chaleur (W)
Différence de potentiel	Tension électrique (V)	Température (K)
Résistance	Résistance électrique (Ω)	Résistance thermique ($W.K^{-1}$)
Conductivité	Conductivité électrique ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Capacité	Capacité électrique (F)	Capacité thermique ($J.K^{-1}$)
Densité	Densité de courant ($A.m^{-2}$)	Densité de chaleur ($K.m^{-2}$)

Tableau 29 : Analogie entre les grandeurs électriques et thermiques

Le générateur de courant dans Psim modélise ainsi l'émission de chaleur de la LED. L'hypothèse d'étude que nous avons prise est le cas le plus critique pour le fonctionnement des LEDs à leur point optimal d'efficacité lumineuse. Dans le cas des LEDs XPGWHT-FE5, en prenant une puissance consommée de 250 mW à rendement maximum, nous prenons comme première hypothèse que 70 % de la puissance consommée est transformée en perte par effet Joules. Par conséquent, le courant optimal dans le modèle thermique est de 175 mA correspondant à 175 mW de puissance thermique. Le générateur de tension modélise une température fixe, ici, la température ambiante à 22 °C. Cette méthode d'évaluation de la température interne d'une LED donne une température de jonction de 29 °C et une température du PCB de 27,5 °C. Cette méthode peut permettre aussi de déterminer une résistance thermique par itération connaissant les autres résistances et en mesurant les températures du prototype.

4.3.2 Simulations thermiques effectuées avec COMSOL Multiphysics :

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses situations physiques rencontrées en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés. Dans notre cas, seul l'aspect thermique sera étudié.

Le logiciel AutoCAD est un logiciel de dessin industriel qui nous a permis de dessiner une ou plusieurs LEDs dans leur environnement de fonctionnement avec leur PCB puis de les représenter à leur place dans le prototype du luminaire mis en œuvre. Le dessin est ensuite transféré dans COMSOL Multiphysics, ce qui facilite beaucoup la modélisation thermique. Les pièces sont assemblées plus facilement et il n'y a aucun risque que l'une d'elles soit fusionnée avec une autre par erreur.

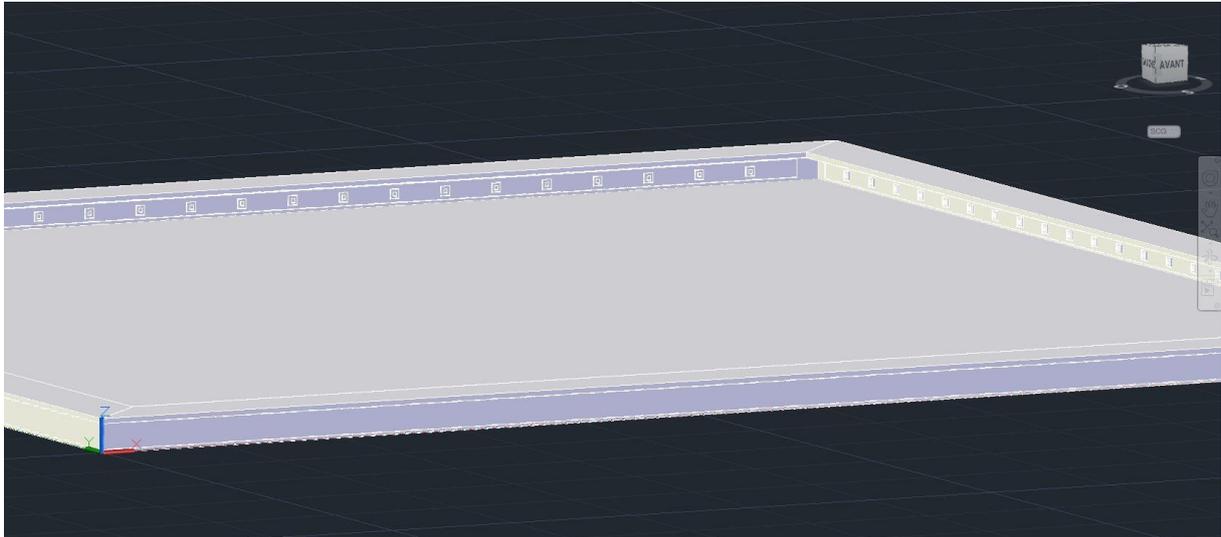


Figure 96 : Représentation en 3D sous Autocad du prototype complet



Figure 97 : Représentation en 2D sous Autocad d'une barre de LED du prototype

Les dimensions du luminaire ont été mesurées sur un luminaire qui a été démonté pour que l'optique soit réutilisée (Lucipanel 40W du fabricant Lucibel). Ce luminaire a l'avantage d'avoir un support esthétique, facile au montage démontage et simple de conception. Il est composé principalement de 4 barres de profilé en aluminium pour la dissipation thermique, d'un guide d'onde pour la convergence des rayons lumineux et d'un diffuseur pour ouvrir la répartition de la lumière et limiter l'éblouissement lié à l'émission de lumière des LEDs.

La modélisation thermique en 3D permet d'avoir une idée beaucoup plus précise de la température des LEDs en fonctionnement que la méthode équivalente électrique. Cela nous permet également d'avoir une indication principalement sur leur durée de vie et donc celle du luminaire.

Paramètres utilisés pour les simulations :

Pour ce type de simulations, nous faisons aussi l'hypothèse de ne considérer que le transfert de chaleur par conduction, la convection et le rayonnement étant négligés. La température ambiante a été choisie arbitrairement pour être de 20 °C. Comsol a besoin d'une valeur en $\frac{W}{m^3}$ Pour modéliser l'émission de

chaleur de la LED. Le volume estimé de la LED est calculé en prenant les dimensions données par le fabricant. Soit $1,4 \times 1,4 \times 0,1 \text{ mm}^3$, ce qui donne un volume estimé de $196 \times 10^{-12} \text{ m}^3$. La puissance de fonctionnement simulée est choisie d'après les mesures électriques au point optimum soit de 193 mW. Chacune des LEDs est une source de chaleur de $9,847 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$. Le refroidissement de la barre ou du prototype dans les simulations est assuré par transfert convectif. Le coefficient de transfert de chaleur h (en $\frac{\text{W}}{\text{K m}^2}$) a été choisi en prenant le cas d'une convection forcée par air, soit une valeur de 250.

Pour le cas de la barre, toutes les surfaces seront refroidies. Dans le cas du prototype, la plaque dans le faux-plafond et les 4 surfaces maintenant le diffuseur sur le profilé seront refroidies. Chaque simulation a été programmée pour simuler 8 h de fonctionnement.

Les performances des matériaux composant le luminaire qui ont été intégrées dans les simulations sont résumées dans le tableau suivant :

Élément	Matériau utilisé
Profilé	Aluminium (Al)
Substrat de la LED	Alumine (Al_2O_3)
PCB	Époxy (FR4)
Puce semi-conductrice de la LED	Carbure de Silicium (SiC)

Tableau 30 : Les différents matériaux composant le prototype

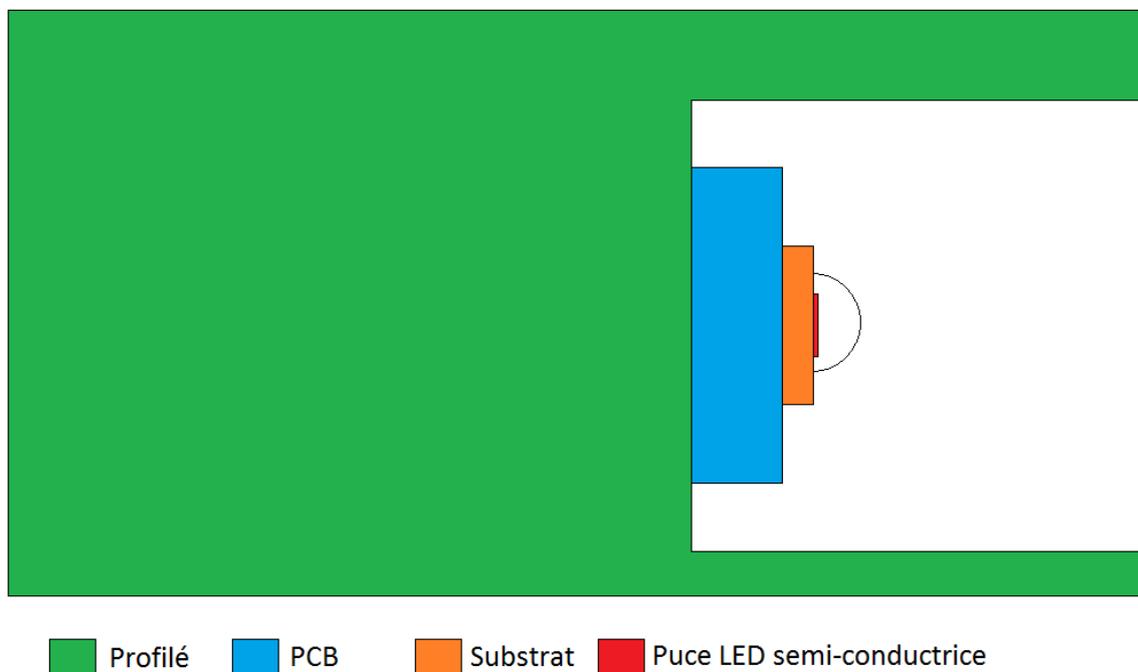


Figure 98 : Section simplifiée de la barre de LED

La figure 98 montre la description géométrique simplifiée sous Comsol. Dans le logiciel, le profilé a été séparé en 2 parties. La première permet de maintenir le guide d'onde et le diffuseur et la seconde maintient la plaque pour refermer le luminaire. Il faut noter que pour la modélisation de la LED, le dôme en résine transparente n'a pas été dessiné.

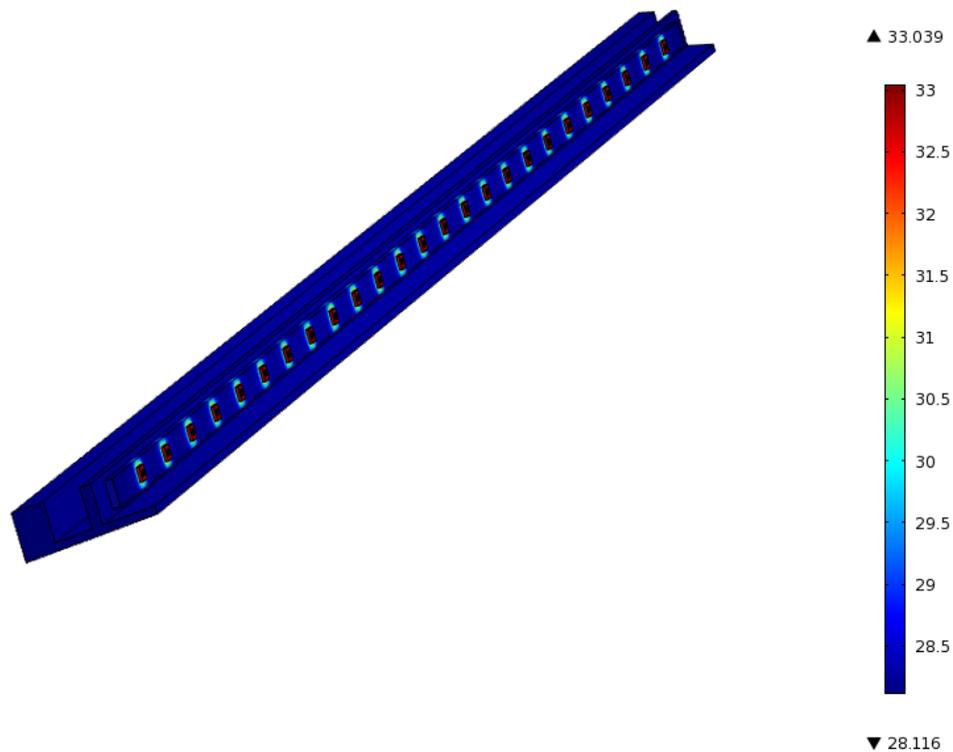


Figure 99 : Résultats de la répartition de la chaleur simulée dans Comsol sur une barre de LED

Comsol fournit 2 sortes de cartes de températures en résultat. La première permet d'observer la propagation de la chaleur entre 2 LEDs placées côte à côte. Pour notre cas, cela a permis de vérifier que la chaleur émise par composant n'influence pas les LEDs entre elles. Il aurait donc été possible de mettre les LEDs plus proches. Cependant, lors de la conception, il nous a semblé important de répartir ces LEDs sur toute la longueur pour des raisons d'uniformité de lumière. Elles sont placées à 25 par barre.

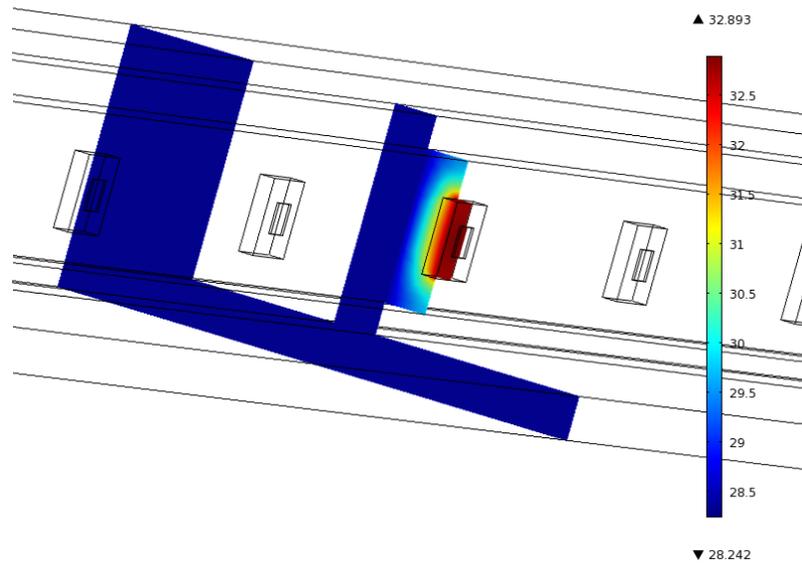


Figure 100 : Détail de la répartition de la chaleur simulée avec l'outil Comsol dans une section de la barre de LED

La seconde carte des températures fournit une coupe de la barre et montre la propagation de la chaleur dans le PCB et l'armature en aluminium. Ici, la chaleur se diffuse principalement dans le PCB et n'atteint pas le profilé. Au début, ce dernier était en aluminium pour maximiser le transfert de chaleur. Vu les premiers résultats, cette simulation a été réalisée avec un matériau en époxy beaucoup moins cher et lourd. Elle montre que vu la faible émission de chaleur, un PCB avec une faible conductivité thermique est suffisant. En effectuant les simulations, il apparaît que la température au sein de la LED peut être évaluée une fois stabilisée aux alentours de 33 °C comme le montre la figure 101.

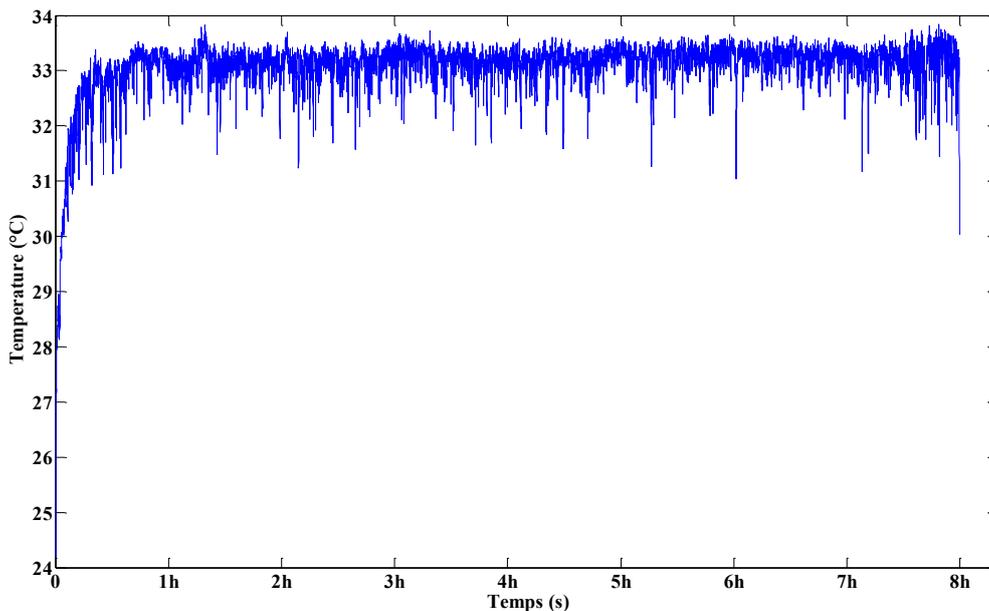


Figure 101 : Mesure de la température sur une barre de LED pendant 8 h de fonctionnement à courant optimal

Pour comparer avec les simulations, les mesures ont été faites sur la barre de LED placée dans une salle fermée avec une convection forcée maintenant la température ambiante à 20 °C comme le montre la figure 102. La température est très chahutée en lien avec les pics et les oscillations dues à la climatisation de la salle. Nous pouvons constater que la température donnée par la simulation et la mesure sont comparables validant ainsi notre approche de simulation.

Impact sur la durée de vie du luminaire :

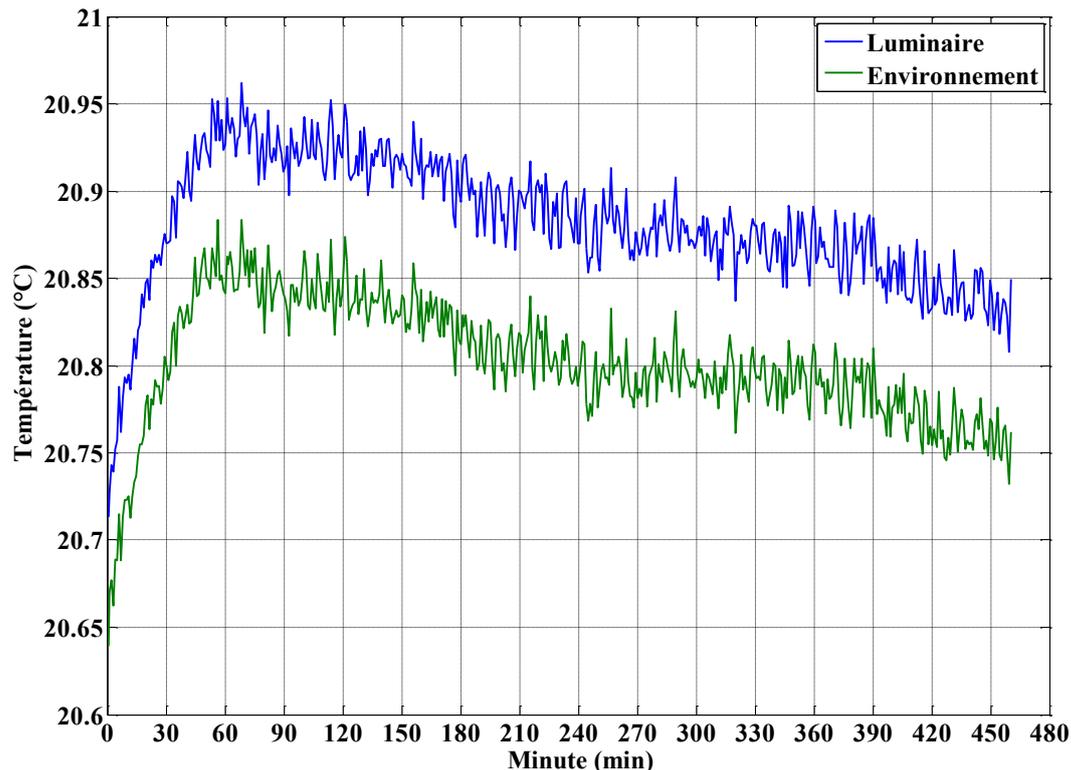


Figure 102 : Température mesurée dans le prototype et dans l'environnement sur 8 h de fonctionnement

L'étude sur la barre avait comme objectif de comprendre le fonctionnement du logiciel avec un exemple simple à réaliser et à vérifier. Notre objectif était initialement de observer l'élévation de température dans le cas du luminaire complet, pour permettre d'en évaluer la durée de vie des LEDs. Une fois assemblé, le prototype a été équipé d'un thermocouple au plus proche d'une LED et un second a été placé dans l'environnement pour observer comment évoluent ces dernières. En observant la figure 99, il est possible de voir qu'entre la température de la salle d'optique et le prototype, il y a un écart un peu près constant de 0,8 °C, ce qui est somme toute très faible. La température semble un peu osciller autour de 240 min, cela est dû à un courant d'air créé par une personne qui est entrée dans la salle lors de ces relevés.

Pour estimer la durée de vie du luminaire, nous avons fait appel aux diagrammes proposés par [110-111] dont un exemple est donné en figure 100.

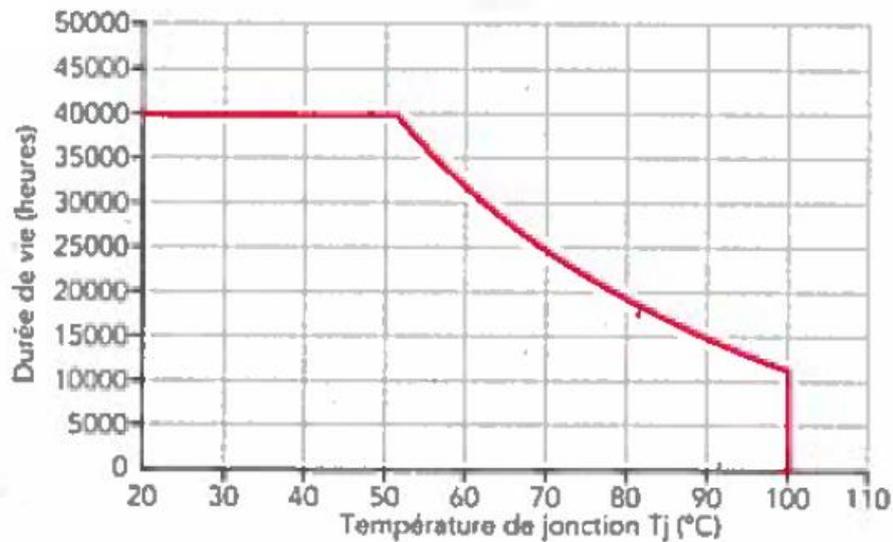


Figure 103 : Impact de la température sur la durée de vie pour une LED CREE d'après [110]

Dans notre cas, pour un usage professionnel du luminaire, nous avons supposé une utilisation de 10 h de fonctionnement par jour pendant 251 jours par an. Ce qui représente 2510 h de fonctionnement annuel. D'après la figure 100 à 21 °C de température de fonctionnement, la durée de vie de ce luminaire est estimée à au moins 40 000 h, soit seize années de fonctionnement.

Globalement, nous en déduisons qu'une LED a besoin d'avoir sa température de jonction au minimum inférieure à 50 °C pour assurer le maximum de durée de vie. Il est impossible de mesurer la température de la jonction d'une LED avec les moyens expérimentaux à notre disposition. Cette dernière est approximée à la température du PCB qui est mesurable avec un thermocouple soudé au plus proche de la LED.

4.4 Etude photométrique du luminaire

4.4.1 Mesure du flux avec la sphère intégratrice

Après avoir vérifié l'aspect thermique en priorité, la seconde chose qui a été évaluée sur le prototype est l'émission de lumière. Pour pouvoir vérifier les caractéristiques théoriques, il est nécessaire de mesurer le flux et la puissance du luminaire. Pour ce dernier, la seule possibilité est d'utiliser la sphère intégratrice. Or pour pouvoir le mesurer dans les règles, il est impératif que les dimensions de la surface émettrice soient 10 fois plus petites que la longueur entre la source et les appareils de mesure. L'objectif est d'avoir une source « ponctuelle ». Dans un premier temps, seul un quart du luminaire (une barre) sera placé dans la sphère intégratrice de 2 m de rayon. Le but est de vérifier que la barre en question fournit bien le flux désiré.

Courant moyen par LED (A)	Tension (V)	Puissance globale consommée (W)	Puissance consommée par LED (W)	Eclairage Hagner (lx)	flux global (lm)	flux par LED (lm)	Rendement lumineux (lm/W)
3,00E-02	13,15	1,97	7,89E-02	100,2	317,7	12,7	161,1
4,00E-02	13,28	2,66	1,06E-01	138,6	439,2	17,6	165,4
5,00E-02	13,38	3,34	1,34E-01	176,6	559,8	22,4	167,4
6,00E-02	13,46	4,04	1,62E-01	214,7	680,6	27,2	168,5
6,50E-02	13,50	4,39	1,75E-01	233,9	741,6	29,7	169,0
7,00E-02	13,53	4,74	1,89E-01	252,9	801,8	32,1	169,3
7,50E-02	13,57	5,09	2,04E-01	271,7	861,4	34,5	169,3
8,00E-02	13,60	5,44	2,18E-01	290,4	920,6	36,8	169,3
9,00E-02	13,65	6,14	2,46E-01	327,5	1038	41,5	169,0

Tableau 31 : Rendement lumineux en fonction du courant pour la barre de LED optimisée

Le balayage a été effectué entre 30 et 90 mA par LED et un temps de stabilisation de 10 min a été pris avant chaque mesure. À 90 mA par LED, le flux fourni par la barre de 25 LEDs câblées en matrice connectée (figure 101) est de 1 038 lm. Ce qui correspond bien au quart du flux total prédit après l'étude d'une LED.

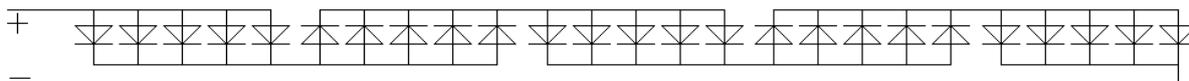


Figure 104 : Schéma de connexion des 25 LEDs par barre du luminaire à LED

Le rendement lumineux et la puissance consommée mesurés sont bien dans les valeurs attendues. Lors du test d'un quart du luminaire, la topologie était de type 5x5 LEDs. En réassemblant le luminaire à LED, la topologie a été changée en 10x10 LEDs. Initialement, il y avait 2 luminaires de prévus à la réalisation, l'un avec 10x10 LEDs, le second avec 5x20 LEDs pour pouvoir tester la matrice connectée carrée et rectangulaire. Ensuite, il a été placé dans la sphère et des tests similaires avec le luminaire complet ont été effectués :

Courant total (A)	Tension (V)	Puissance globale consommée (W)	flux global (lm)	Efficacité (lm/W)
1,00E-01	25,8	2,6	160,7	62,4
2,00E-01	26,2	5,2	369,0	70,4
3,00E-01	26,6	8,0	584,2	73,3
4,00E-01	26,8	10,7	801,1	74,6
5,00E-01	27,1	13,5	1017,6	75,2
6,00E-01	27,3	16,4	1232,8	75,3
7,00E-01	27,5	19,3	1445,5	75,1
8,00E-01	27,7	22,2	1686,4	76,1
9,00E-01	27,9	25,1	1867,1	74,4
9,90E-01	28,1	27,8	2073,2	74,6

Tableau 32 : Rendement lumineux en fonction du courant pour le prototype

Les mesures montrent que le prototype fournit un flux lumineux 55 % inférieur à ce qui était prévu. Sachant que le flux sortant des LEDs est conforme à ce qui était attendu. La règle de 10 fois la distance entre le luminaire et les appareils de mesure n'étant pas respectée, une autre mesure a été mise en place.

4.4.2 Mesure du flux avec le luminancemètre

Pour la mesure du flux, le luminaire à tester est bien posé perpendiculairement au luminancemètre CS-1000. Un drap noir est utilisé pour cacher une partie de la surface émissive. Le luminaire original présente l'avantage d'avoir un diagramme des intensités Lambertien (figure 105).

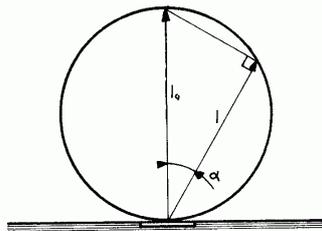


Figure 105 : Dispersion Lambertienne

Dans un premier temps, nous considérerons que la diffusion lumineuse du prototype est de type Lambertien. Cela induit qu'il est possible d'utiliser la loi de Lambert (4.1). Cette dernière permet de convertir la luminance en $\frac{lm}{sr m^2}$ à une exitance en $\frac{lm}{m^2}$:

$$M = \pi * L \quad (4.1)$$

L'exittance désigne le flux émis par unité de surface d'une source étendue qui rayonne. C'est une notion un peu similaire à l'éclairement au sens où l'unité est la même ($\frac{lm}{m^2}$). La différence se fait au niveau de la direction du flux, pour l'éclairement, le flux est reçu par la surface et pour l'exittance, le flux est émis par la surface. Pour pouvoir effectuer la mesure de luminance, il y a une autre condition nécessaire, qui est d'avoir une source ponctuelle. Pour cela, il faut une distance de mesure entre la source et l'appareil qui soit supérieur à 10 fois la longueur d'un côté du luminaire. Le luminaire ayant 0,6 m de côté, il faudrait se placer à 6 m ce qui n'est pas possible dans la salle d'optique où ont été réalisés les travaux. C'est pourquoi nous allons masquer une partie du flux avec le drap noir et utiliser la loi du carré inverse des distances. En ne conservant qu'un tiers de la surface émettrice, il devient possible de diviser la distance de mesure par 3, soit 2 m.

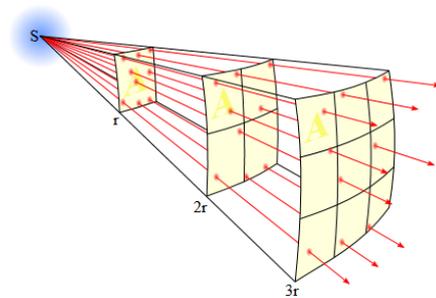


Figure 106 : Illustration de la loi du carré inverse des distances

La relation pour obtenir le flux est donc :

$$F = L \pi Su \quad (4.2)$$

Avec :

F : le flux lumineux (lm)

L : la luminance (cd/m²)

Su : la surface utile (m²)

Après avoir masqué une partie du luminaire, la relation (4.2) devient :

$$F = L \pi 0,36 \quad (4.3)$$

Luminaire	Mesure au luminancemètre (cd/m ²)	Flux (lm)
Original	3530	3 992
Prototype	2160	2 442

Tableau 33 : Comparaison des flux pour les luminaires

Entre le luminaire original et le prototype, il y a une différence de 1500 lm, soit 39 % inférieur. L'explication est que les pertes optiques sont beaucoup plus importantes avec les nouvelles LEDs. Ceci est dû au fait que le luminaire a une optique spécifique aux LEDs initiales et non adaptée aux nouvelles LEDs du prototype. Par conséquent, la lumière est partiellement piégée dans le luminaire. Comme la nouvelle mesure donne un flux de 3992 lm pour le luminaire original en accord avec sa documentation technique qui indique 4000 lm, la méthode de mesure n'est pas à mettre en cause sur la perte de flux lumineux.

4.5 Etude optique du luminaire

Dans le but de comprendre mieux la perte de flux lumineux, une étude de répartition de la lumière a été réalisée sur les anciennes et nouvelles LEDs installées. Les premières n'ayant pas de documentation technique et sont impossibles à identifier. Il est important aussi de noter que les équipes encadrantes de ces travaux n'ont pas de compétences spécifiques en optique et par conséquent, le matériel nécessaire pour réaliser les mesures n'est pas disponible facilement. L'étude a été faite en suivant les recommandations du Professeur Philippe Arguel, spécialiste en optique mais par manque de temps, ces tests ont été incomplets.

4.5.1 Etude sur la répartition de la lumière émise par les LEDs

Dans un premier temps, l'étude s'est concentrée sur la différence de répartition de lumière et sur la quantité de lumière émise pour chaque LED seule. Toutes les LEDs d'une barre à l'exception d'une ont été cachées avec un tissu noir et la dernière a ensuite été placée face à un écran à 20 cm.

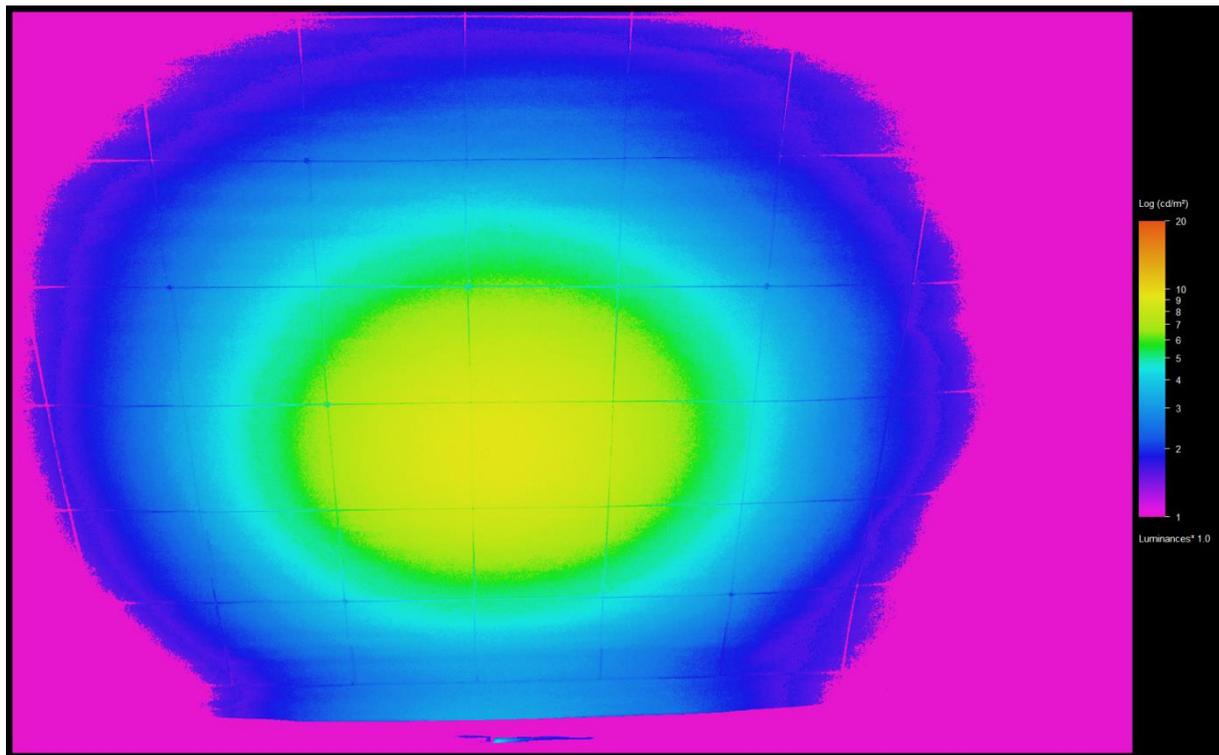


Figure 107 : Carte de luminance d'une des anciennes LEDs

Les cartes de luminances sont très utiles pour comparer les niveaux de luminances. Par contre, c'est impossible de juger à l'œil la répartition de la lumière surtout lorsque la prise de vue est en plongée comme c'est le cas sur la figure 107.

Il est possible de voir que la luminance mesurée est d'environ 10 cd/m — dans le cercle jaune. Pour pouvoir comparer plus facilement 2 cartes de luminance et surtout 2 répartitions de lumière, il est préférable de les observer perpendiculairement. C'est dans cet objectif qu'un quadrillage a été imprimé et sur lequel était projetée la lumière des LEDs. À l'aide de ce quadrillage composé de carré de 10 cm et de 2 fonctions Matlab, il est possible d'effectuer une transformation géométrique. Cette dernière effectue une rotation et une translation d'une image (ici, la carte de luminance en plongée) pour donner un résultat où la carte de luminance serait prise presque parfaitement perpendiculaire au plan quadrillé. Le résultat permet ainsi de voir que les anciennes LED ont une répartition lumineuse sous forme de cercles concentriques en figure 108.

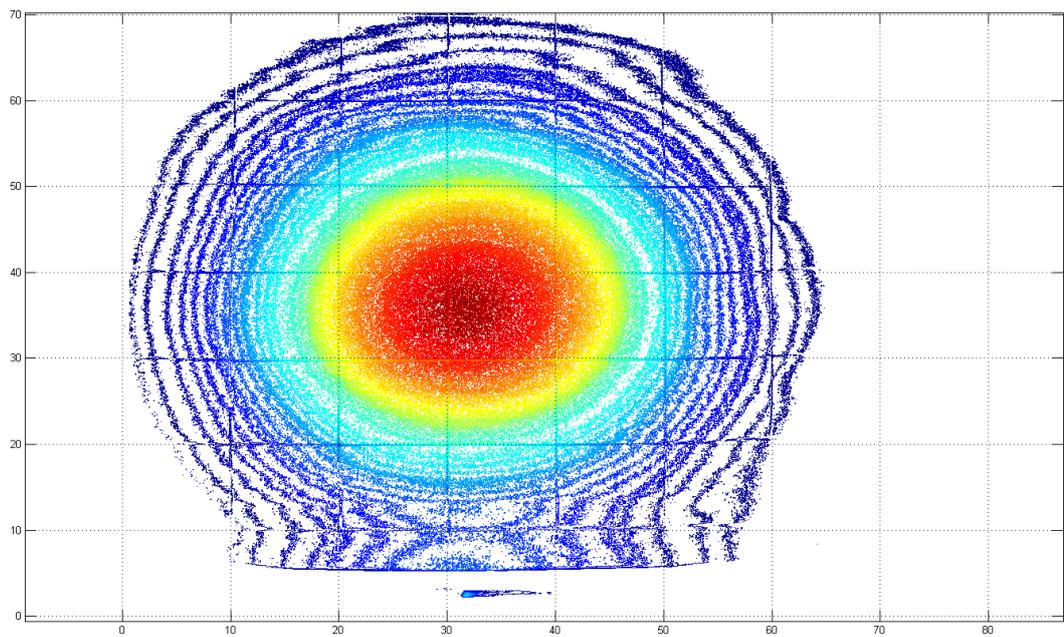


Figure 108 : Carte de luminance après transformation

La figure 108 est le résultat de la rotation comme précédemment, les niveaux de luminance sont uniformes autour du centre optique de la LED. Les cartes de luminances permettent de comparer les niveaux de luminances. Après les avoir transformés, elles permettent de comparer la répartition de la lumière.

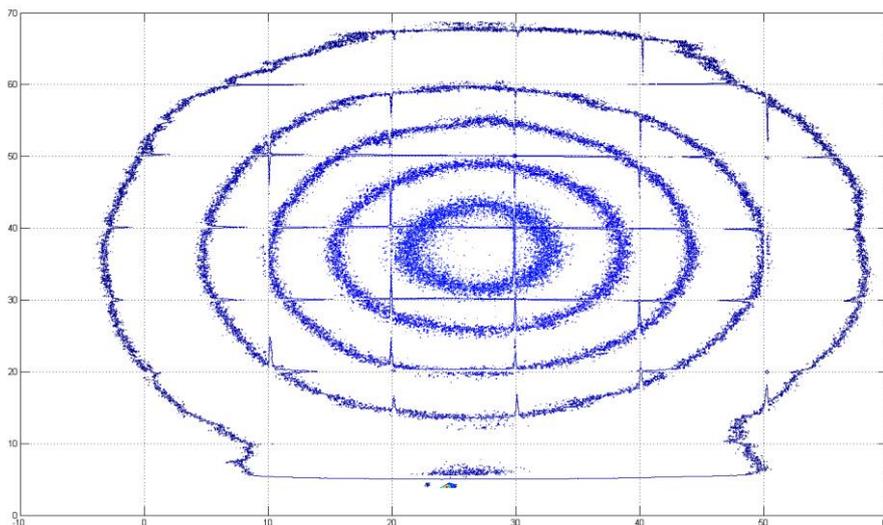


Figure 109 : Carte de luminance après transformation d'une des nouvelles LEDs

En comparant les cartes de luminances après transformations des deux types de LEDs, il est possible de remarquer que les nouvelles LEDs ont un flux qui est émis avec moins de niveaux comparés aux anciennes qui sont très concentrées. La documentation technique des nouvelles LEDs indique que l'angle d'ouverture est de 120° . Ce premier constat permet de mettre en avant une première différence significative entre les 2 types de LED. Ensuite, la carte de luminance avant transformation montrait que pour les nouvelles LEDs, la luminance était de 30 cd/m^2 — en moyenne, soit 3 fois plus que les premières. Il est aussi possible de remarquer que la répartition de lumière en regardant les figures 105 et 106, peut être assimilée à une répartition en sphère, et donc Lambertienne.

4.5.2 Évaluation de l'impact de la distance entre la source de lumière et le plexiglas

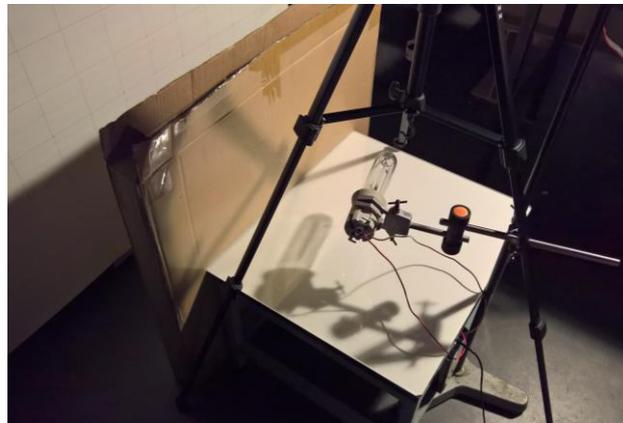


Figure 110 : Montage de l'expérience pour étudier le plexiglas

Après avoir étudié la répartition de lumière émise par les LEDs, une étude a été effectuée sur le plexiglas ayant pour rôle de canaliser la lumière émise par les LEDs vers l'extérieur. Pour cela, une expérience sera effectuée suivant la figure 111.

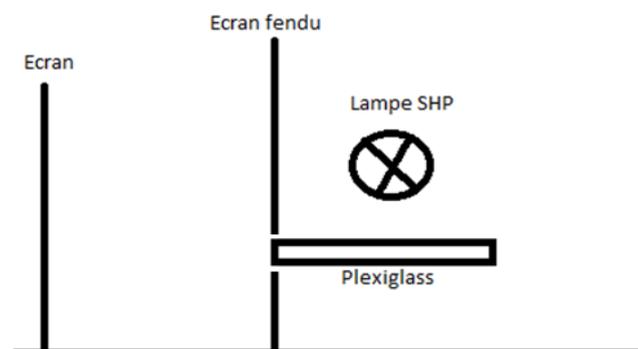


Figure 111 : Vue de côté du montage de l'expérience pour étudier le plexiglas

Pour cette expérience, le principe de retour inverse de la lumière est utilisé. Une lampe sodium haute pression va envoyer de la lumière dans la partie centrale du plexiglas. La lumière va ensuite ressortir par une des surfaces et est projetée sur un écran quadrillé. Du scotch noir a été apposé sur les 3 autres faces afin que la lumière ne puisse sortir que par une face. Il faut aussi noter que la lampe à sodium n'éclaire pas directement l'écran quadrillé. Un carton a été placé entre eux et une petite rainure faite pour qu'il n'y ait que le plexiglas qui puisse sortir comme l'indique la figure 111. L'appareil utilisé pour les mesures est toujours le photo-luminancemètre.

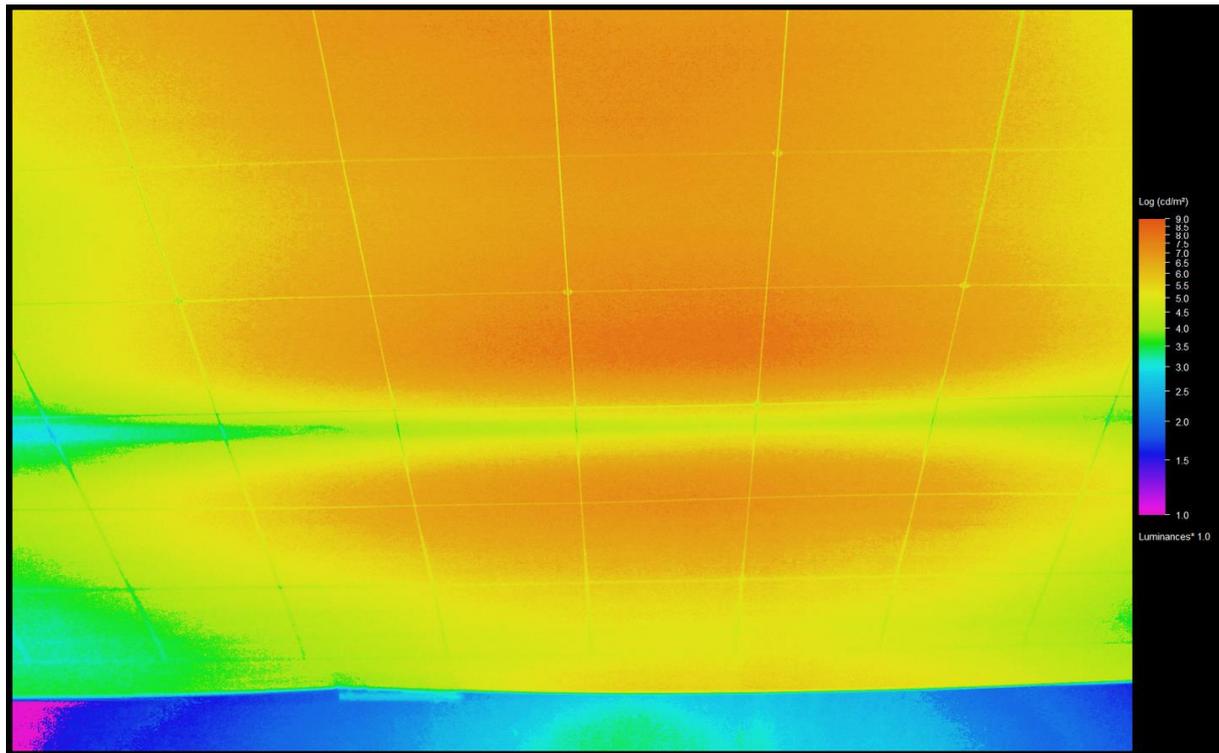


Figure 112 : Carte de luminance de la répartition de la lumière avec la lampe SHP à 15 cm du plexiglas

Cette expérience a été faite à 3 distances différentes (5, 15 et 30 cm) et répétée 2 fois. Les résultats sont similaires à ce qui peut être vu sur la figure 109 au niveau de la répartition de la lumière. Elle se répartit de la même manière, il y a un changement au niveau de la luminance mesurée qui passe de 15 cd/m — à 5 cm à 8 cd/m — à 30 cm.

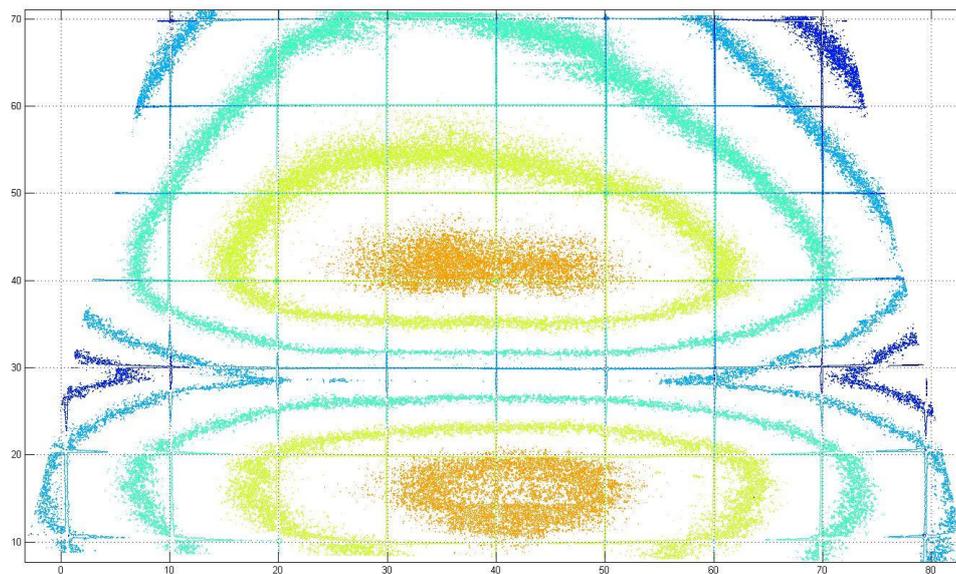


Figure 113 : Carte de luminance de la répartition de la lumière après transformation

La première partie de l'expérience décrite a permis de mettre en avant que la position de la lampe sodium n'a pas d'impact sur la répartition de la lumière. De plus, avec ce plexiglas, il est possible de constater 2 zones où la luminance est supérieure et elles ne se trouvent pas dans l'alignement par rapport au centre optique d'une des tranches qui permettrait de récupérer une partie du flux perdu en pertes optiques. Du coup, nous avons constaté qu'en inclinant les LEDs de 16 ° sans changer le reste de leur positionnement, il est possible de récupérer 33 % du flux perdu en perte optique.

4.6 Simulation d'éclairage

Jusqu'ici, deux technologies pour l'éclairage ont été comparées avec le prototype de luminaire à LED et les prédictions de consommation laissent suggérer qu'il serait plus intéressant de changer les luminaires 4x18W. Cependant, il est recommandé lors du dimensionnement des systèmes d'éclairage d'éclairer « juste ». C'est-à-dire qu'il faut éclairer ce qui est nécessaire et où cela est nécessaire selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).

Dans le cas d'une installation d'éclairage intérieur, il y a des normes qui préconisent un niveau d'éclairage et une uniformité sur les plans de travail. Pour pouvoir définir le bon nombre de luminaires et leur positionnement, il est possible d'utiliser des logiciels permettant la modélisation de scène d'éclairage. Parmi eux, il y a Dialux ou Relux qui sont très souvent utilisés. Ici, Dialux sera favorisé pour la raison que c'est un logiciel qui a été très utilisé dans le cadre d'autres projets en parallèle des travaux de thèse.

Dialux :

Dialux est un logiciel d'étude d'éclairage destiné au calcul, modélisation et à la visualisation. Ce programme a été lancé par l'Institut allemand de recherche appliquée pour les technologies de l'éclairage. Il permet de réaliser une analyse quantitative, simple et rapide d'une étude à partir de fonctionnalité unique de 3 D. Le format de données utilisé pour les appareils d'éclairage permet d'inclure la géométrie en 3D des appareils, la répartition de l'intensité lumineuse ainsi qu'une description du luminaire.

Scène d'éclairage :

La scène d'éclairage choisi pour effectuer les comparaisons est la salle des doctorants située dans le Laplace. Elle s'étend sur 30 m², comporte 2 portes, 2 fenêtres et 8 postes de travail.



Figure 126 : Modélisation Dialux d'une scène d'éclairage

Le premier but de cette modélisation est de reconstruire au plus proche de la vérité afin d'avoir les mêmes surfaces, mêmes réflexions et globalement le même environnement. Le second objectif étant de comparer les 3 solutions : 3 x 14W et 4 x 18W fluorescent et le prototype à LED s'il était construit en série. Pour pouvoir faire cela, les plug-ins correspondant à chaque luminaire vont être insérés dans la simulation. Dans le cas du prototype, il faudrait le faire mesurer en utilisant un photo-goniomètre pour avoir le diagramme de répartition des intensités précisément. Pour faciliter les choses, il sera admis en tant que première hypothèse que sa diffusion est de type Lambertienne.

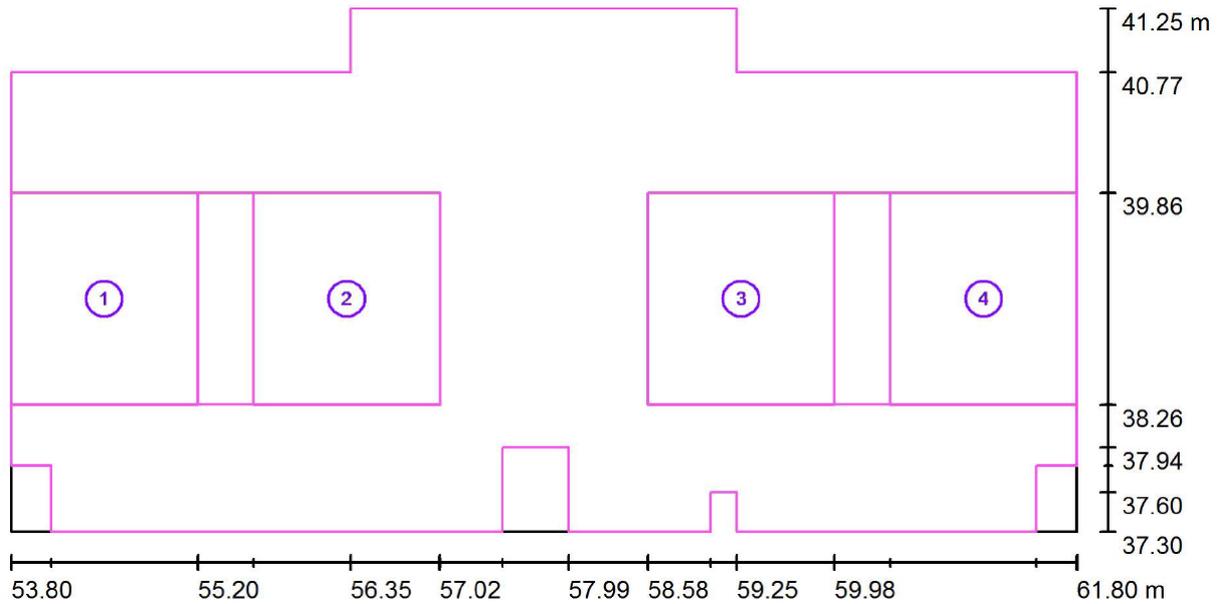


Figure 127 : Vue de dessus de la scène d'éclairage avec délimitation des zones à étudier en particulier

Les principales zones qui doivent être étudiées sont les 4 tables où se trouvent les doctorants. Les deux grandeurs qui seront évaluées sont l'éclairage et l'uniformité. La norme qui règlement les exigences sur ces dernières est la EN 12464. Pour ce cas de figure, les préconisations sont d'avoir 500 lux sur le plan de travail avec une uniformité minimum de 70 %.

Luminaire	P (W)	Pi (W/m ²)	ZT1		ZT2		ZT3		ZT4	
			Emoy (lx)	U (%)						
4x18W fluorescent	592	20,3	628	84,2	646	84,8	638	84,5	606	83,2
3x14W fluorescent	336	11,5	438	85	471	85,3	463	84,9	420	84,6
Luminaire à LED original	320	11	423	88,8	440	92,9	429	92	399	89,5
Prototype à LED	221	7,6	511	89,1	532	92,9	518	91,9	482	89,4

Tableau 35 : Résumé des principales grandeurs simulées sur les quatre zones

P : Puissance des 8 luminaires en fonctionnement nominal

Pi : Puissance installée

ZTx : Représente les postes de travail dans la salle

Emoy : Eclairage moyen

U : Uniformité

La puissance installée est normalisée par la réglementation thermique 2012, elle impose dans les bureaux une valeur de puissance inférieure à 12 W/m² — pour 500 lx. Dans la salle en question, les luminaires installés sont les 3x14W fluorescent donc la puissance installée est de 11,55 W/m², ce qui est la valeur limite. Dans le cas du prototype, cette valeur tomberait à 7,62 W/m², soit 35 % de moins.

En observant l'éclairage moyen par solution, le prototype est très proche de 500 lx sauf pour la ZT4, les autres solutions sont soit 100 lx supérieur, soit 60-80 lx inférieur. L'uniformité est bonne dans tous les cas, mais la meilleure est celle offerte par le prototype. Une mauvaise uniformité peut engendrer des difficultés à lire des documents ou un écran, et dans des cas plus extrêmes, cela peut induire des maux de tête.

	Tube fluorescent 4x18W	Tube fluorescent 3x14W	Luminaire à LED original	Prototype à LED
Puissance (W)	80	47	40	29
Equivalence fluorescent			2x36W/2x 56W	2x36W/2x 56W
Flux lumineux (lm)	5400	3600	3 150	4200
Rendement lumineux (lm/W)	67,5	77	80	148
Angle d'ouverture (°)	110	120	120	120
Durée de vie estimée (h)	500 - 10000	500 - 10000	50 000	50 000

Tableau 36 : Caractéristiques des luminaires utilisés dans Dialux

Le tableau 36 synthétise les caractéristiques principales des 4 types de luminaire qui ont été utilisés dans Dialux pour modéliser la scène d'éclairage dans les différentes configurations.

4.7 Analyse économique de la solution développée :

4.7.1 Comparaison avec la solution fluorescente actuelle :

Les 2 principales données de référence pour cette étude seront 1200 lm pour 14 W. Cela correspond à la puissance et le flux lumineux d'un tube fluorescent servant de référence à surpasser. Les premières informations du cahier des charges pour le luminaire à égaler ou surpasser seront les caractéristiques suivantes : 3600 lm pour 50 W (48W pour les 3 tubes + 10 % de consommation pour le ballast). La température de couleur sera identique (4 000K).

		Flux de référence (lm)	Flux d'une LED à efficacité maximale (lm)	Nombre de LEDs nécessaire	Puissance lumineuse (W)	Puissance installée (W)	Flux LED (lm)	Flux lumineuse (lm)
XPG	Série	3 600	14,27	253	42,9	47,2	3 795	3 415,5
	Non connecté		8,73	413	44	48,5	3 717	3 345,3
	Connecté		9,40	383	40,8	44,9	3 830	3 447
Lumiled	Série		4,71	764	51,9	57	3 820	3 438
	Non connecté		4,01	899	48,7	53,6	4 495	4 045,5
	Connecté		4,10	878	47,5	52,3	4 390	3 951
LCW	Série		1,05	3427	57,9	63,6	6 854	6 168,6
	Non connecté		0,85	4211	56,3	62	4 211	3 789,9
	Connecté		0,86	4182	55,9	61,5	4 182	3 763,8
XPGWHT-FE5			42,28	86	21,6	23,8	3 698	3 328,2

Tableau 37 : Puissance installée et flux théorique en fonction du type de LED et de la manière des associer

Le nombre de LED nécessaire pour avoir un flux similaire à celui de 3 tubes fluorescents peut aller entre 86 à 4 182 LEDs. La topologie et le courant seront les principaux leviers pour ajuster le compromis puissance/nombre de LED. Il est important de faire la différence entre le flux émit par les LEDs et le flux émit par le luminaire : il y a les pertes optiques qui font la différence. De la même manière, d'après les documentations techniques du luminaire original, il est supposé que 10 % de la puissance du luminaire sera perdu dans l'alimentation ce qui donne la puissance installée dans le pire cas. La puissance installée peut aller en fonction de la LED utilisée de 24 à 64 W. En plus des 3 LEDs testées à la base, une ligne a été rajoutée avec la LED la plus efficace étudiée.

Le prix au-delà d'une LED dépend du nombre de LED achetées. Il est autour de 2 € pour une LED, et il peut descendre à 1 € pour un achat de plusieurs milliers de LEDs selon les fournisseurs. Dans le cas des gros fabricants de LED qui les achètent par dizaine de milliers, voire par millions, le prix peut encore être diminué.

4.7.2 Prédiction de la consommation :

		Puissance installée (W)	Temps de fonctionnement 10 h sur 251 jours	Consommation (kWh)	Coût annuel (15 cent/kWh)
XPG-G2	Série	47,2		2 600	118,4
	Non connecté	48,5	121,7		18,2
	Connecté	44,9	112,7		16,9
Lumiled	Série	57,1	143,2		21,4
	Non connecté	53,6	134,5		20,1
	Connecté	52,3	131,3		19,7
LCW	Série	63,6	159,8		23,9
	Non connecté	62	155,7		23,3
	Connecté	61,5	154,3		23,1
XPGWHT-FE5		27,6	69,4		10,4
3 tubes fluorescents		50,4	126,5	18,9	
4 tubes fluorescents		86,4	216,8	32,5	

Tableau 38 : Consommation et coût annuel en fonction du type de LED et de la manière des associer

En se basant sur une utilisation en France d'un bureau, c'est-à-dire 52 semaines de travail, 5 jours sur 7 avec 10 h de fonctionnement de l'éclairage, la consommation a été évaluée. En observant cette dernière, il est possible de voir que les LEDs consomment moins que les tubes fluorescents.

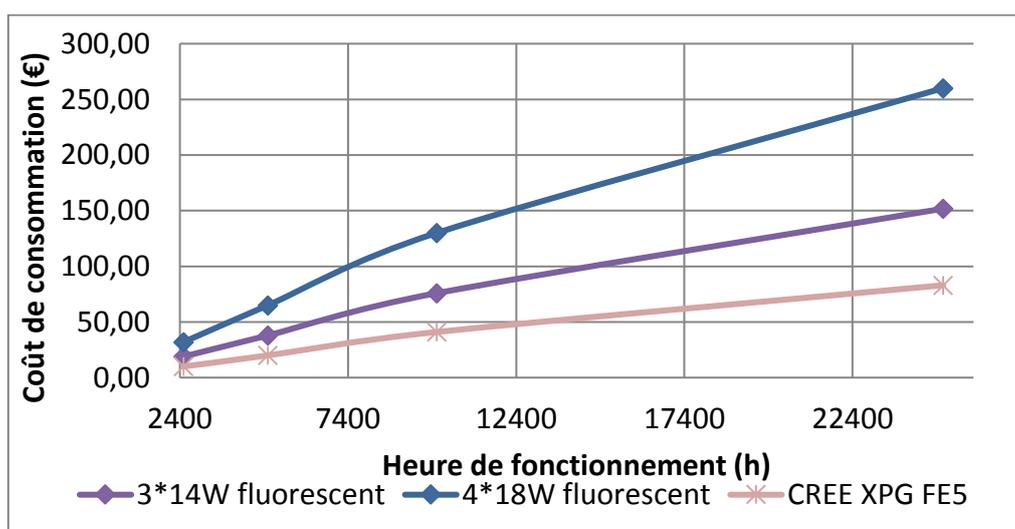


Figure 128 : Consommation théorique des 3 solutions

Les 2600 heures correspondent à une année de fonctionnement, en partant de l'hypothèse que le luminaire sera sans défaut, il est possible prédire la consommation au bout de 10 ans. La maintenance préventive qui consiste à changer les tubes fluorescents tous les 3-5 ans n'a pas été intégrée dans ce graphique. La consommation est un paramètre important pour un luminaire à LED ou autre, mais il est souvent considéré prépondérant aux dépens des autres. C'est pourquoi l'emploi du minimum de LED est privilégié dans la conception. Un luminaire à LED se doit avoir comme objectif d'avoir un coût mesuré, mais aussi avec une durée de vie importante. C'est pourquoi il faut tenir compte de l'aspect thermique qui est fondamental aux LEDs.

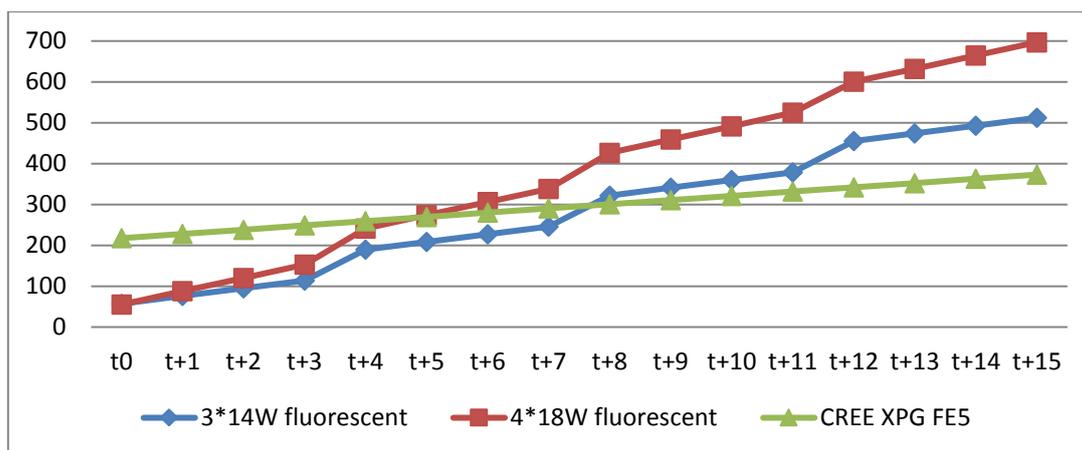


Figure 129 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relapage de 3 ans

Le temps de retour sur investissement est un enjeu majeur lors d'une rénovation d'une installation d'éclairage. Ici, les paramètres d'entrée qui ont été choisis sont :

- Prix de la LED à 1,92 € (prix professionnel)
- Prix du tube fluorescent à 4 € (14W) et 2 € (18W)
- Prix de l'électricité à 15 cts/kWh
- Relapage des tubes tous les 3 ans

La température des LEDs étant considérée comme suffisamment faible pour ne pas impacter la durée de vie et donc respecter les 15 ans de fonctionnement.

En choisissant ces paramètres, il apparaît que le temps de retour sur investissement serait de :

- 6 ans en comparant avec une installation utilisant des luminaires 4x18W,
- 8 ans et demi en comparant avec une installation utilisant des luminaires 3x14W.

Chaque courbe suit une consommation linéaire, les prix pour les tubes partent de très bas, car seuls les 3/4 tubes fluorescents sont comptés. Dans le cas des LEDs, l'investissement est conséquent au départ mais ne varie pas.

En comparant avec la solution à 3 tubes de 14W, les 8 ans de temps de retour sur investissement ne seront pas acceptables pour un client. Cependant, les bâtiments utilisant cette technologie sont

généralement âgés de moins de 10 ans donc il est peu probable que le propriétaire souhaite changer le système d'éclairage. À l'inverse, pour les bâtiments utilisant encore des luminaires fluorescents avec 4 tubes 18W, il serait intéressant de faire un changement et dans ce cas, un temps de retour de moins de 6 ans semble acceptable.

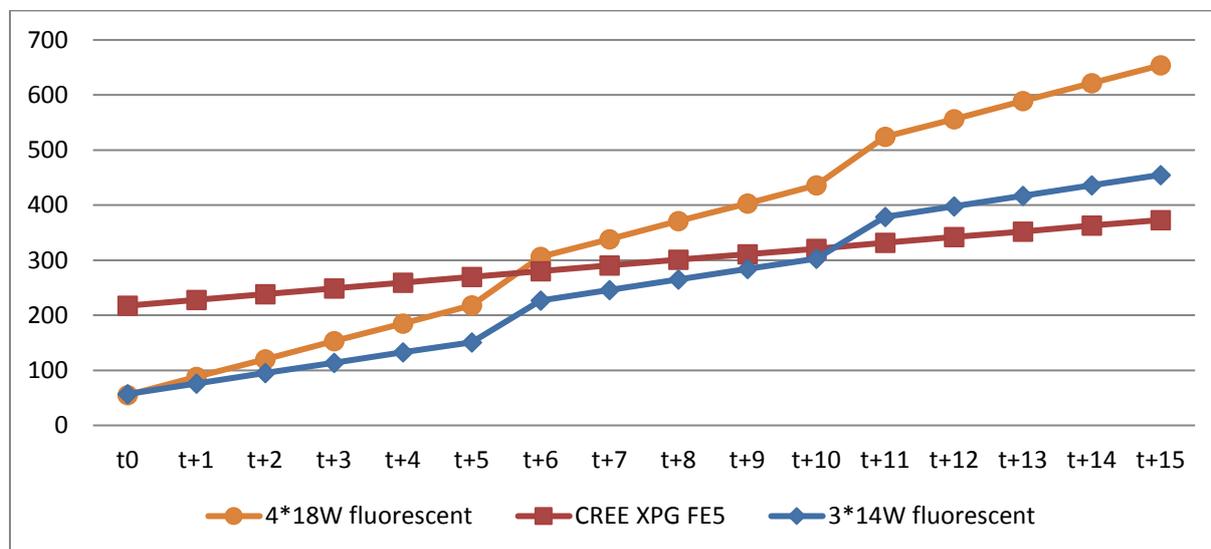


Figure 130 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relampage de 5 ans

En modifiant le relampage de 3 à 5 ans, le retour sur investissement serait de :

- 5 ans et demi en comparant avec une installation utilisant des luminaires 4x18W,
- 10 ans et demi en comparant avec une installation utilisant des luminaires 3x14W.

Le relampage tous les 5 ans fait que le temps de retour sur investissement est plus long mais dans la réalité, très peu d'entreprises attendent aussi longtemps pour réaliser une maintenance préventive.

4.7.3 Consommation en fonction des pays :

Chaque pays a un prix pour l'énergie électrique, le temps de retour sur investissement dépend autant du prix des LEDs/tubes mais aussi celui de l'énergie.

Pays		Prix (ct/kWh)
Allemagne	Danemark	30
Espagne	Italie	23
Roumanie	Hongrie	10

Tableau 39 : Coût de l'énergie électrique dans plusieurs pays

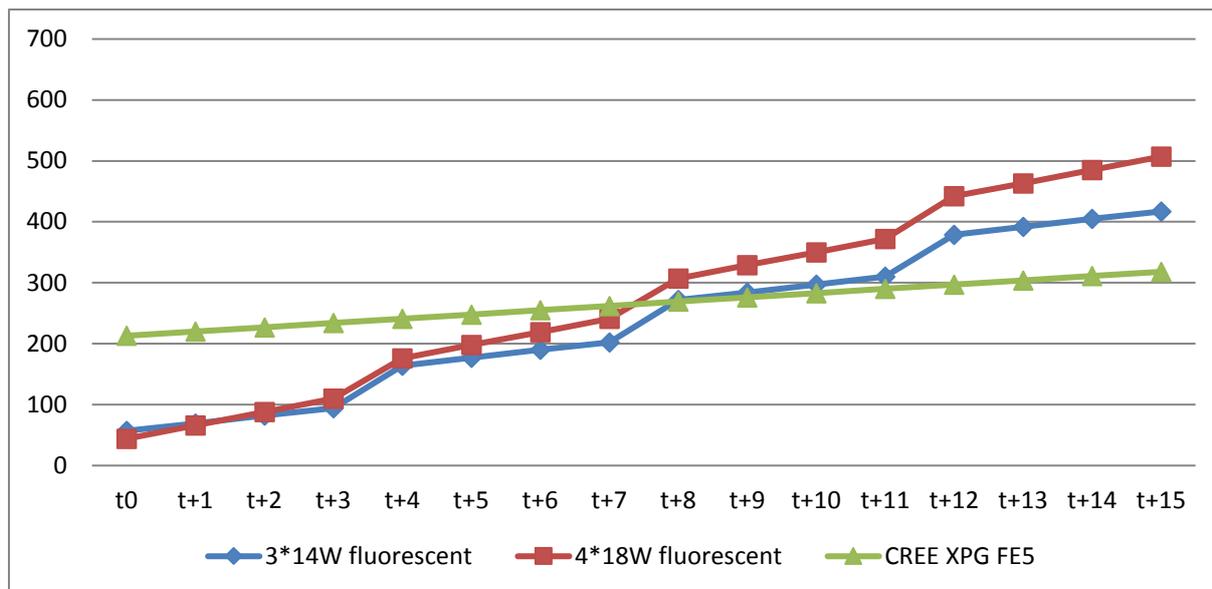


Figure 131 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relapage de 3 ans dans les pays à faible coût de l'énergie

En prenant les pays comme la Roumanie ou la Hongrie à 10 ct/kWh, il apparaît que le temps de retour sur investissement sera entre 7 et 8 ans en fonction de la technologie.

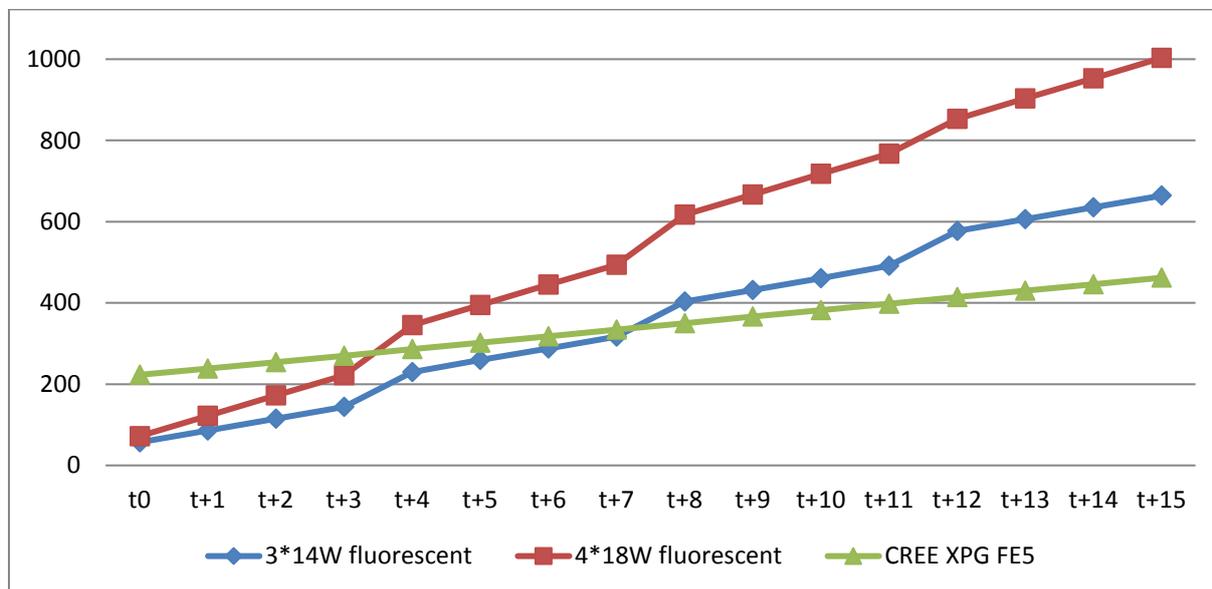


Figure 132 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relapage de 3 ans dans les pays à coût moyen de l'énergie

En comparaison avec l'Espagne ou l'Italie où le prix de l'énergie est de 25 ct/kWh, le temps de retour sur investissement est de 3 ans et demi pour le luminaire 4x18W fluorescent et 7 ans pour un système d'éclairage utilisant les tubes 3x14W.

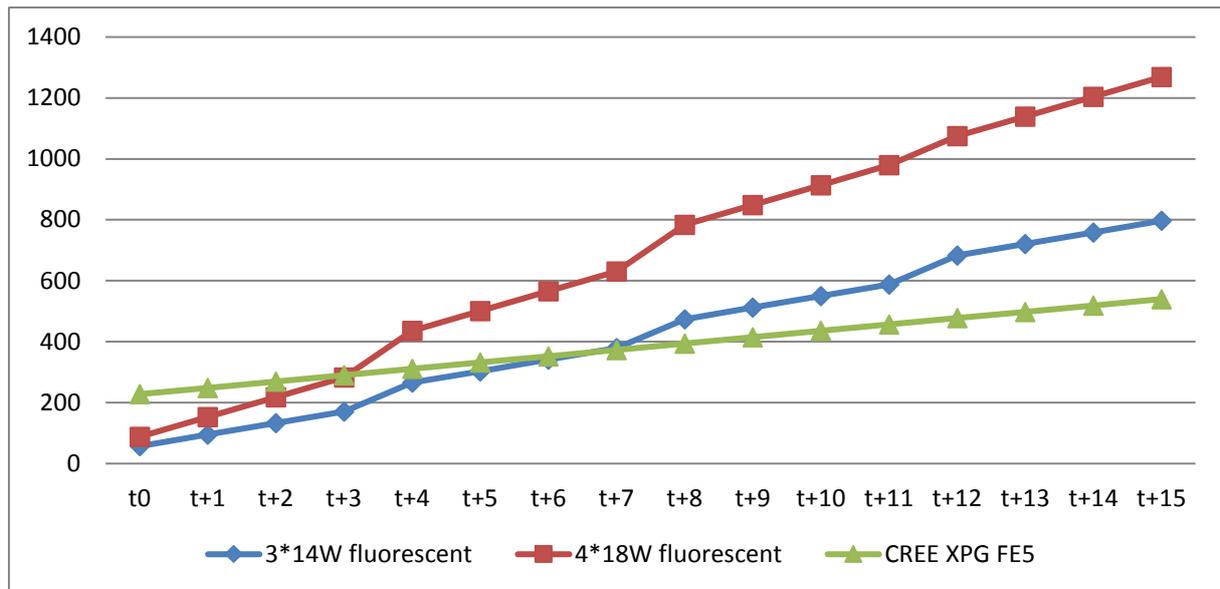


Figure 133 : Retour sur investissement pour les 3 solutions avec un relampage de 3 ans dans les pays à fort coût de l'énergie

En observant l'Allemagne ou le Danemark où l'électricité est à 30 ct/kWh, le temps de retour sur investissement est de 3 ans pour les 4 tubes 18W fluorescents et de 6 ans et demi pour les 3 tubes 14W fluorescents.

Plus le prix de l'énergie est élevé et plus le temps de retour sur investissement sera rapide. Cela est d'autant plus vrai que dans cette étude, le prix du ballast n'a pas été intégré ce qui diminuerait encore le temps de retour sur investissement.

4.8 Conclusion

À travers l'étude des LEDs et des manières de les associer, il est aujourd'hui possible d'opter lors de la conception pour une nouvelle manière très différente de celle préconisée jusqu'à maintenant. Les résultats de ces travaux de thèse prouvent qu'il est possible en utilisant des LEDs de bonne qualité, d'avoir un luminaire à LED dont les performances surpassent une solution fluorescente performante de type tube 3 x 14 W.

En utilisant des méthodes dédiées, il est possible d'évaluer l'impact thermique sur les LEDs et donc d'avoir une idée de la durée de vie du système. Bien que la partie optique n'ait pas été résolue à ce jour sur le prototype, des causes de la chute de rendement lumineux ont pu être identifiées. Ces actions ont néanmoins permis de pouvoir avancer une hypothèse nécessaire pour les simulations des scènes d'éclairages. Se faisant, il a été possible d'avoir une idée précise des performances du prototype dans le cas où les problèmes optiques arrivent à être résolus. De plus, en prenant en compte le maximum de paramètres, une analyse économique a été réalisée afin de déterminer quel serait le retour sur investissement dans le cas d'installation en série de luminaire basés sur le prototype, et cela pour différents paramètres comme le relampage et le pays où serait déployée l'installation. Enfin, dans l'optique de ne pas utiliser un ballast standard, une étude sur la conception d'une alimentation dédiée

a été réalisée. L'objectif étant de s'affranchir des systèmes utilisant des composants présentant des points faibles critiques comme les capacités électrolytiques.

Références

- [110] https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwidss6-vYzQAhVCSHQKHfedDPMQFgggMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cree.com%2F~%2Fmedia%2FFiles%2FCree%2FLED-Components-and-Modules%2FXLamp%2FData-and-Binning%2FXLampXPG.pdf&usq=AFQjCNGQoZiKIkGcnF78jS2rbOSPvZIRHA&sig2=b6tC77rrF1dJyZ0yE_ljmg
- [111] <http://www.led-development.fr/Technologie-LED>

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale

Les diodes électroluminescentes sont des composants connus depuis plus d'un siècle mais ce n'est que depuis une décennie qu'elles commencent à prendre leur place dans les systèmes d'éclairage modernes. Au début, elles étaient utilisées comme voyant sur les tableaux de bord, elles équipent désormais des enseignes de grands magasins, elles sont aussi utilisées pour le rétro éclairage d'ordinateur, il est possible de les trouver dans l'éclairage routier et leur puissance trouve aussi une application privilégiée dans les éclairages aéroportuaires en raison de leur faisceau de lumière intense et directif. La technologie LED est aujourd'hui déclarée très efficace dans certains domaines bien qu'encore en progrès dans d'autres. C'est un élément qui reste complexe à optimiser d'autant plus qu'il est nécessaire de l'associer en grand nombre pour obtenir l'équivalent de flux lumineux par rapport à une ampoule à incandescence ou un néon. Un luminaire à LEDs sollicité de manière importante, supportant des températures tout aussi importantes et qui dans bon nombre de cas, reste néanmoins fiable est aujourd'hui disponible sur le marché bien que sa consommation puisse encore être optimisée ainsi que la qualité de la répartition du flux lumineux. Toutefois, si les LEDs sont utilisées dans de mauvaises conditions, sollicitées au-delà de ses limites ou encore détournées de son application initiale, elles vont se détériorer prématurément et/ou ne pas fournir le service attendu.

Dans le but de pouvoir utiliser au mieux une LED, il convient de mesurer l'étendue de ses possibilités et pour cela, il a été important pour nous de la caractériser. Nous avons vu que la notion de rendement lumineux pour une LED est quelque chose de très compliqué à évaluer et à mettre en œuvre. Il dépend de plusieurs paramètres qui sont de près ou de loin influencés par la température de jonction de la LED. Cette dernière qui est extrêmement sensible, va avoir une influence sur d'autres paramètres comme la tension et plus généralement la puissance consommée, ou encore sur l'émission de lumière et par conséquent le rendement lumineux. Il est aussi possible qu'elle impacte d'autres grandeurs comme la durée de vie qu'il faut cependant faire en sorte de garantir en l'utilisant dans des conditions nominales en regard avec les prix relativement élevés de ces composants.

C'est pourquoi la première partie de l'étude de ce manuscrit a été consacré à l'évaluation des LEDs qui sont actuellement accessibles sur le marché. Les résultats ont montré qu'il existe d'excellentes LEDs mais qu'il était encore possible de trouver des LEDs de qualité médiocre. Et en parallèle, des rendements lumineux très intéressants ont pu être évalués.

Pour beaucoup de concepteurs, les performances minimales pour qu'une LED soit utilisable en luminaire doivent atteindre au moins 100 lm/W, car cela est la barrière actuellement rencontrée par la technologie des tubes fluorescents. Un rendement lumineux tout seul ne donne aucune information, c'est pourquoi il convient d'accompagner la valeur de ce rendement avec une température et une tension pour avoir une meilleure idée des performances de la LED. C'est dans cette optique que les mesures ont été effectuées en laboratoire afin de faire des mesures dans des conditions précises et autant que possible similaires et mener des campagnes de tests pouvant être ensuite comparées.

Nous avons ensuite étudié les différentes manières d'associer électriquement les LEDs et quelles seraient les différences qui pourraient apparaître d'une topologie à une autre en termes d'efficacité,

de robustesse, de facilité à mettre en œuvre ou encore de tension d'alimentation. Le rendement lumineux a été le premier paramètre étudié, c'est pourquoi nous avons évalué à combien il s'élèverait dans des conditions d'utilisation nominales. Ensuite, nous avons recherché quel serait le courant à appliquer pour avoir un rendement maximal et quelle serait le manque à gagner entre le rendement nominal et optimal. Les topologies utilisant la manière de connecter en matrice ont été étudiées plus précisément afin d'observer comment évoluent les problèmes de répartitions de courant à faibles et forts courant d'alimentation. Cela était nécessaire, car une forte disparité de courant aurait forcément un impact sur l'émission de lumière. C'est pourquoi nous nous sommes aussi intéressés à cet aspect. Les essais effectués ont montré que parmi les 3 topologies testées principalement, la matrice connectée est celle qui offre le meilleur compromis malgré qu'elle ait des gros problèmes de partage de courant entre les LEDs.

Dans l'optique de pouvoir concevoir notre propre luminaire à LED basé sur les essais effectués, nous avons recherché un modèle qui soit suffisamment précis et qui pourra être ensuite inséré dans un simulateur de circuit de type Psim. Pour cela, nous avons commencé par mettre au point un modèle électrique local qui serait obtenu par spectroscopie d'impédance. Et devant le manque de précision notamment à très faible et très fort courant, nous nous sommes tournés vers un modèle mathématique qui serait issu de l'équation de Shockley. En utilisant l'ajustement de la caractéristique courant tension, nous avons mis en œuvre une méthodologie qui fournirait une équation permettant de prédire la caractéristique en fonction du nombre de LED et de la manière de les associer. Le résultat de modélisation nous a permis de concevoir une alimentation électrique DC/DC fonctionnant à partir d'un bus 48V qui serait dédiée au prototype.

L'un des objectifs de ces travaux a été, à partir de LEDs issues du commerce, de comparer la méthode de conception telle qu'elle est appliquée en industrie, c'est-à-dire utiliser peu de LED alimentées à fort courant à la méthode opposée qui consistant à utiliser beaucoup de LED sous-alimentées. L'un des principaux avantages de cette méthode est qu'à flux lumineux équivalent, augmenter le nombre de LED diminue globalement la consommation de l'ensemble. Et surtout, le fait de sous-alimenter les LEDs entraîne un stress thermique moindre et donc une durée de vie de l'ensemble majoré. Pour étayer les analyses, des modélisations thermiques ont été effectuées en utilisant le logiciel Comsol.

À partir de LED ayant un rendement lumineux de 169 lm/W, nous avons fait une première analyse économique afin de déterminer quel serait l'optimum pour confronter notre prototype à un luminaire standard utilisant des tubes fluorescents 4x18W ou 3x14W. Ensuite, nous avons réalisé un prototype basé sur toutes les études effectuées précédemment. Il s'est avéré que ce dernier n'a pas été optimisé optiquement encore à ce jour et par conséquent, cela a entraîné une perte significative de flux lumineux dans le luminaire. Néanmoins, en prenant une hypothèse concernant la répartition lumineuse, nous avons pu simuler sous Dialux quel serait le résultat si le prototype venait à être corrigé optiquement et placé dans un environnement de travail de type bureau. Les résultats montrent qu'il y aurait une économie significative tout en garantissant une uniformité de lumière suffisante pour permettre de bonnes conditions de travail.

Enfin, dans l'objectif d'avoir une comparaison complète avec les solutions fluorescentes standards, nous avons effectué une analyse économique qui tiendra compte des paramètres comme le relampage, le prix de l'alimentation, le prix de l'énergie, la durée de vie des éléments ou encore du pays temps de retour sur investissement.

Perspectives

L'un des objectifs de la thèse est de confronter une nouvelle méthode de conception des luminaires à LED en privilégiant le rendement lumineux et le nombre de LED à la méthode standard qui consiste à utiliser le minimum de LED en réduisant l'efficacité lumineuse significativement. Pour cette comparaison, le paramètre clé qui déterminera l'intérêt de choisir une méthode ou une autre, c'est le rendement lumineux. C'est pourquoi mesurer l'évolution de ce dernier est quelque chose de nécessaire. Plus le rapport rendement lumineux sur flux émit sera important et plus la nouvelle méthode sera intéressante. Mais pour cela, il faudrait étudier dans des conditions similaires un très grand nombre de LED, car les informations affichées sur les sites fournisseurs ne sont pas forcément exactes et ne donnent pas toutes les renseignements nécessaires.

Les études développées dans ce manuscrit ont permis de mettre en avant un certain nombre de liens entre l'électricité et la lumière. Les problèmes dus à la répartition des courants et la conséquence sur l'émission de lumière a été étudié mais les moyens matériels à disposition n'ont pas permis de faire une étude à des courants de fonctionnement « nominal », c'est-à-dire à 350 mA. C'est pourquoi il serait opportun de faire une étude plus complète du lien entre ces derniers. Lors des comparaisons, les deux paramètres qui étaient rapprochés sont le courant et la luminance (en vision directe). Or les yeux distinguent les caractères, les objets ou les personnes avec une différence de luminance : un contraste. Dans ce manuscrit, l'étude concernant le contraste a été très sommaire, car la loi de Weber qui a été utilisé est elle-même très simplifiée. En conséquence, pour déterminer quel serait l'impact sur l'œil, il faudrait avoir recours à des travaux plus précis.

Une autre perspective possible concerne le prototype qu'il serait intéressant d'optimiser d'un point de vue optique afin de le rendre opérationnel. La première chose à effectuer serait d'étudier plus en détail la compatibilité entre le plexiglas et les LEDs afin de voir si ce dernier est le plus adapté pour canaliser les rayons vers l'extérieur. Pour cela, les tests ont montré qu'en inclinant les LEDs, il serait possible de mieux canaliser le flux lumineux. L'autre amélioration serait sur le plexiglas en le perçant à certains endroits afin de faire coïncider le dôme en silicone de la LED avec le plexiglas directement. Une autre manière de canaliser les rayons lumineux vers l'extérieur serait de rainurer la partie du plexiglas en contact avec le diffusant pour diminuer l'effet miroir. Enfin, si une étude venait à montrer que le plexiglas employé ne serait pas compatible, il y aurait aussi la possibilité de faire fabriquer un plexiglas sur mesure et de meilleure qualité.

Annexes

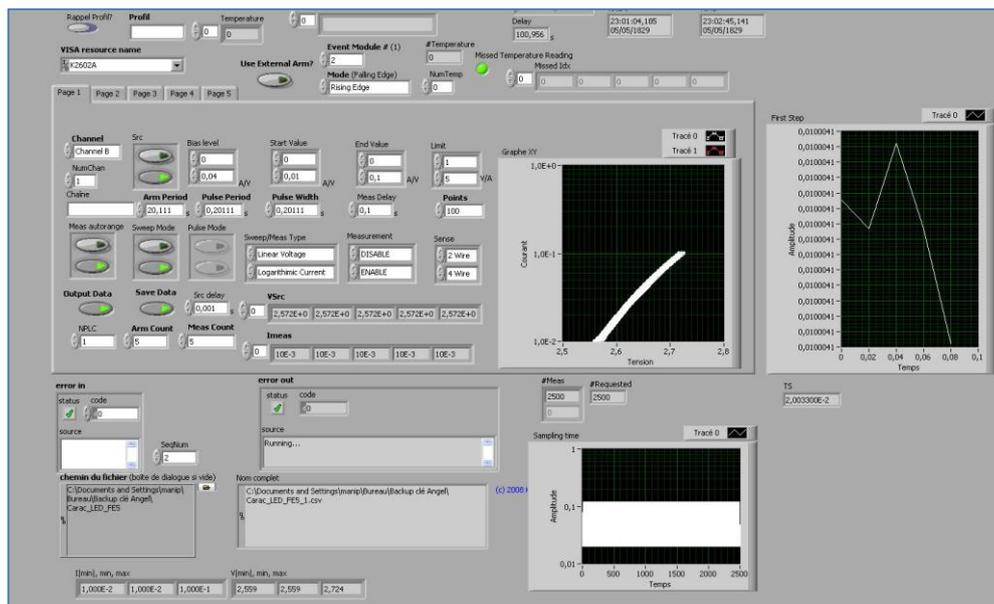
Matériel utilisé pour la caractérisation photométrique

Pour la réalisation de la caractérisation électrique et photométrique, nous avons eu recours à 3 appareils :



Keithley 2602A

Keithley K2602A : Le Keithley est un sourcemètre pouvant délivrer un courant ou une tension. Pour les LEDs, elles doivent être alimentées en courant pour éviter l'emballement thermique. De plus, cet appareil a l'avantage de pouvoir prendre une grande quantité de mesure en un temps court. Il possède 2 sorties avec une compliance de 40V-1A DC par voie. Ce faisant, il est possible d'alimenter les 25 LEDs en série ou en parallèle sans aucun problème. Et enfin pour un intervalle de 1 mA à 1 A, la précision est de $\pm 0.05\%$ +900 μ A, ce n'est pas une nécessité absolue à notre niveau mais c'est un gage de qualité au niveau des mesures effectuées.



Interface Labview pour le contrôle du Keithley

Le contrôle du Keithley est assuré avec le logiciel Labview. Un programme a été mis au point permettant de régler tous les paramètres nécessaires à la caractérisation électrique : nombre de voies utilisées, courant/tension lors de la mesure, valeur de départ et de fin, limite en tension/courant, durée des impulsions ou de la période, nombre de points de mesure, mesure en mode autorange, mesure en mode balayage, balayage du courant/tension linéaire ou logarithmique, mesures en mode 2/4 fils, mesure de la température, utilisation d'un déclencheur extérieur pour les mesures, programmation de forme d'onde particulière. Les pinces utilisées pour les connexions sont des pinces Kelvin crocodile.



Spectromètre Specbos 1201

Le spectromètre Specbos 1201 est un appareil mesurant les radiations dans le domaine visible du spectre électromagnétique (entre 380 et 780 nm). Il peut quantifier une valeur de luminance, radiance, coordonnées x et y, pureté du blanc, température de couleur corrélée ou encore indice de rendu des couleurs. Il possède une résolution de 5 nm et un angle d'ouverture de 1,8 °. Il est contrôlable avec le logiciel JETI pour obtenir les grandeurs citées précédemment.



Sphère intégratrice LMS-100

Le dernier élément pour la mesure du flux est la sphère d'Ulbricht (aussi appelée sphère intégratrice). Le modèle utilisé au LAPLACE est la LMS-100 de 25 cm de diamètre. Le principe est d'assurer le brassage du rayonnement par de multiples réflexions. L'objectif ici est d'obtenir un flux résultant homogène et un éclairage proportionnel au flux émis.

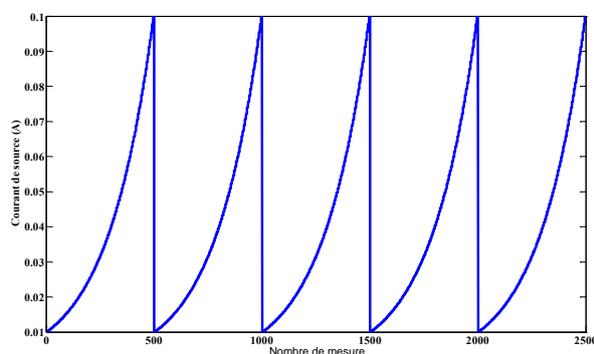
La sphère est revêtue d'une peinture diffusante blanche aussi peu sélective que possible qui assure entre 80 et 98 % de réflexion de la lumière sur un intervalle de 250 à 2500 nm. Un baffle est installée

dans la sphère pour masquer le flux direct de la lampe à mesurer. La valeur d'éclairement ou de luminance mesurée sur cette dernière est ensuite convertie en flux. Pour cela, une lampe étalonnée par le NIST (National Institute of Standards and Technology) est utilisée pour déterminer le coefficient qui permet de passer de la luminance/éclairement à un flux.

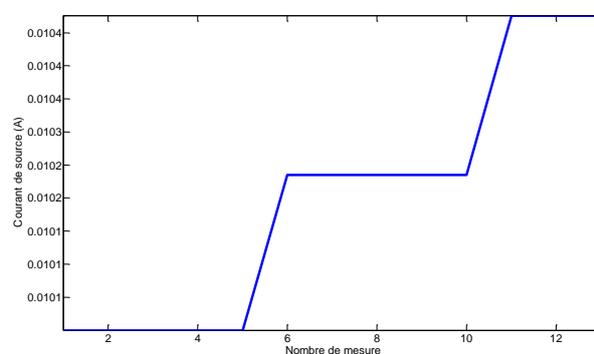
Protocole de caractérisation des LEDs pour la modélisation

L'approche a été mise en œuvre de telle manière à pouvoir prédire le comportement de la LED en se basant sur la caractéristique $V=f(I)$. Le but de cette méthode est d'obtenir une équation qui traduit le comportement courant en fonction de la tension afin de pouvoir déterminer les grandeurs, quelle que soit la nature de celle en entrée et de son intensité.

Le processus de caractérisation global se déroule en deux parties. Dans un premier temps, une recherche est effectuée afin de déterminer où se trouve le point d'efficacité maximum. Ensuite un second balayage est effectué plus en détail autour du point d'efficacité maximum en effectuant des petits pas de courant et obtenir plus en détail la croissance et chute de rendement. Cette étape est faite de manière manuelle, car le temps d'acquisition des mesures au spectromètre n'est pas connu à l'avance et il est différent suivant le niveau de luminance. Durant cette phase, la température de la platine est monitorée pour prévenir des dérives thermiques. Dans un second temps, après avoir trouvé le point d'efficacité maximale, un dernier balayage en courant est fait automatiquement autour de ce point avec le Keithley. Dans le cas d'un point d'efficacité maximum à 40 mA, le balayage effectué par le Keithley sera entre 1 et 100 mA. Il est répété cinq fois ce qui permet de détecter d'éventuelles dispersions ou dérives des grandeurs électriques. Chaque niveau de courant appliqué est répété cinq fois et moyenné pour vérifier le niveau de bruit ou d'éventuelles données aberrantes. Ces mesures permettent de détecter facilement les dérives causées par les problèmes thermiques. Ces derniers sont encore minimisés par l'utilisation d'une couverture logarithmique lors du balayage en courant. En effet, il n'y a peu de points qui sont appliqués à fort courant comparé à un balayage linéaire. Dans le but de pouvoir comparer différentes LEDs à plusieurs reprises, il a fallu contrôler autant que possible un certain nombre de paramètres. C'est ce qui explique la complexité du protocole de mesure. En outre, lors du dernier balayage avec le Keithley, les mesures de température étaient assurées avec un thermocouple connecté à un contrôleur TC-08 qui effectuait 10 mesures par secondes en parallèle des mesures électriques.



Balayage en courant effectué au Keithley



Mesures effectuées lors du balayage



Recherche du point d'efficacité maximale

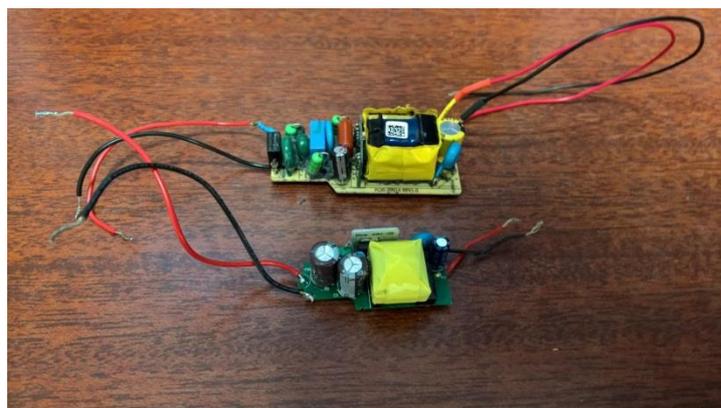
Premiers prototypes

Pour étayer les premiers phénomènes mis en avant, 2 systèmes d'éclairage ont été optimisés. D'abord, il y a eu une source de lumière équivalente à une halogène et ensuite une réglette à LED.



Ampoule à LED témoin et modifiée après optimisation

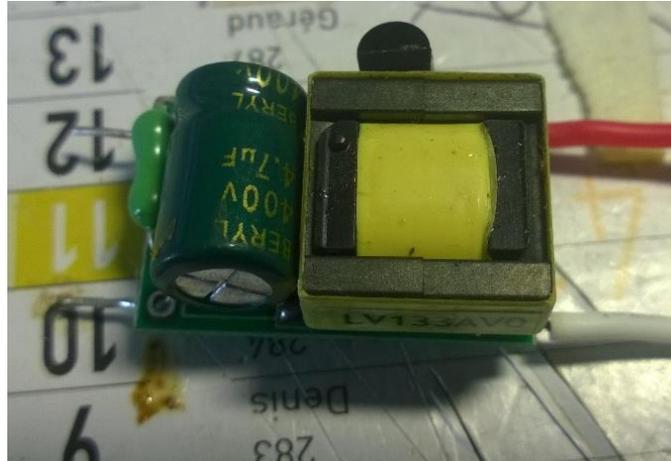
La première optimisation a été réalisée sur une source de lumière à LED équivalent halogène. Le premier objectif ici est d'observer les ballasts à l'intérieur des dispositifs et repérer les points faibles de ces ampoules. Bien que les LEDs ont une durée de vie conséquente en théorie, cette dernière n'est pas toujours respectée, car le convertisseur AC/DC a des éléments qui n'ont une durée de vie de quelques milliers d'heures.



Exemple de ballast présentant des composants limitant la durée de vie de l'ampoule

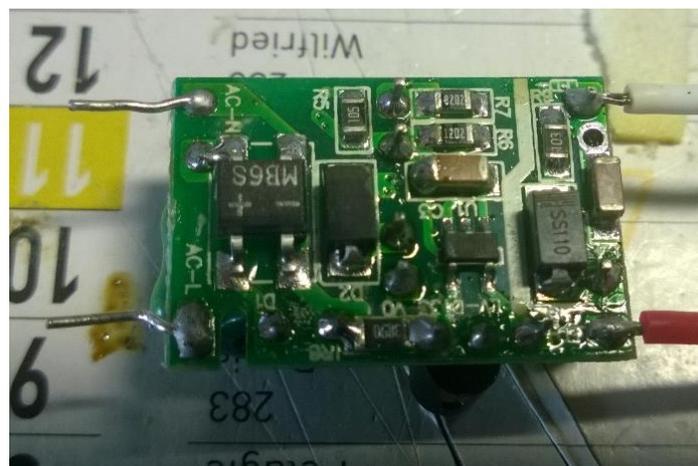
En désassemblant une quinzaine de sources à LED, il est possible de constater qu'à l'intérieur, le ballast est souvent composé d'une bobine (ou d'un transformateur), de résistance et de capacité

électrolytique. Or, les capacités sont souvent placées à côté des résistances. Et par conséquent, la chaleur affecte les condensateurs et induit une diminution accélérée de la durée de vie d'une capacité. Se faisant, cela crée un point faible critique dans le circuit.



Exemple de ballast présentant des composants limitant la durée de vie de l'ampoule

Après avoir ouvert l'une des deux sources qui sera optimisée, son ballast a été ouvert et il est possible de voir sa capacité avec à sa gauche, une résistance. L'inductance et la diode sont aussi visibles mais sont moins sensibles à la chaleur. Ce genre de montage engendre aussi une quantité d'harmoniques non négligeable.



Ballast optimisé réalisé avec des composants moins sensibles à la chaleur

Le nouveau ballast possède les mêmes composants que sur l'ancien ballast, c'est-à-dire résistance, capacité et inductance mais il offre l'avantage de les avoir en étant moins sensibles à la chaleur. En

outre, le rendement est supérieur pour ce ballast. Les pertes dans l'ancien ballast étant de 20 %, le nouveau en affiche 9 %.

L'un des points qu'il est important de noter est que le ballast original est un convertisseur AC/DC alors que le nouveau est un convertisseur DC/DC.

Référence (AC)	Optimisée (DC)	Grandeur
230,1	30	Tension d'entrée (V)
0,03	0,1	Courant d'entrée (A)
3,8	3	Puissance (W)
177,3	159,2	Flux lumineux (lm)
46,2	52,1	Efficacité lumineuse (lm/W)

Comparaison des grandeurs pour les deux ampoules à LED

Les tensions d'entrée ne sont pas de même nature, cependant, en observant la puissance consommée, il y a 20 % de différence. De manière inverse, il y a 10 % de flux lumineux en moins. Et enfin, il y a 12 % d'efficacité lumineuse en plus.



Réglette d'origine

Le second dispositif à avoir été optimisé est une réglette domestique. L'objectif ici était de vérifier que pour le même flux émit, la puissance avait diminué et l'efficacité du dispositif augmentait. La réglette originale est une réglette du fabricant Bardolino. Ses caractéristiques avant et après optimisation sont les suivantes :

Réglette de référence		Réglette modifiée	
Flux lumineux (lm)	300	Flux lumineux (lm)	300
Puissance (W)	5	Puissance (W)	3,4
Nombre de LED	12	Nombre de LED	25
Efficacité du tube (lm/W)	60	Efficacité du tube (lm/W)	90

Caractéristique de la réglette avant et après optimisation

La réglette de référence a été vérifiée dans un premier temps pour comparer avec les caractéristiques fournies par la documentation technique.

