



Caractérisation thermique et lumineuse de diodes électroluminescentes en charge par méthodes locales non intrusives : influence du luminophore

Fiona Belfio Lacourarie

► To cite this version:

Fiona Belfio Lacourarie. Caractérisation thermique et lumineuse de diodes électroluminescentes en charge par méthodes locales non intrusives : influence du luminophore. Thermique [physics.class-ph]. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2015. Français. NNT : 2015EMAC0003 . tel-01905619

HAL Id: tel-01905619

<https://theses.hal.science/tel-01905619>

Submitted on 26 Oct 2018

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 :

École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux conjointement avec l'INP Toulouse

Présentée et soutenue par :
Fiona BELFIO LACOURARIE

le vendredi 17 juillet 2015

Titre :

Caractérisation thermique et lumineuse de diodes électroluminescentes en charge par méthodes locales non intrusives : influence du luminophore

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Énergétique et transferts

Unité de recherche :

Centre RAPSODEE - UMR CNRS 5302, École des Mines d'Albi-Carmaux

Directeur/trice(s) de Thèse :

Olivier FUDYM

Jury :

Olivier FUDYM, Professeur, École des Mines d'Albi-Carmaux, Directeur de thèse

Jean-Luc BATTAGLIA, Professeur, Université de Bordeaux, Président de jury

Benjamin REMY, Professeur, Université de Lorraine, Rapporteur

Mohammed LACHI, Professeur, Université de Reims Champagne-Ardenne, Rapporteur

Jean-François VENEAU, LED Engineering Development, Co-encadrant industriel

Caractérisation thermique et lumineuse de diodes électroluminescentes en charge par méthodes locales non intrusives : influence du luminophore

Résumé

Le marché des diodes électroluminescentes (LEDs) de puissance est en perpétuelle croissance depuis une vingtaine d'années. Le marché de l'éclairage évolue car les besoins ont changé : nous souhaitons, par exemple, aujourd'hui réduire la consommation électrique, ou avoir des éclairages plus flexibles (couleur, cycle d'allumage, encombrement, ...). Les LEDs de puissance permettent d'apporter des solutions où les autres éclairages font défauts. Une étude comparative est menée entre les LEDs et les autres sources d'éclairages.

Une LED de puissance émettant une lumière blanche est constituée d'une puce semi-conductrice, d'un substrat, d'un PAD et d'une optique primaire. Différentes méthodes permettent d'obtenir de la lumière blanche avec des LEDs : plusieurs puces, une puce avec un ou des luminophores, ou la méthode PRS-LED. Le luminophore a un rôle optique important et un rôle thermique non négligeable. Après avoir été excité par la lumière émise de la puce, il réémet de la lumière dans une longueur d'onde supérieure. L'efficacité de ce processus dépend de nombreux paramètres, comme la mise en œuvre du luminophore ou le type de luminophore utilisé.

L'étude et la caractérisation des propriétés optiques et thermiques sont faites pour des LEDs commerciales, composées d'une même puce émettant de la lumière bleue, avec et sans luminophore jaune. Afin de maîtriser le maximum de facteurs, nous avons mené une étude et un dimensionnement du circuit imprimé (PCB) sur lequel va être implanté nos LEDs.

Dans le but d'évaluer les matériaux constituant les LEDs, des analyses au microscope à balayage électronique et par microsonde ont été menées. Ces travaux ont permis de révéler, notamment, la position de la jonction p-n dans la puce et la composition de la couche de luminophore par deux types différents. De plus, afin d'améliorer notre compréhension, une étude comparative a été menée sur trois luminophores jaunes.

Ensuite, les deux types de LEDs, puce nue et puce avec luminophore, ont été testés dans le but d'obtenir le flux lumineux et le rendement des LEDs. La caractérisation optique nous a amené à créer un banc pour obtenir la luminance énergétique spectrale sur une partie minime de la puce.

D'autre part, nous nous intéressons à la température de jonction de la puce nue, que nous mesurons par différentes méthodes, dont la thermographie infrarouge. Pour cela, l'émissivité a été estimée pour la puce nue et la puce avec luminophore. Puis nous comparons aussi ces différentes méthodes pour le calcul de la résistance thermique $R_{th\ j-PAD}$ entre la jonction et le PAD.

Le maillage de fils conducteurs implanté sur la surface de la puce est modélisé électriquement. Cette étude, qui est composée de niveaux progressifs de modélisation, permet de comprendre la répartition du courant électrique qui traverse la jonction, et ainsi d'appréhender la répartition du flux lumineux et de la température au niveau de la surface de la puce.

Après, un modèle thermo-optique décrit les phénomènes présents au niveau de la jonction d'une puce nue : la conversion de la puissance électrique en lumière bleue et en chaleur, et les transferts de chaleur. Nous complétons ce premier modèle pour obtenir un modèle d'une puce avec le luminophore. Ce dernier modèle prend en compte la photo-conversion du luminophore avec le calcul de flux lumineux à la sortie du luminophore et le calcul de la chaleur due à la photo-conversion. La résolution de ce modèle nous permet d'obtenir la température de jonction d'une puce avec luminophore. La conservation d'énergie du modèle est aussi vérifiée.

Le modèle thermo-optique est appliqué à une cartographie de température de surface afin d'obtenir une cartographie de la température de jonction. Ces cartographies sont regroupées avec les clichés de thermographie infrarouge et de luminance énergétique.

Mots clés : Diode électroluminescente, Luminophore, Mesure de luminance énergétique spectrale, Température de jonction, Modèle thermique, Thermographie infrarouge

Thermal and luminous characterization of charged light emitting diodes (LED) by local non-intrusive methods: effect of phosphor

Abstract

The high brightness LED market is constantly growing last twenty years. The lighting market is changing as needs have changed: we would like, for example, reduce power consumption, or have more flexible lighting (color, lighting cycle, dimensions ...). High brightness LEDs help provide solutions where others are lighting defects. A comparative study is conducted between the LEDs and other lighting sources.

The operation of a high brightness LED emitting white light is explained with the description of each element: chip, substrate, the PAD and optics. Then the different methods of obtaining white light with LEDs are compared: several chips, a chip with one or more phosphors, or PRS-LED method. The phosphor has a significant optical role and an important thermal role. After being excited by the light emitted from the chip, it re-emits light in a greater wavelength. The effectiveness of this process depends on many parameters, such as the implementation of the phosphor, or the type of phosphor used.

The study and characterization of optical and thermal properties are made for commercial LEDs, composed of a single chip emitting blue light with and without yellow phosphor. To master the maximum factors, we conducted a study and design of the printed circuit board (PCB) on which will be implanted our LEDs.

In order to evaluate the materials constituting the LEDs, analyzes made at scanning electron microscope, and by microprobe were conducted. This work has revealed in particular the position of the p-n junction in the chip, and the composition of the phosphor layer of two different types. Moreover, to improve our understanding, a comparative study will be conducted on three yellow phosphors.

Then the two types of LEDs, bare chip and chip with phosphor, were tested in order to obtain the luminous flux and efficiency of LEDs. The optical characterization has led us to create a bench for spectral radiance over a small portion of the chip.

Furthermore, we are interested in the junction temperature of the bare chip, which we measure by various methods, including infrared thermography. For this, the emissivity was estimated for the bare chip and the chip with phosphor. Then we also compare these different methods to calculate the thermal resistance $R_{th\ j-PAD}$ between the junction and the PAD.

The mesh of conductive wires, implanted on the surface of the chip, is electrically modeled. The study, which is composed of three progressive levels of modeling, provides an understanding of distribution of the electric current through the junction, and thus to understand the distribution of the light flow and temperature at the surface of the chip.

Afterwards, an optical-thermal model describes the phenomena present at the junction of a bare chip: converting electrical power into blue light and heat, and heat transfer. We complete this first model for a model of a chip with the phosphor. This model takes into account the photo-conversion of the phosphor with the calculation of the luminous flux at the output of the phosphor and the calculation of the heat due to the photo-conversion. The resolution of this model allows us to obtain the junction temperature of a chip with phosphor. The model of energy conservation is also verified.

The optical-thermal model is applied to a surface temperature mapping in order to obtain a mapping of the junction temperature. These maps are combined with pictures of infrared thermography and radiance.

Key words: Light emitting diode, Phosphor, Spectral radiance measurement, Junction temperature, Thermal model, Infrared thermography

Remerciements

Les travaux rassemblés dans ce manuscrit sont le fruit d'un travail d'équipe. Aussi, je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont entouré et ont contribué à l'aboutissement de ce doctorat.

Tout d'abord je remercie mon directeur de thèse Olivier Fudym de m'avoir encadrée d'élève ingénieur à doctorant. Je lui souhaite une bonne continuation dans son aventure brésilienne en tant que directeur du CNRS au Brésil.

Je remercie également l'entreprise LED Engineering Development avec Laurent Massol, et son équipe de Montauban Gaëlle, Claire, ... et particulièrement Jean-François Veneau, et son équipe du LAAS, Christophe et Sylvain.

Je veux remercier les deux rapporteurs de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de prendre part de lire mon manuscrit et de porter un regard critique sur mon travail : Benjamin Rémy, professeur de l'Université de Lorraine, Mohammed Lachi, professeur de l'Université de Reims. Je remercie également mon président de jury, Jean-Luc Battaglia qui a suivi le déroulement de ma thèse pendant ces trois années.

Merci au laboratoire RAPSODEE, de Mines Albi :

- aux doctorants et docteurs, surtout Matthieu, Christophe, Victor et Olivier,
- à ses techniciens, à ses ingénieurs de recherche,
- à ses secrétaires, Chrystel et Anne-Marie,
- à son encadrement, particulièrement son directeur Ange Nhziou.

Merci encore à Jean-Luc Battaglia, qui a été Président du jury, et aux membres du département TREFLE de l'I2M de m'avoir accueilli pendant une semaine afin d'aborder la microscopie thermique.

Merci à Benoit Glorieux de ICMCB pour son aide dans la compréhension des luminophores et de l'influence de la thermique sur les luminophores

Merci à ma famille, spécialement, à mes parents, Josian et Dominique, de m'avoir donné le goût de la curiosité et de la persévérance, et à ma petite sœur Julie. Merci aux amis : Julien, Solène, Clément, Amélie, Ben, Laurine, Claire, Nico, Morgane, Steph...

Enfin, je tiens à remercier particulièrement mon mari Benoit. Depuis 2006, tu es mon pilier, mon point de repère. Tu l'as encore prouvé lors de ces trois années et de notre mariage en 2014. Merci.

Table des matières

Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures	viii
Liste des symboles	xii
Présentation des équipes de travail	xiii
Introduction	1
Chapitre 1 - Diodes électroluminescentes.....	3
1 Généralités sur la lumière blanche et les grandeurs associées	4
1.1 La lumière blanche	4
1.2 Propriétés de la lumière	6
2 Marché global des LEDs de puissance.....	8
2.1 Les différents enjeux	8
2.2 Marché.....	8
2.3 Comparaison par rapport aux autres sources d'éclairage	11
3 Fonctionnement d'une LED émettant une lumière blanche	13
3.1 Constitution générale d'une LED de puissance	13
3.2 LED émettant de la lumière blanche	17
3.3 Comparaison des différents types de LEDs	19
4 Luminophore, du fonctionnement au calcul du rendement.....	20
4.1 Explication du fonctionnement d'un luminophore	20
4.2 Mise en œuvre de luminophore	23
4.3 Effets de différents paramètres	24
5 Caractérisation thermique des LEDs – Problématique	25
5.1 Lien entre température, transferts thermiques et luminance	25
5.2 Thermographie infrarouge	25
5.3 Modélisation optique et thermique	26
5.4 Grandeur critique : la température de jonction.....	26
6 Conclusion préliminaire	26
Chapitre 2 - Caractérisation des matériaux constituant une diode électroluminescente	29
1 Création de module de tests	30
1.1 Choix des LEDs	30
1.2 Création des supports d'implantation.....	31
2 Caractérisation des matériaux constituant une LED.....	35
2.1 Analyse au Microscope à Balayage Electronique de la puce.....	35

2.2 Analyse de la couche de luminophore faite par microsonde.....	42
3 Caractérisation de luminophores.....	44
3.1 Caractériser la taille des grains.....	44
3.2 Mesure de luminescence.....	47
3.3 Conductivité thermique.....	50
4 Conclusion	58
Chapitre 3 - Caractérisation optique de puces nues et avec luminophore	59
1 Mesure du flux global lumineux visible.....	60
1.1 Description du banc.....	60
1.2 Mesure d'une puce nue.....	61
1.3 Mesure d'une puce avec luminophore.....	62
1.4 Conclusion.....	63
2 Cartographie de la luminance énergétique spectrale.....	63
2.1 Description du banc.....	63
2.2 Méthode de mesure	65
2.3 Etude d'une puce nue.....	66
2.4 Etude d'une puce avec luminophore.....	72
3 Conclusion	76
Chapitre 4 - Caractérisation thermique de puces nues et avec luminophore.....	77
1 La thermographie infrarouge	78
1.1 Le rayonnement thermique.....	78
1.2 Emissivité	79
1.3 La caméra infrarouge.....	79
2 Cartographie d'émissivité.....	80
2.1 Mesure de l'émissivité.....	80
2.2 Cartographie d'émissivité d'une puce nue et d'une puce avec luminophore	81
3 Mesures de la température de jonction d'une puce nue	83
3.1 Méthode de la différence de tension	84
3.2 Mesure par thermographie infrarouge	85
4 Calcul de la résistance thermique entre la jonction et le PAD.....	86
4.1 Calcul de la valeur générale de la puce nue	86
4.2 Cartographie de la résistance thermique	87
5 Influence de $T_j - T_{pad}$	90
6 Conclusion	90
Chapitre 5 – Modèle thermo-optique de puces nues et avec luminophore	91

1	Modèle électrique du maillage au-dessus de la puce	92
1.1	Modèle électrique niveau 1.....	92
1.2	Modèle électrique niveau 2.....	94
1.3	Modèle électrique niveau 3.....	96
2	LED émettant de la lumière bleue	98
2.1	Modèle thermo-optique.....	98
2.2	Calcul du rendement	99
3	LED émettant de la lumière blanche	101
3.1	Modèle thermo-optique.....	101
3.2	Calcul des pertes thermiques dans le luminophore.....	103
3.3	Intégration du modèle optique dans le modèle thermique.....	107
4	Cartographie d'une puce émettant de la lumière blanche	115
4.1	Cartographie de la température de jonction T_{jw}	115
4.2	Lien entre la température et la luminance énergétique	116
5	Conclusion du modèle thermo-optique.....	124
	Bilan et Perspectives	127
1	Synthèse	128
2	Perspectives	128
2.1	Visualisation de phénomènes thermiques rapides	128
2.2	Microscopie thermique de puces	128
2.3	Amélioration du modèle thermo-optique.....	129
3	Amélioration du modèle thermo-optique : effets thermiques sur le luminophore	130
3.1	Thermal quenching (TQ) ou extinction thermique.....	130
3.2	Ionisation thermique (TI).....	131
3.3	Dégradation thermique (TD)	131
3.4	Expansion thermique – dilatation des particules.....	131
	Bibliographie	132
	Annexes.....	137

Liste des tableaux

Tableau 1 - Efficacité lumineuse des différents types de lampes	11
Tableau 2 - Spécifications mécaniques de la puce de CREE [36]	30
Tableau 3 - Propriétés physiques des matériaux utilisés pour la simulation	33
Tableau 4 - Résumé des différentes couches	38
Tableau 5 - Résumé de la caractérisation thermique de l'encapsulant	54
Tableau 6- Résumé du modèle pour THLAB1 à 40%.....	56
Tableau 7 - Résumé des conductivités thermiques	58
Tableau 8 - Résultats des mesures de flux pour une puce nue	61
Tableau 9 - Résultats des mesures de flux pour une LED avec luminophore.....	63
Tableau 10 - Longueur d'onde pour laquelle la luminance est maximale.....	68
Tableau 11 - Résumé des cartographies de luminance énergétique [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$] de la puce bleue.....	71
Tableau 12 - Résumé des cartographies de luminance énergétique [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$] de la puce avec luminophore	75
Tableau 13 - Mesure de la température de jonction d'une puce nue	86
Tableau 14 – Résultats de la régression linéaire, calcul des pertes thermiques et de la résistance thermique	87
Tableau 15 - Description de la loi des nœuds et de la loi des mailles	93
Tableau 16 - Résultats d'intensité du courant et de tension dans chaque branche	94
Tableau 17 - Relations polynomiales entre Q_b et P_{elec}	101
Tableau 18 - Calcul de la chaleur totale générée, en watt, dans le luminophore.....	106
Tableau 19 - Vérification de la conservation de l'énergie	111
Tableau 20 – Calcul de la température de jonction T_{jw}	113
Tableau 21- Résumé des thermographies infrarouges de la température de surface de la puce avec luminophore	116
Tableau 22- Résumé des températures de jonction de la puce avec luminophore – Température uniforme	117
Tableau 23 - Comparaison des cartographies et des profils de températures, de luminance énergétique et de luminance	120
Tableau 24 - Différentes méthodes de la fonction <i>imfuse</i>	139

Liste des figures

Figure 1 - Diagramme de chromaticité - Résultats pour une LED émettant de la lumière bleue	4
Figure 2 - Fonctions colorimétriques en fonction des longueurs d'onde.....	5
Figure 3 - Courbes des fonctions des sensibilités visuelles	7
Figure 4 - Schéma de la structure générique d'une LED émettant de la lumière blanche avec une puce bleue et un luminophore jaune	14
Figure 5 - Principe de semi-conducteur p-n.....	14
Figure 6 - Caractéristiques électriques courant-tension d'une jonction p-n.....	15
Figure 7 - Spectre lumineux d'une LED RGB	18
Figure 8 - Spectre lumineux d'une puce bleue avec luminophore	18
Figure 9 - Structure d'une LED utilisant la méthode PRS.....	19
Figure 10 - Diagramme de Jablonski	20
Figure 11 - Schéma énergétique des processus d'émission pour un atome isolé.....	21
Figure 12 - Illustration du déplacement de Stokes	22
Figure 13 - Illustrations des différentes mises en œuvre de luminophores. (a) Forme convexe. (b) Revêtement enrobant. (c) Forme concave. (d) Revêtement déporté.	23
Figure 14 - Résumé des phénomènes thermiques et optiques au sein de la puce	27
Figure 15 - Géométrie et dimensions de puce de CREE.....	31
Figure 16 - Schéma des dimensions d'une LED XP-E de CREE	31
Figure 17 - Schéma du PCB modélisé.....	33
Figure 18 - Température de surface du PCB modélisé [°C]	34
Figure 19 - Schéma du PCB commandé	34
Figure 20 - Illustration du PCB commandé avec une LED et une NTC.....	35
Figure 21 - Position de la coupe pour l'analyse au MEB.....	35
Figure 22 - Image de la puce bleue entière	36
Figure 23 - Zoom de la partie à étudier	37
Figure 24 - Visualisation des différentes couches analysées.....	37
Figure 25 - Composition atomique de la couche 1	38
Figure 26 - Structure de la couche 2	39
Figure 27 - Structure de la couche 3	39
Figure 28 - Comparaison entre les compositions de la couche 4 et de la couche 5	40
Figure 29 - Composition chimique de la couche 7.....	40
Figure 30 - Comparaison entre une puce avec luminophore et une puce nue	41
Figure 31 - Détails de la couche de luminophore	41
Figure 32 - Vue en coupe de la LED - image obtenue à l'IMCB.....	43
Figure 33 - Répartition des particules dans la couche de luminophore	43
Figure 34 - Schéma de principe de la granulométrie à diffraction laser	45
Figure 35 - Diamètre des particules en μm	46
Figure 36 - Schéma explicatif du fonctionnement d'un luminophore.....	47
Figure 37 - Réponses spectrales à trois excitations pour trois luminophores	48
Figure 38 - Evolution du maximum de la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde d'excitation	49
Figure 39 - Spectres d'excitation de trois luminophores pour trois émissions	50
Figure 40 - Schéma du dispositif de la méthode de la pastille	51

Figure 41 - Modélisation de la méthode de la pastille chaude	52
Figure 42 - Evolution des sensibilités en fonction du temps	53
Figure 43 - Courbe de la hausse de la température en fonction du temps : données expérimentales et données estimées	54
Figure 44- Distributions obtenues a posteriori des différents paramètres.....	55
Figure 45 – Evolution de la chaine de Markov : (a) Conductivité thermique, (b) Chaleur volumique, (c) Résistance de contact	55
Figure 46 - Ecart résiduel entre le modèle et l'expérience.....	56
Figure 47 – Evolution des chaines de Markov : (a) Conductivité thermique, (b) Chaleur volumique, (c) Résistance de contact, (d) Capacité de la sonde	57
Figure 48 - Ecart résiduel entre le modèle et l'expérience.....	57
Figure 49 – Schéma de mesure du flux global lumineux	60
Figure 50 - Banc pour la mesure de flux lumineux	61
Figure 51 - Caractérisation électrique d'une puce nue pour différents T_{PAD}	62
Figure 52 - Acquisition du spectre en un point de la surface lumineuse par la fibre	64
Figure 53 - Vue rapprochée du banc de cartographie de luminance énergétique spectrale	64
Figure 54 - Interface créée sous LabVIEW	65
Figure 55 - Schéma explicatif	66
Figure 56 – (a) Schéma d'une puce nue – (b) Luminance [cd/m^2] de la puce nue BLU04 alimentée à 350mA.....	67
Figure 57 - Evolution de la luminance [cd/m^2] en fonction du courant d'alimentation [mA] de la LED	67
Figure 58 - Luminance énergétique spectrale [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$] à 200 mA	68
Figure 59 - Courbe de luminance énergétique spectrale moyenne à plusieurs courants et températures – Zoom entre 450 nm et 495 nm	69
Figure 60 - Comparaison de deux zones de la cartographie de puce nue alimentée à 350 mA et avec $T_{PAD}=55^\circ\text{C}$	70
Figure 61 - Influence sur l'écart entre les deux zones étudiées [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$]	72
Figure 62 - Luminance de la puce blanche alimentée à 700 mA	73
Figure 63 - Influence du courant sur la luminance [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$].....	73
Figure 64 - Luminance énergétique moyenne [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] à différents courants pour une puce avec luminophore	73
Figure 65 - Comparaison des luminances énergétiques spectrales [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$] à 25 °C	73
Figure 66 - Ecart de luminance [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] en fonction du courant d'alimentation [mA].....	74
Figure 67 - Résumé des phénomènes thermiques et optiques au sein de la puce	76
Figure 68 - Chaine radiométrique	79
Figure 69 - Cliché infrarouge d'une puce nue [unité : Digital Level]	81
Figure 70 - Cartographie d'émissivité pour une puce nue avec $T_2= 40^\circ\text{C}$ (a) et 79°C (b)	82
Figure 71 – Emissivité constante calculée sur la partie centrale de la puce avec la température T_2	82
Figure 72 - Distribution de la température d'une puce nue éteinte [$^\circ\text{C}$]	83
Figure 73 - Distribution de la température [$^\circ\text{C}$] d'une puce nue alimentée par 3.65W et qui génère 2,6W de chaleur.....	83
Figure 74 - Cartographie de la résistance thermique $R_{th\ j-pad}$ [K/W].....	89
Figure 75 - Rendement de la puce bleue en fonction T_j-T_{PAD}	90

Figure 76 - Schéma de la puce avec la description du maillage	92
Figure 77 - Schéma électrique du maillage de la puce	93
Figure 78 - Représentation d'une branche du schéma électrique du modèle 2	94
Figure 79 - Schéma de la répartition des diodes et des résistances.....	95
Figure 80 – Schéma de la répartition des intensités dans les résistances – Modèle niveau 2	95
Figure 81 - Schéma de la répartition des intensités dans les diodes – Modèle niveau 2..	95
Figure 82 - Evolution de l'intensité dans la branche A-E, pour les résistances (a) et les diodes (b) –Modèle niveau 2	96
Figure 83 - Description du maillage électrique du niveau 3	97
Figure 84 - Passage du maillage à la cartographie des intensités des diodes	97
Figure 85 - Evolution de la densité de courant.....	98
Figure 86 - Analogie électrique des phénomènes thermiques dans une puce bleue	99
Figure 87 – Rendement en fonction de P_{elec}	100
Figure 88 - Rendement de la puce nue en fonction T_j-T_{PAD}	100
Figure 89 - Rendement de la puce nue en fonction T_j	100
Figure 90 - Evolution de la chaleur dissipée dans la puce en fonction de la puissance électrique injectée	101
Figure 91 - Analogie électrique des phénomènes thermiques au niveau d'une puce avec luminophore	102
Figure 92 - Résumé des phénomènes thermiques et optiques au sein de la puce.....	102
Figure 93 - Fonctions de diffusion suivant la profondeur z dans l'épaisseur du luminophore	104
Figure 94 - Variation des intensités lumineuses normalisées bleues et blanches avec la profondeur z	105
Figure 95 – Normalisation de la chaleur générée dans le luminophore	106
Figure 96 - Analogie électrique des phénomènes thermiques au niveau d'une puce avec luminophore	107
Figure 97 – Coefficients de sensibilité réduits de T_{jw} aux paramètres $R_{th\ j-PAD}$, Qb , $Qb \rightarrow w$, T_w et η_{QE}	110
Figure 98 - Evolution du poids de $Qb \rightarrow w$ en fonction de P_{elec}	111
Figure 99 - Evolution des chaleurs Q_b et Q_w en fonction de P_{elec}	112
Figure 100 - Schéma de la répartition de la température dans une puce, $T_{PAD} = 25^\circ C$...	113
Figure 101 - Influence de $T_{jw}- T_{PAD}$ sur le rendement	114
Figure 102 - Température d'une puce avec luminophore, $T_{PAD}=25^\circ C$ et $P_{elec}=3,84W$:...	115
Figure 103 - Φ_a Flux [W] correspondant aux pertes thermiques dues à l'environnement	116
Figure 104 - Cartographies de température de surface et de luminance énergétique ..	119
Figure 105 - Sensibilité de la luminance énergétique à la température de surface	119
Figure 106 - Cartographie de la température de surface [$^\circ C$] (a) et cartographie de luminance énergétique [$W/m^2.sr$] (b)	121
Figure 107 - Luminance énergétique en fonction de la température de surface pour la partie centrale de la puce (a), pour la zone B (b) et la zone C (c).....	122
Figure 108 - Luminance énergétique en fonction de la température de surface à différents courants de la partie centrale d'une puce	123
Figure 109 – Luminance énergétique en fonction de ΔT pour le point A	124

Figure 110 - Mécanismes de luminescence par rapport aux effets thermiques, décrits par Chun Che Lin et Ru-Shi Liu : (a) Normal, (b) extinction thermique, (c) ionisation thermique, (d) dégradation thermique [75].....	130
Figure 111 - Images résultant de la fonction <i>imfuse</i> avec la méthode <i>montage</i>	139

Liste des symboles

Symboles grecs

σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5,67.10^{-8} \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
$\dot{Q}_{b \rightarrow w}$	Chaleur due à la photo-conversion dans le luminophore	$[\text{W}]$
$\dot{Q}_b$	Chaleur créée au niveau de la jonction	$[\text{W}]$
η_{power}	Rendement d'une LED	
ε	Emissivité	
η_{con}	Rendement de la conversion énergétique du luminophore	
η_{QE}	Rendement quantique du luminophore	
λ_{em}	Longueur d'onde d'émission	$[\text{nm}]$
λ_{ex}	Longueur d'onde d'excitation	$[\text{nm}]$
λ_{max}	Longueur d'onde où le flux atteint son maximum	$[\text{nm}]$
ρ	Masse volumique	$[\text{kg.m}^{-3}]$
Φ_a	Pertes dues à l'environnement	$[\text{W}]$
Φ_{opt}	Flux optique visible	$[\text{W}]$
Φ_{pad}	Flux conductif entre la jonction et le PAD	$[\text{W}]$
ΔT	Différence de température entre la jonction et le PAD	$[\text{°C}]$
γ	Coefficient de réflexion	

Lettres latines

a	Coefficient d'absorption du luminophore	$[\text{mm}^{-1}]$
C_p	Chaleur spécifique	$[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
C_s	Capacité d'une sonde	
d	Diffusivité thermique	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
H	Coefficient de transfert thermique	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
I	Courant	$[\text{A}]$
k	Conductivité thermique	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
LED	Light Emitting diode	
MEB	Microscope à balayage électronique	
PCB	Printed Circuit Board	
P_{elec}	Puissance électrique	$[\text{W}]$
R_c	Résistance de contact	$[\text{K.W}^{-1}]$
R_{th}	Résistance thermique	$[\text{K.W}^{-1}]$
s	Coefficient de diffusion du luminophore	$[\text{mm}^{-1}]$
T_j	Température de jonction	$[\text{°C}]$
T_w	Température de surface	$[\text{°C}]$

Présentation des équipes de travail

Le travail présenté, dans ce manuscrit, s'est déroulé à l'occasion d'une thèse CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) dans le cadre d'un partenariat entre la société LED Engineering Development et le laboratoire RAPSODEE.



La société *Led Engineering Development* (L.E.D.) est un bureau d'étude spécialisé dans les LEDs de puissance, avec un effectif entre six et neuf salariés, basée au début de la thèse près de Toulouse, et depuis 2014 à Montauban. Elle a pour vocation première d'aider ses clients dans le choix et la mise en œuvre de ces composants d'une part et d'autre part de réaliser des prestations de contrôle métrologique optique (bancs de tests optiques, spectromètres, goniomètres, sphères intégrantes), thermique (caméra infrarouge) et électrique. Outre cette activité industrielle, la société s'inscrit depuis 2010 dans des travaux de R&D, et fait partie de programmes nationaux et internationaux de recherches. Dans le cadre du développement de son activité R&D, notamment en ce qui concerne la caractérisation des performances des LEDs et leurs possibles améliorations, L.E.D. a identifié des possibles corrélations entre les luminances des semi-conducteurs, leurs états de surface et leur état thermique de surface. Dans ce cadre, L.E.D. est intéressée pour investiguer ces possibles corrélations.



L'équipe « Thermique et Efficacité Energétique » du centre RAPSODEE de l'Ecole des Mines d'Albi mène depuis de nombreuses années des activités de recherche sur la caractérisation thermique des matériaux et des procédés, la mesure de paramètres de transfert, la thermographie infrarouge, et les méthodes inverses. Les travaux en cours portent notamment sur le développement de méthodes pour la cartographie de diffusivité thermique et de termes sources localisés, y compris aux petites échelles.

Introduction

L'accès à la lumière au plus grand nombre est un enjeu mondial car la lumière apporte des solutions, avec une démarche de développement durable, dans différents secteurs : énergie, éducation, agriculture et santé. C'est pourquoi l'Organisation des Nations Unies (ONU) consacre l'année 2015, comme l'année de la lumière. Pendant cette année, l'ONU veut ainsi sensibiliser le grand public aux enjeux de la lumière, expliquer son fonctionnement aux jeunes publiques, montrer de nouvelles formes d'expression du milieu artistique, interpeller les industriels sur les nouvelles techniques et les retombées industrielles.

En 2014, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura ont été récompensés par un prix Nobel de physique pour leur invention de diodes électroluminescentes (LED) émettant avec efficacité de la lumière bleue dans les années 1990. La création d'une LED bleue a ouvert la voie aux LED émettant de la lumière blanche. Le jury qui les a récompensés a aussi souligné l'importance des LEDs dans l'économie d'énergie, et aussi dans l'accès à l'éclairage des pays en développement, notamment grâce à la combinaison des LEDs avec des panneaux photovoltaïques.

Le développement des semi-conducteurs à nitrure de gallium et d'indium, dans les années 1990, a permis de créer des diodes électroluminescentes de puissance émettant de la lumière bleue. Cette nouvelle technologie s'est rapidement imposée depuis une quinzaine d'années dans le milieu de l'éclairage. En effet elle permet un meilleur rendement lumineux qui peut atteindre les 200 lumens par watt (lm/W), contre respectivement 70 lm/W et 16 lm/W pour les tubes fluorescents (néons) et les ampoules à incandescence. Les économies d'énergie et de maintenance ont favorisé une diffusion rapide par le remplacement de dispositifs traditionnels, et pour l'éclairage domestique, industriel, urbain.

D'autres avantages ont permis aux LEDs de s'imposer. Grâce à cette technologie, l'éclairage peut être repensé en termes de colorimétrie (lumière chaude et lumière froide), de puissance d'éclairage, et aussi de répartition de la lumière (réduction de la pollution lumineuse). L'éclairage peut devenir plus intelligent et plus dynamique grâce au pilotage simplifié de la puissance et de la couleur des LEDs.

Cependant, certains fabricants et fournisseurs ont profité de l'arrivée rapide des LEDs sur le marché dans les années 2000, pour annoncer des « fausses vérités » sur les performances des LEDs : durée de vie de 100 000 h, efficacité record, pas de chaleur dégagée ...

Mais qu'en est-il des performances réelles ? Selon le rendement des différents modèles de LED, seulement de 15 à 25 % de l'énergie électrique fournie est transformée en lumière visible, le reste étant dissipé sous forme de chaleur. Il en résulte une augmentation de température de jonction des semi-conducteurs.

La température ambiante et la température de jonction semblent avoir un fort impact sur la durée de vie et les performances des LEDs. L'étude de la répartition de la chaleur au sein d'une LED permettrait de connaître l'influence de celle-ci sur les performances des différents composants de la LED : la puce et le luminophore. De plus, trouver un lien entre le flux

optique ou la luminance et la température au niveau local permettrait d'avancer scientifiquement vers la détection de défauts de la puce.

Toutefois, les méthodes de mesures, thermique et optique, sont soit mal adaptées à la technologie des LED, soit trop intrusives. Dans ce contexte, l'évaluation des performances est cruciale, et le développement de bancs d'essais spécifiques et de méthodes de caractérisation adaptées devient un impératif.

Dans le cadre de cette thèse, une démarche a été développée pour caractériser les LEDs thermiquement et optiquement par des méthodes locales non intrusives.

Dans un premier temps, le but est de trouver les matériaux et leurs caractéristiques composant la LED : la jonction, le luminophore, l'encapsulant et les fils conducteurs électriques. Ensuite, sous différentes conditions thermiques et électriques, les performances optiques sont déterminées de manière globale et locale. Des mesures locales de température de surface sont couplées aux performances optiques.

En parallèle de cette caractérisation, une étude a été menée sur l'influence du luminophore sur les performances des LEDs.

Enfin, une modélisation décrit les phénomènes thermiques et optiques pour une puce nue, ensuite ce modèle évolue pour décrire les phénomènes pour une puce avec luminophore.

Chapitre 1 - Diodes électroluminescentes

Dans ce chapitre, une première partie est dédiée à la lumière blanche : la description de la lumière et l'obtention de la lumière blanche, avec ces grandeurs spécifiques. La lumière peut se décrire physiquement par différentes propriétés : flux, intensité, éclairement ou efficacité lumineuse.

Le marché des LEDs de puissance est en perpétuelle croissance depuis une vingtaine d'années. Le marché de l'éclairage évolue car les besoins ont changé : nous souhaitons, par exemple, aujourd'hui réduire la consommation électrique, ou avoir des éclairages plus flexibles (couleur, cycle d'allumage, encombrement, ...). Les LEDs de puissance permettent d'apporter des solutions où les autres éclairages font défauts. Dans cette partie, le marché des LEDs est analysé : des différents enjeux, aux évolutions du marché. Une étude comparative est menée entre les LEDs et les autres sources d'éclairages.

Ensuite le but de la troisième partie est d'expliquer le fonctionnement d'une LED de puissance émettant une lumière blanche. Dans un premier temps, chaque élément constituant une LED de puissance sera décrit : puce, substrat, le PAD et l'optique primaire. Puis les différentes méthodes d'obtenir de la lumière blanche avec des LEDs seront comparées : plusieurs puces, une puce avec un ou des luminophores, ou la méthode PRS-LED.

D'autre part, le luminophore a un rôle optique important et un rôle thermique non négligeable. Après avoir été excité par la lumière émise de la puce, il réémet de la lumière dans une longueur d'onde supérieure. L'efficacité de ce processus dépend de nombreux paramètres, comme la mise en œuvre du luminophore ou le type de luminophore utilisé.

Enfin, nous étudions la caractérisation thermique des LEDs : le lien entre la température et la luminance des LEDs, l'utilisation de la thermographie infrarouge pour distinguer la distribution des températures. La température de jonction du semi-conducteur apparaît comme une grandeur critique des LEDs, qui influence, notamment, la durée de vie et l'efficacité des LEDs.

1 Généralités sur la lumière blanche et les grandeurs associées

1.1 La lumière blanche

1.1.1 Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière est une partie étroite du rayonnement électromagnétique qui peut se propager dans le vide à une célérité c de 300 000 km/s. Ce rayonnement est caractérisé par sa longueur d'onde λ .

La relation entre l'énergie d'un photon et sa longueur d'onde est donnée par la formule suivante :

$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, donc $\lambda = \frac{hc}{E}$ où E représente l'énergie du photon, h la constante de Planck, ν la fréquence, c la vitesse (célérité) de la lumière dans le vide et λ la longueur d'onde du rayonnement. L'énergie d'un photon est donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Par conséquent, une source lumineuse dans l'ultraviolet (petites longueurs d'ondes) est beaucoup plus énergétique qu'une source lumineuse dans le rouge (grandes longueurs d'ondes).

La lumière visible représente une infime partie du spectre des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde comprise entre 380 nm (violet) et 780 nm (rouge).

Pour obtenir de la **lumière blanche**, il existe plusieurs combinaisons possibles, visibles sur un diagramme de chromaticité. Ainsi en combinant du bleu, du rouge et du vert, ou du bleu et du jaune, il est possible d'obtenir une lumière blanche, l'œil faisant une synthèse additive des couleurs. Sur le diagramme de chromaticité du système colorimétrique CIE¹ 1931, les couleurs monochromatiques sont représentées sur les bords, la lumière blanche est localisée au centre. Entre le centre et les bords se trouvent toutes les couleurs intermédiaires visibles par l'œil humain. Chaque point du diagramme peut être représenté par des coordonnées x et y (exemple de diagramme Figure 1).

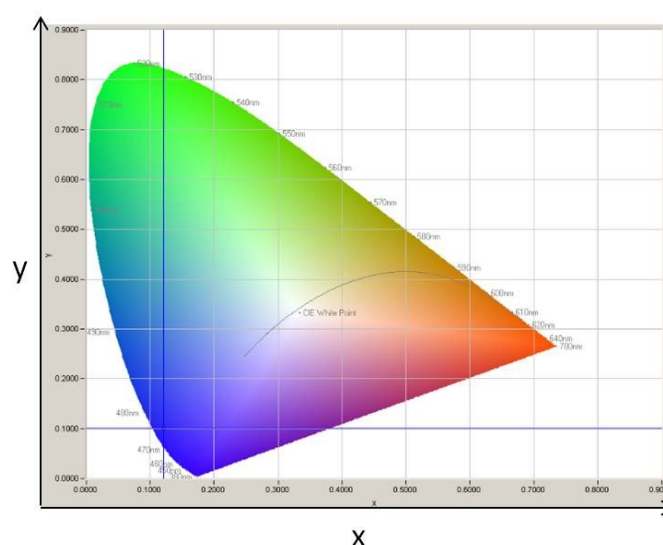


Figure 1 - Diagramme de chromaticité - Résultats pour une LED émettant de la lumière bleue

¹ CIE : Commission international de l'éclairage.

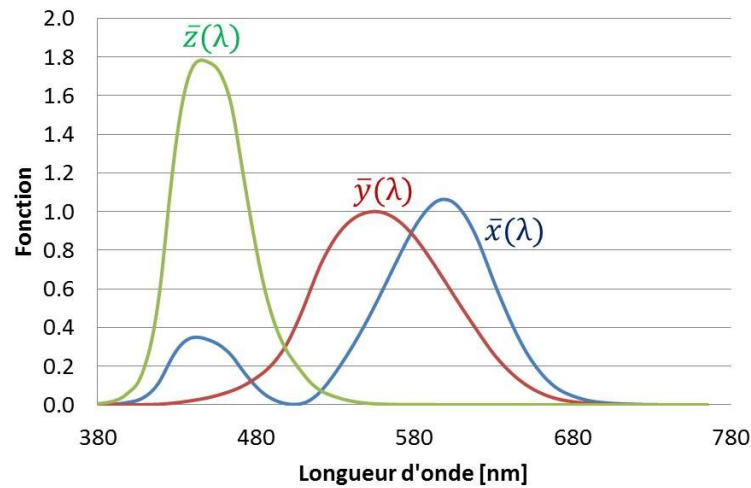


Figure 2 - Fonctions colorimétriques en fonction des longueurs d'onde

Les valeurs des couleurs (X, Y, Z) sont les valeurs des fonctions obtenues en intégrant la distribution de l'énergie spectrale avec les fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ (Figure 2), suivant les équations :

Eq. 1

$$X = \int \bar{x}(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int \bar{y}(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int \bar{z}(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

Les relations entre les coordonnées chromatiques et les valeurs des couleurs sont :

Eq. 2

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = 1 - x - y = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

1.1.2 La température de couleur

La température de couleur d'une source lumineuse est la température à laquelle un corps noir doit être chauffé pour obtenir une émission de la même couleur. Elle s'exprime en kelvin (K). Plus la température de couleur sera faible, plus le blanc sera dit chaud (inférieur à 3500 K) et tendra vers le jaune. Au contraire, plus la température sera élevée, plus le blanc sera dit froid (supérieur à 4500 K) et tendra vers le bleu. Le blanc

chaud est utilisé pour des ambiances confortables et feutrées, alors que le blanc froid est utilisé pour des zones de travail.

La température de couleur T_{cp} peut être approximée grâce aux coordonnées chromatiques (x,y) grâce aux équations suivantes :

$$n = \frac{x-0.332}{y-0.1858} \quad \text{Eq. 3}$$

$$T_{cp} = 5520,33 - 6823,3 \times n + 3525 \times n^2 - 449 \times n^3 \quad \text{Eq. 4}$$

1.1.3 Indice de rendu de couleur

L'indice de rendu des couleurs (IRC) est une mesure donnant la capacité qu'une source lumineuse a de rendre 14 couleurs standards illuminées par cette source en comparaison avec une source lumineuse de référence comme le soleil (ou corps noir) ou une autre source lumineuse dont l'IRC est pris égal à 100 (IRC compris entre 0 et 100). Les huit premières couleurs, non saturées, (R1 à R8) sont utilisées pour calculer l'IRC général et les 6 couleurs saturées restantes (R9 à R14) fournissent des informations supplémentaires sur les propriétés de rendu chromatique de la source lumineuse.

La source de lumière artificielle, qui donne le meilleur indice de rendu des couleurs, est la lampe à halogène (IRC = 100).

1.2 Propriétés de la lumière

1.2.1 Flux lumineux et flux énergétique

L'énergie des radiations par unité de temps est exprimée comme le flux énergétique F_e , en watt. La fonction de la distribution de l'énergie spectrale $S(\lambda)$ est utilisée pour décrire la distribution de la lumière en fonction de la longueur d'onde :

$$F_e = \int_0^{+\infty} S(\lambda) d\lambda \quad \text{Eq. 5}$$

L'œil humain est plus sensible, de jour, à la couleur jaune qui est émise autour de 555 nm. Le flux lumineux est introduit pour décrire le flux énergétique tel que le perçoit l'œil humain. L'unité est le lumen. Le flux lumineux d'une lumière jaune émise à 555 nm est égal à 683 lm, quand le flux énergétique est égal à 1 W. Le flux lumineux des autres longueurs d'onde est inférieur à 683 lm, quand le flux énergétique est de 1 W. Suivant les conditions environnementales, l'œil humain a des sensibilités différentes : une vision photopique (de jour) et une vision scotopique (de nuit). La fonction $V(\lambda)$ représente la fonction de la vision photopique et la fonction $V'(\lambda)$ la vision scotopique (Figure 3).

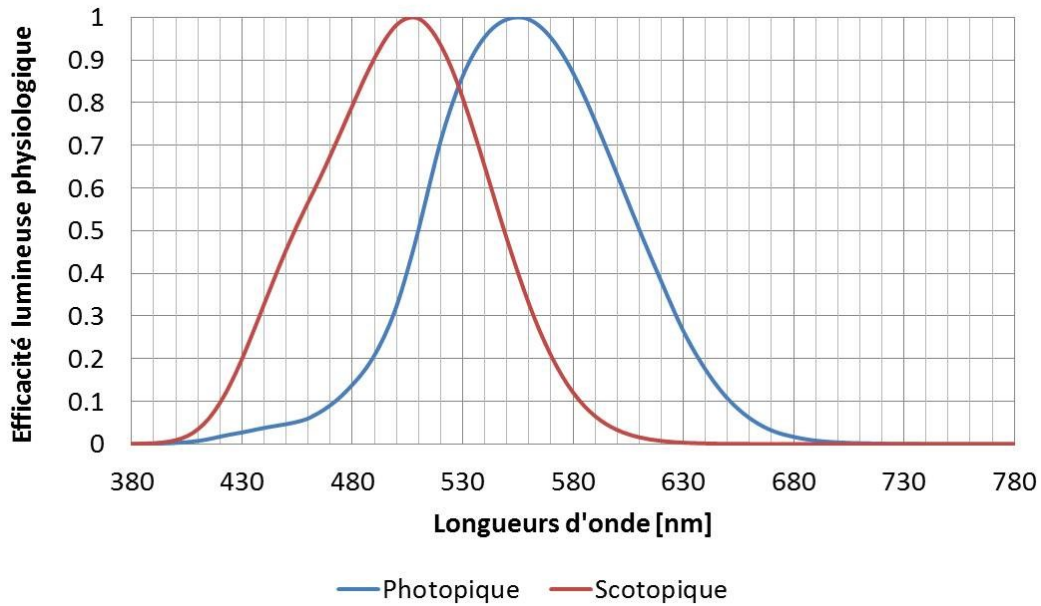


Figure 3 - Courbes des fonctions des sensibilités visuelles

Le flux lumineux peut s'exprimer avec l'équation suivante :

$$F_o = 683 \times \int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad \text{Eq. 6}$$

1.2.2 Efficacité lumineuse

L'efficacité lumineuse (**Lumens/Watt**) définit la capacité d'un éclairage à produire un flux lumineux à partir d'un watt de flux énergétique. Il est donc plus facile d'avoir des hautes efficacités lumineuses dans le vert-jaune, longueur d'onde à laquelle l'être humain est le plus sensible, comme expliqué précédemment.

L'efficacité lumineuse peut être calculée grâce à l'équation suivante :

$$k = \frac{F_o}{F_e} = 683 \times \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{+\infty} S(\lambda) d\lambda} \quad \text{Eq. 7}$$

L'efficacité lumineuse est importante pour les LEDs émettant de la lumière blanche (60-120 lm/W) car le spectre émis d'une LED se situe dans la partie visible. Les lampes à incandescence émettent un flux en grande partie dans l'infrarouge (non-visible pour l'œil humain), ce qui conduit à une efficacité lumineuse faible (25 lm/W).

1.2.3 Intensité lumineuse, Eclairement et Luminance

Le **candela** (cd) est l'**intensité lumineuse**, ou en anglais *luminous intensity*, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540,1012 Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est précisément 1/683 watt par stéradian.

Le flux lumineux F_o , exprimé en lumen, d'une source lumineuse est égal à l'intensité I en candela multipliée par l'angle solide d , exprimé en **stéradian** (sr), par lequel la lumière est émise, en tenant compte de la variation de l'intensité dans les différentes directions : $F_o = I \times d$. L'intensité énergétique s'exprime en watt par stéradian.

Dans le monde de l'éclairage, on entend aussi parler de **lux** (lx). Cela correspond à un **éclairement E** lumineux, ou en anglais *illuminance*. Un éclairement de 1 lx est égal à un flux lumineux 1 lm éclairant une surface de 1m² : 1 lx= 1 lm / 1 m². Quand une lumière émise par une source lumineuse brille sur une surface, l'énergie optique est transférée à la surface de l'objet. L'éclairement permet de montrer la distribution d'énergie sur la surface de l'objet. Voici des exemples d'éclairement [1]:

- Pleine lune : 0,5 lx ;
- L'éclairage piéton : 10-30 lx ;
- L'éclairage de bureau : 100-1000 lx.

L'unité de l'éclairement énergétique est watt par mètre carré.

La **luminance L** , en cd/m², correspond au ratio de l'intensité lumineuse I dans une direction donnée sur l'aire projetée. La luminance énergétique s'exprime en watt par mètre carré et par stéradian.

2 Marché global des LEDs de puissance

2.1 Les différents enjeux

Enjeux environnementaux

L'énergie coûte de plus en plus cher et l'optimisation de l'énergie va permettre de réduire cette consommation et de préserver notre environnement. Adapter l'éclairage aux stricts besoins humains est important afin de limiter son impact sur l'environnement.

Enjeux sociétaux

L'éclairage permet d'apporter une qualité de vie sur la santé en prévenant des troubles de santé (céphalée, ...), sur la sécurité en permettant de voir et d'être vus [2]. L'évolution de l'éclairage domestique conduit aussi à une augmentation de l'éducation de la population : les personnes ont la possibilité de se parler, de lire, de faire leurs devoirs quand la nuit tombe.

Enjeux économiques

Aujourd'hui, la maîtrise des dépenses énergétiques est l'affaire de tous : entreprises, collectivités locales et ménages. L'éclairage représente ainsi [2] :

- 35 % de la consommation d'électricité des bureaux ;
- 48 % de la consommation d'électricité des collectivités locales [2].

2.2 Marché

2.2.1 Les industries des LEDs

L'industrie des systèmes d'éclairage à semi-conducteurs, appelé en anglais *Solid State Lighting SSL*, intègre quatre technologies différentes: la technologie d'épithaxie², la

² Définition de l'épithaxie : Processus de dépôt de matériaux cristallins sur des substrats cristallins lors duquel le substrat impose au matériau en croissance une orientation cristalline [78].

fabrication et le design de puce, la technologie et le procédé de packaging, et les systèmes d'intégration et d'applications.

Industrie en amont des LEDs

Cette industrie se réfère à l'épitanie et à la fabrication de puce. Actuellement, la méthode la plus utilisée d'épitanie pour produire des LEDs est l'épitanie en phase vapeur aux organométalliques, dite *metalorganic vapor phase epitaxy* ou MOCVD [3]. La technologie d'épitanie permet d'obtenir des matériaux de substrat comme le nitrure de gallium GaN ou le carbure de silicium SiC.

La principale mission des fabricants de puce est de transformer les *wafers*³ créés par épitanie en puce avec les électrodes positives et négatives. Les étapes sont les suivantes : préparation du wafer, rendre rugueuse la surface par gravure, nano-impression de microstructure, collage du wafer sur le substrat.

Industrie centrale des LEDs

Cette industrie vise le packaging des LEDs : une seule puce ou plusieurs puces, la dissipation de la chaleur, les optiques secondaires, la préparation des luminophores et la technologie de revêtement. La variété de packaging dépend des utilisations, mais aussi de la couleur et de la forme souhaitée.

Industrie en aval des LEDs

L'industrie en aval fait référence à l'industrie qui utilise des LEDs. Les applications pour les LEDs sont nombreuses :

- Le rétroéclairage des écrans de téléviseurs, smartphones et tablettes ;
- La signalisation routière ;
- L'éclairage automobile ;
- L'éclairage décoratif ;
- L'industrie de la chimie et de la biologie.

Les industriels ne fabriquent pas tous les composants de leurs LEDs, comme la puce semi-conductrice, le substrat ou le luminophore. Les principaux fabricants de LED pour l'éclairage viennent souvent du monde du semi-conducteur. Ils intègrent dans leur composant LED leurs propres puces. D'autres fabricants sont spécialisés dans les substrats, les luminophores ou les puces semi-conductrices, mais ne s'occupent pas du composant final.

Les principaux fabricants de LEDs sont Nichia (Japon), OSRAM Opto Semiconductors (USA et Allemagne), Philips (USA), Seoul Semiconductor (Corée du Sud), CREE (USA) et LG Innotek (Corée du Sud). En France, les industriels ne fabriquent pas de composant LED, mais des produits d'éclairage à LED pour différents marchés. La grande majorité des usines de fabrication sont situées en Chine pour des raisons de coûts de production, mais les fabricants chinois ne font pas encore partis des acteurs mondiaux.

2.2.2 Les influences du marché

L'éclairage représente 12 % des consommations électriques d'un logement (hors chauffage et eau chaude) [4]. Dans le monde, l'éclairage consomme plus de 3 418 TWh

³ *Wafer* signifie tranche, galette ou plaque de semi-conducteurs.

d'énergie électrique par an en comptant les pertes dans le réseau. Cela représente 19 % de la production globale d'électricité mondiale. [5].

Le marché mondial de l'éclairage est impacté par trois principaux facteurs : la situation économique, les régulations énergétiques et le besoin de produits moins consommateurs d'énergie.

La situation économique influe directement sur les nouvelles installations de luminaires et de systèmes de contrôle d'éclairage. Cependant, le marché des lampes reste constant grâce aux remplacements des ampoules.

Ensuite, le futur marché de l'éclairage est déterminé par les régulations sur les produits d'éclairage. La Chine a décidé récemment d'interdire les ampoules incandescentes. Quant à l'Union européenne (UE), elle va bientôt étendre l'interdiction des lampes incandescentes aux lampes halogènes. De plus l'UE a décidé que les nouveaux bâtiments en 2020 devraient consommer zéro énergie. Cela conduit à choisir des équipements avec une meilleure efficacité énergétique.

Il faut aussi noter un changement au niveau mondial sur la politique de la création d'électricité, surtout depuis la catastrophe de Fukushima, au Japon en 2011. L'Allemagne, par exemple, a décidé de fermer huit de ces dix-sept centrales nucléaires, et d'obtenir une production d'énergie sans nucléaire en 2022.

2.2.3 L'évolution des marchés

Le gros segment du marché des LEDs, devrait être, en 2016, l'éclairage domestique. La baisse du prix des composants LEDs, ainsi que des ampoules et des tubes à LED, s'est accélérée en 2013 ; cela permet un retour sur investissement plus rapide. La part de marché des lampes à LED pour l'éclairage pourrait atteindre 45% en 2016 et 70% en 2020 [6]. Cette accélération de la pénétration du marché va se ralentir à moyen terme, comme cela s'est produit pour d'autres produits comme les télévisions ou les appareils photo numériques.

En outre, les systèmes de contrôle de l'éclairage prennent de l'importance dans le segment de l'éclairage domestique.

Le marché de l'éclairage automobile évolue de manière régulière : il représente 20 % du marché total des LEDs. En 2011, le marché était estimé à 14 millions d'euros ; les économistes attendent à ce qu'il atteigne 18 millions d'euros en 2020.

Sur le marché du rétroéclairage, les écrans à base d'OLEDs (*Organic Light Emitting Diode*) ont déjà pénétré le marché des smartphones car ils apportent une meilleure résolution que les écrans LCD, cependant la pénétration des TV à LED est plutôt stagnante.

Les LEDs vont s'étendre vers de nouveaux marchés, tel que les façades d'immeubles ou l'éclairage de divertissement. Les avantages des LEDs, tel que la contrôlabilité de la couleur des LEDs RGB, vont permettre d'accéder à ces nouveaux marchés.

2.3 Comparaison par rapport aux autres sources d'éclairage

2.3.1 Les sources artificielles de lumière

La production artificielle de lumière se fait de deux manières : par incandescence et par luminescence. Voici une description succincte des autres types d'éclairage que les LEDs [7] :

Lampe à incandescence, appelée aussi ampoule à filament : Créée il y a deux siècles, la lampe produit de la lumière en portant à incandescence un filament de tungstène. Le filament est alimenté par des conducteurs rigides. Tout cela est placé dans un bulbe de verre vidé de son atmosphère. Depuis le 1^{er} janvier 2013, toutes les ampoules à filament sont interdites à la vente dans l'UE, à cause de leur comportement énergivore [8].

Halogène : Elles ont été créées en 1959, par un chercheur de General Electric. Les lampes halogènes sont des lampes à incandescence dont le filament est en tungstène. L'atmosphère gazeuse de l'ampoule contient un gaz halogène. A cause de leur consommation énergétique élevée, la commission européenne va interdire la vente des ampoules halogènes, de classe énergétique C, d'ici deux ans [9].

Lampe fluocompacte LFC : Appelé aussi lampe basse consommation, les lampes fluocompactes sont des lampes fluorescentes beaucoup plus efficaces et économes en énergie que les lampes à incandescence classique ou halogène. Elles sont apparues dans les années 1980. Un arc électrique est créé qui ionise le gaz contenu dans le tube (constitué de mercure et de gaz neutre). Les atomes de mercures excités par l'ionisation émettent une lumière de courte longueur d'onde (lumière ultraviolet UV). Cette lumière excite les particules de phosphores déposés à la surface interne du verre, lesquelles émettent de la lumière blanche. Les nouvelles générations de LFC ont fait des progrès sur le temps de chauffage à l'allumage, et sur le prix de vente par rapport au début de leur commercialisation.

2.3.2 Les points forts des LEDs

Les LEDs présentent des avantages par rapport aux autres types d'éclairages, ce qui a permis d'augmenter leurs parts de marché ces dernières années.

- **L'efficacité lumineuse**

Les LEDs ont une meilleure efficacité lumineuse que les autres éclairages (Tableau 1). En avril 2012, la société américaine CREE a annoncé avoir obtenu une efficacité lumineuse de 254 lm/W, avec un courant d'alimentation de 350 mA. Même si cette efficacité a été obtenue en laboratoire, des LEDs avec cette qualité arriveront sur le marché dans quelques années. Par contre une lampe à LED a un rendement inférieur, compris entre 40 et 80 lumens par watt. Cette baisse de rendement est notamment liée à la chaleur générée par les LEDs dans la lampe. Le tableau suivant nous montre que pour une même consommation électrique, nous avons plus de lumière avec une lampe à LED.

Tableau 1 - Efficacité lumineuse des différents types de lampes

Lampe incandescence	Halogène haute efficacité	Lampe fluocompacte	Lampe à LED
9 à 15 lm/W	15 à 27 lm/W	50 à 70 lm/W	40 à 80 lm/W

- **Durée de vie plus longue**

La durée de vie correspond à la durée pendant laquelle l'efficacité lumineuse coïncide à celle du début à 5 % près. Les lampes à LED ont une durée de vie d'environ 30 000 h contre 2 000 h pour les lampes halogènes et 8 000 h pour les lampes fluocompactes. Au début du lancement commercial des ampoules à LEDs, les fabricants ont annoncé des durées de vie supérieures à 50 000 h, ces annonces fausses ont nui à l'image des LEDs.

- Les lampes émettent **moins de rayonnement infrarouge** par rapport aux lampes incandescentes et aux lampes fluocompactes. Le rayonnement infrarouge, émis par une LED, n'est dû qu'à sa chaleur.
- **Respectueuses de l'environnement**, les LEDs n'utilisent pas de mercure contrairement aux lampes fluocompactes. [10]
- Un des principaux avantages des LEDs est la **fine taille du packaging** : la taille d'une LED est d'environ 9 mm². Elles sont plus compactes que les autres sources d'éclairage. Elles permettent d'effectuer des systèmes d'éclairage très fins ou encore peu profonds, de type bandelette (*strip* en anglais). Cette nouvelle façon d'éclairer est très prisée par les architectes.
- Les LEDs permettent des **cycles d'allumage et d'extinction fréquents**. Elles émettent le flux lumineux sans montée en régime, ce qui n'est le cas pour des lampes halogènes ou fluocompactes.

2.3.3 Les points faibles des LEDs

Ci-dessous, une liste non-exhaustive des points faibles des LEDs :

- Les puces des LEDs sont **sensibles aux dommages** dues aux **décharges électrostatiques** (en anglais *electrostatic discharge ESD*). Les LEDs doivent être fabriqués et assemblés dans un environnement protégé contre les ESD.
- Le **cout d'achat** d'une lampe à LED reste élevé, entre 15 et 25 euros. Cependant, les progrès techniques et le développement des ventes vont permettre de baisser les prix.
- Des progrès à faire sur le bilan **environnemental** des LEDs.

Suivant l'Agence internationale de l'énergie, l'impact environnemental des LEDs pourrait être amélioré afin d'avoir une réduction des impacts environnementaux de 85 % par rapport aux lampes à incandescence [4]. De plus les LEDs sont fabriqués avec certains matériaux, tel que le gallium, l'indium ou des terres-rares qui ne se recyclent pas et qui sont considérés comme critiques car en quantité limitée. De plus, les terres-rares sont produits à 95 % par la Chine [11]. Des risques de spéculations sont à craindre dans la prochaine décennie. L'enjeu future sera d'optimiser la quantité de matériaux utilisés dès la conception jusqu'au recyclage. La société ALEDIA travaille déjà sur la création de LEDs

à base d'une technologie 3D de micro-fils GaN sur silicium, qui permet de réduire les matières premières [12].

- Des **risques sanitaires** pour certaines catégories de LED. [7] [13]

L'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire) met en garde le consommateur sur le manque d'information quant aux risques sanitaires liés à la lumière bleue émise par des éclairages à LED de couleur blanche. Ainsi l'Anses recommande d'éviter l'utilisation de sources de lumière émettant une forte lumière froide (lumière riche en couleur bleue) dans les lieux fréquentés par les enfants (maternités, crèches, écoles, etc.).

3 Fonctionnement d'une LED émettant une lumière blanche

Les premières LEDs développées émettaient de la lumière rouge. La puissance électrique de ce type de LED est généralement inférieure à 0,1 W : ce sont des LEDs basses puissances. Avec la découverte de LED émettant de la lumière bleue et le développement de luminophore utilisant la lumière bleue pour produire de la lumière blanche, la puissance des LEDs est devenue supérieure à 1 W : des LEDs de puissance sont ainsi obtenues. Le courant d'alimentation de ces LEDs est d'au moins 350 mA, même si certaines personnes préfèrent les alimenter avec des courants inférieurs à 100 mA.

3.1 Constitution générale d'une LED de puissance

Une LED est un composant électronique qui est constitué de différentes parties qui a chacun sa fonction (Figure 4) :

- La puce, composée du semi-conducteur, assure l'émission de photons lors de l'application d'un courant électrique.
- Le substrat sert de support structural au semi-conducteur lors de sa fabrication. Il a aussi un rôle de dissipateur thermique.
- Les fils d'or, de diamètre de quelques microns, permettent l'alimentation du courant.
- Le support, ou PAD, en céramique a pour fonctions principales la dissipation thermique et la protection mécanique.
- Un luminophore, après avoir été excité par la lumière émise de la puce, réémet une partie de la lumière dans une longueur d'onde supérieure (plus d'explication dans la partie 4-Luminophore, du fonctionnement au calcul du rendement).
- Une optique, de la forme d'un dôme permet de protéger la puce et les fils d'or contre les chocs, l'humidité et l'oxydation chimique. Il est constituée soit d'un encapsulant à base de silicone, d'époxy ou de verre, soit d'un mélange de résine et de luminophore.

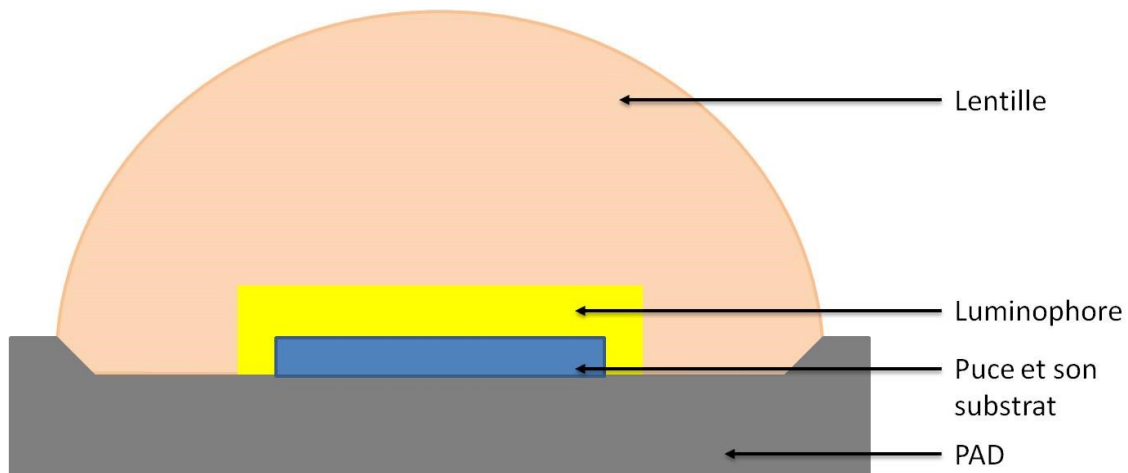


Figure 4 - Schéma de la structure générique d'une LED émettant de la lumière blanche avec une puce bleue et un luminophore jaune

3.1.1 La puce

Une puce est constituée de deux parties appelées semi-conducteur de type p (excédent d'accepteurs) et semi-conducteur de type n (excédent de donneurs). Ces deux éléments placés en contact direct forment alors une jonction p-n à l'intérieur du cristal semi-conducteur. La région n produit des porteurs mobiles chargés négativement (électrons), et la région p des porteurs mobiles chargés positivement (trous). Si la jonction p-n est faite avec le même matériau, la jonction est appelée une homo-jonction, sinon hétérojonction. La surface d'une puce est proche de 1 mm^2 et l'épaisseur de la jonction est de l'ordre nanomètre.

Quand un courant électrique est appliqué à la jonction p-n de la région p à la région n, les porteurs chargés migrent vers la zone neutre de type p pour les électrons et vers la zone neutre de type n pour les trous, où ils vont se recombiner soit de façon radiative, soit de façon non radiative (Figure 5).

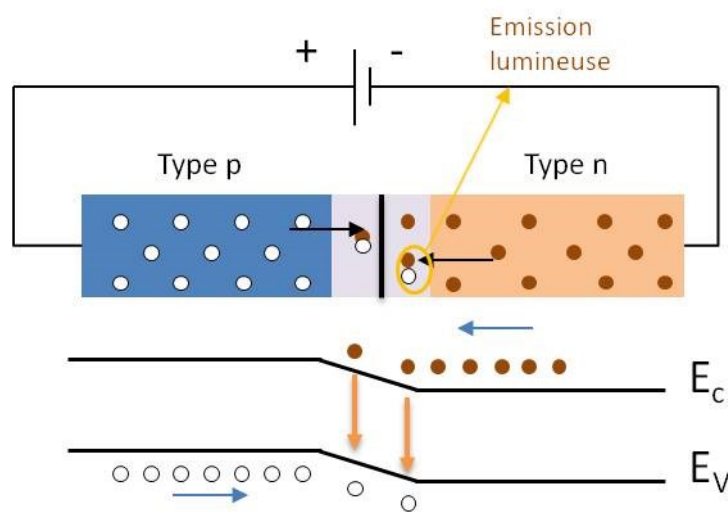


Figure 5 - Principe de semi-conducteur p-n

Les porteurs se recombinent dans la zone de charge d'espace (zone de la jonction des deux matériaux), ce qui correspond au régime dit de génération-recombinaison [14]. Un défaut présent dans cette zone peut augmenter la probabilité de recombinaisons.

Une LED a des caractéristiques électriques d'une jonction p-n. La relation entre la tension et le courant est illustrée à la Figure 6.

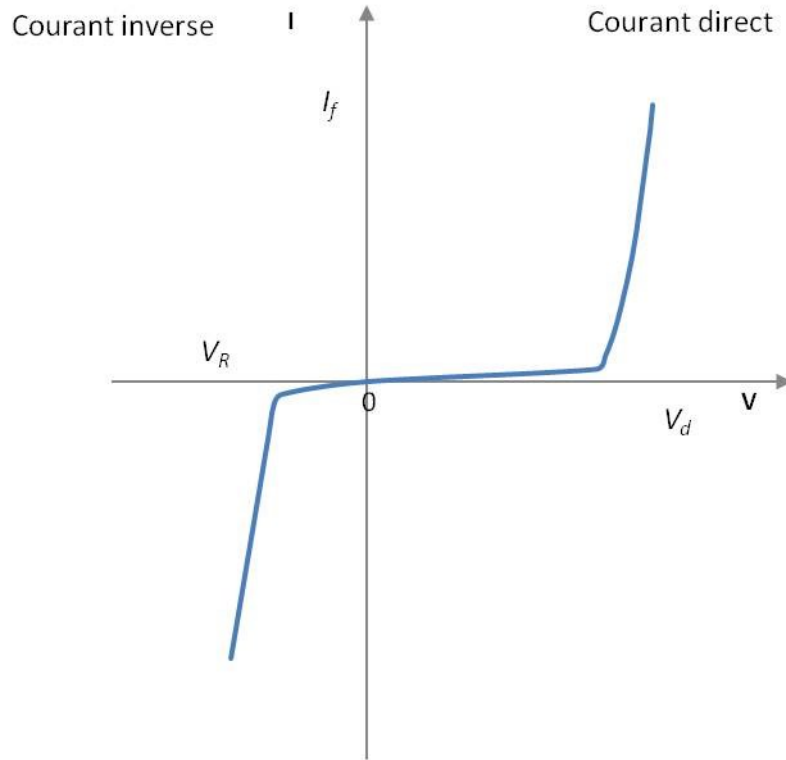


Figure 6 - Caractéristiques électriques courant-tension d'une jonction p-n

L'équation de Shockley décrit la courbe I-V pour une diode avec une jonction P-N et une aire de section transversale A [3]:

$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) (e^{eV/kT} - 1) \quad \text{Eq. 8}$$

où e , V , k , T , n_i , N_D , N_A , D_n , D_p , τ_n et τ_p représentent la charge élémentaire, la tension, la constante de Boltzmann, la température de travail, la densité des porteurs intrinsèques, la densité des porteurs de charge, la densité des porteurs en arrière, les constantes de diffusion de trous et d'électrons, les durées de vie des porteurs minoritaires d'électrons et de trous.

La différence de potentiel formée à la jonction par la présence de charges + et -, et créant une barrière de potentiel pour les électrons et les trous, est appelée tension de diffusion V_d . La tension appliquée aux bornes de la LED doit être suffisante pour compenser V_d de façon à abaisser la barrière de potentiel afin que les électrons et les trous puissent diffuser. Dans le cas de GaN, V_d est d'environ 3,2 V.

Matériaux utilisés

La longueur d'onde émise varie en fonction de la bande d'énergie interdite des matériaux utilisés. Elle peut aller de l'ultraviolet UV (en dessous de 380 nm) jusqu'à l'infrarouge IR (au-dessus de 830 nm). Ci-dessous des exemples de matériaux associés à la lumière émise :

- UV : (Al,Ga,In)N ;
- Bleu ou vert : $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, GaN, GaAs ;
- Vert-jaune : (Al,Ga,In)P, GaP ;
- Rouge : $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$;
- Infrarouge: GaInAsP.

Multi Puit Quantique

La structure à multiple puits quantiques permet d'augmenter le rendement quantique interne. Voici un exemple de la structure d'une puce InGaN/GaN [15]:

- Une couche de GaN dopée P d'épaisseur de 300 nm.
- Une structure à multiple puit quantique InGaN/GaN de 9 périodes. L'épaisseur de chaque puits InGaN est de 30 Å et celle de chaque barrière GaN est de 70 Å.
- Une couche de GaN dopée N de 3,5 µm déposée sur un substrat saphir d'épaisseur de 80 µm.

Effets de la température

Le courant et la tension sont tous les deux fonctions de la température, cela conduit à la variation de la caractéristique courant-tension en fonction de la température. Quand la température augmente, pour un courant constant, la tension V_d décroît approximativement entre 1 mV et 4 mV à chaque élévation d'un degré Celsius de la température.

Différents chercheurs supposent que le lien entre la bande d'énergie du GaN et la température s'exprime de la manière suivante [3]:

$$E_g = E_{g0} - \frac{\alpha_c T^2}{T - T_0} \quad \text{Eq. 9}$$

où E_{g0} est la bande d'énergie au zéro absolu degré Kelvin, α_c et T_0 sont des facteurs de corrections. Ces valeurs diffèrent suivant les chercheurs. Cette relation montre bien que la bande d'énergie diminue avec la température.

3.1.2 Le substrat

Le substrat constitue le socle sur lequel le semi-conducteur est fabriqué. Idéalement, le substrat doit être constitué du même matériau, ou d'un matériau avec la même structure cristalline pour éviter la création de défauts de structure lors de l'épitaxie. Ces défauts limitent les performances du semi-conducteur, notamment en termes de durée de vie.

Les matériaux les plus utilisés pour le substrat sont le saphir Al_2O_3 et la carbure de silicium SiC. La conductivité thermique du saphir est de 46 W/m.K, celle du silicium est de 156 W/m.K et celle du carbure de silicium est de 370 W/m.K. La maille du carbure de silicium est la plus proche de celle du semi-conducteur GaN. Le SiC est régulièrement

exploité pour les dispositifs optoélectroniques. Quant au silicium, il est peu coûteux et il est disponible sur de larges wafers, mais le désaccord de maille avec le GaN est important. Cependant le saphir est plus utilisé car sa qualité en termes de surface et défauts dans le matériau massif, ne cesse d'augmenter [15] et son coût est plus faible : jusqu'à 2 ou 3 fois moins cher que le carbure de silicium [16].

3.1.3 Le PAD

Avec l'invention des LEDs de puissance, les problèmes de dissipation de chaleur ont dû être pris en compte ces dernières années. La chaleur générée est dissipée à 90 % à travers la cathode de la LED vers le PCB, et puis dans l'air [3]. Si la chaleur de la puce ne peut pas être dissipée dans l'environnement, la température de la jonction de la puce risque d'augmenter rapidement. Les hautes températures peuvent mener à baisse du rendement quantique interne de la puce.

L'utilisation de la céramique permet une dissipation efficace de la chaleur créée au niveau de la puce, et aussi de réduire la taille des modules LEDs.

3.1.4 L'optique primaire

Les besoins de l'optique primaires sont une haute transparence dans le visible, une grande stabilité optique et thermique, une haute résistance aux rayures et d'excellentes propriétés de moulage.

Le remplacement de l'époxy par le silicone, comme encapsulant, permet d'avoir une durée de vie plus longue pour les LEDs. Les silicones ont une stabilité thermique entre -115 °C et 260 °C et une transparence optique supérieure à 95 % [3]. Suivant le type de silicone (diméthyle, diphényle), l'indice de réfraction est compris entre 1,14 et 1,60.

3.2 LED émettant de la lumière blanche

Une puce des LEDs génère seulement une lumière monochromatique avec une gamme spectrale étroite ou de la lumière ultraviolet. Il y a trois méthodes de générer de la lumière blanche : mélanger des lumières avec une variété de couleurs pour générer de la lumière blanche ; utiliser la conversion de luminophore pour générer de la lumière blanche ; et utiliser une LED avec une puce avec plusieurs cavités.

3.2.1 RGB⁴ : LED blanche faite avec plusieurs puces (rouge, verte et bleue)

Une technique consiste à combiner les faisceaux de trois LEDs émettant dans le rouge, le bleu et le vert. Les semi-conducteurs utilisés pour faire de la lumière bleue (450-460 nm) et verte (530-550 nm) sont en général composés de GaInN, pour la lumière orange/rouge (610-630 nm) du AlGaInP [1]. La Figure 7 montre la combinaison de ces trois faisceaux. Cette combinaison permet d'obtenir un élevé CRI grâce à la lumière rouge, mais cela ne signifie pas que la lumière sera « jolie ». La qualité du blanc obtenu va dépendre du choix des longueurs d'onde, de l'intensité relative des différentes LEDs, mais aussi des matériaux utilisés. En effet, les pics d'électroluminescence de chacune des LEDs vont se décaler différemment en fonction de la température, leurs matériaux constituant étant différents, le « blanc » va lui aussi se décaler.

⁴ RGB : Red Green Blue

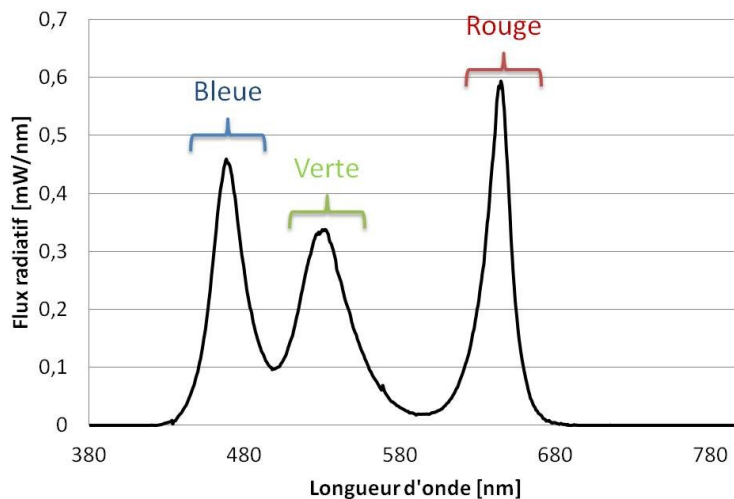


Figure 7 - Spectre lumineux d'une LED RGB

3.2.2 Puce bleue + un ou plusieurs luminophores

Les LEDs composées d'une seule puce sont plus communes que les multiples puces car elles sont moins chères, et elles ont un fonctionnement plus simple et plus stable.

La puce bleue (420-480nm) est une source d'excitation pour le luminophore (Figure 8), qui convertit une partie de la lumière dans une gamme de longueur d'onde plus élevée. (Plus d'explications sur les luminophores dans la partie 4).

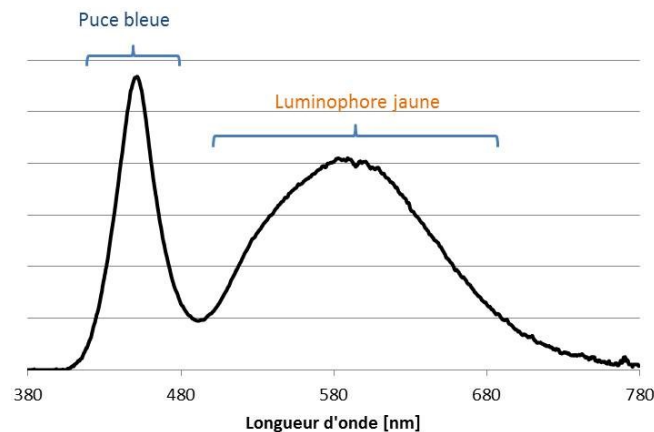


Figure 8 - Spectre lumineux d'une puce bleue avec luminophore

Une des premières LEDs commercialisées, qui a été produite par Nakamura (prix Nobel 2014), Nichia Corporation, était composée d'une puce bleue et d'un luminophore, l'yttrium aluminium garnet dopé au cérium ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$), qui produit une luminescence jaune. Ce luminophore continue d'être un des plus utilisés sur le marché car il a un rendement quantique important, une stabilité optique/thermique et une large bande d'excitation [17]. Cependant les inconvénients majeurs du $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ sont un mauvais rendu de couleur et un important « thermal quenching ».

Aujourd'hui, on ajoute souvent un luminophore rouge pour améliorer le rendu de couleur, mais cela réduit le rendement lumineux [18].

3.2.3 Puce émettant dans l'ultraviolet UV + un ou plusieurs luminophores

Dans ce type de LED, la source d'excitation est une puce émettant dans le proche UV (360-410 nm)

Luminophore RGB (rouge, vert et bleu).

3.2.4 Méthode PRS-LED

La méthode PRS-LED (Photon Recycling Semiconductor Light Emitting Diode) utilise deux régions actives de semi-conducteur (Figure 9). Du fait d'un passage de courant, le semi-conducteur de la première région émet des photons bleus, dont une partie va être absorbée par la seconde région qui émettra à son tour ces photons dans les longueurs d'onde proche du jaune. [19] Ce type de LED n'est pas commercialisé.

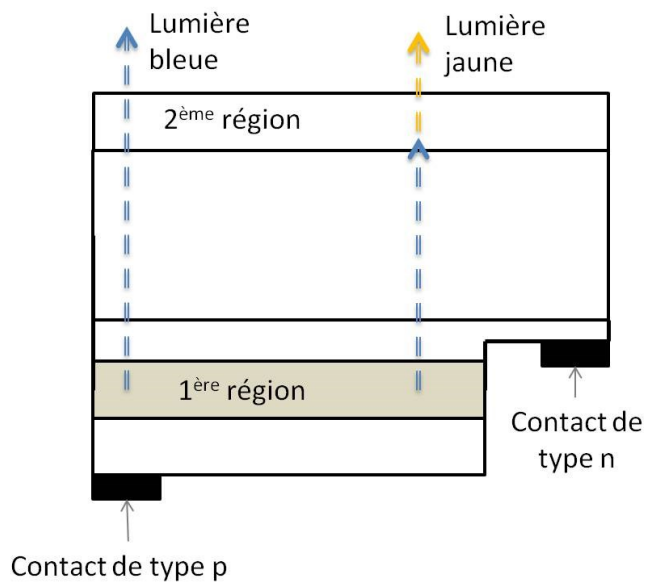


Figure 9 - Structure d'une LED utilisant la méthode PRS

3.3 Comparaison des différents types de LEDs

Les LEDs RGB permettent d'obtenir le CRI le plus proche 100. Cependant cette qualité de lumière baisse rapidement car le rendement des différentes puces n'est pas similaire : la puce verte perd de son efficacité prématurément par rapport aux puces bleues et rouges [18].

Le mélange des couleurs pour obtenir une lumière blanche exige un design des différentes optiques plus compliqué à mettre en place, et un pilotage électrique particulier.

Le coût d'une LED RGB reste élevé à cause de la variété des puces et du design particulier.

Le rendement des LEDs UV est mauvais car il y a une trop grande perte de la lumière et la durée de vie est limitée. De plus, les LEDs UV sont les plus chères sur le marché.

La LED composée d'une puce bleue et d'un luminophore a une efficacité lumineuse proche de 150 lm/W. Ce type de LED est le plus présent sur le marché et le moins cher, même si le luminophore a un coût élevé (autour de 1500 €/kg).

4 Luminophore, du fonctionnement au calcul du rendement

Les luminophores, en anglais *phosphores*, après avoir été excités par la lumière émise de la puce, réémettent de la lumière dans une longueur d'onde supérieure. Ils sont communément utilisés pour réaliser des LEDs émettant de la lumière blanche à partir de l'émission bleue de la puce. Le luminophore joue un rôle optique important, et aussi thermique dans la LED.

4.1 Explication du fonctionnement d'un luminophore

Le luminophore est un matériau cristallin, qui a un comportement similaire au semi-conducteur.

4.1.1 Photoluminescence

La luminescence produite par l'absorption de photons ultraviolets ou visibles est appelée photoluminescence. [20]

La photoluminescence (PL) est un processus par lequel une substance absorbe des photons puis réémet des photons. Le principe est d'exciter des électrons de la bande de valence du luminophore avec un photon d'une énergie supérieure à l'énergie de gap du composé, de telle sorte qu'ils se retrouvent dans la bande de conduction. L'excitation fait donc passer les électrons vers un état d'énergie supérieure avant qu'ils ne reviennent vers un niveau énergétique plus bas avec émission d'un photon (Figure 10).

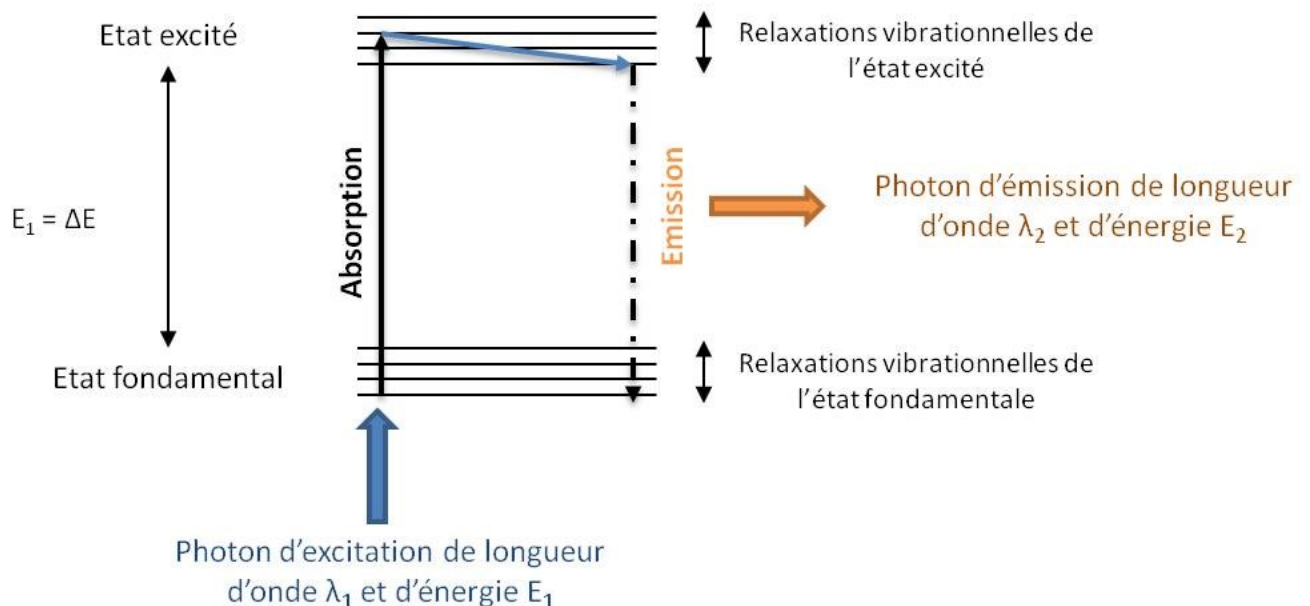


Figure 10 - Diagramme de Jablonski

ΔE correspond à la différence d'énergie entre l'état fondamental et l'état excité. L'énergie apportée par les photons de la source lumineuse (E_1) doit être égale à ΔE pour faire passer le luminophore dans un état excité. Les photons émis lors de sa relaxation

ont une énergie $E_2 < E_1$ soit une longueur d'onde $\lambda_2 > \lambda_1$. Ceci est la conséquence de la dissipation d'une partie de l'énergie par relaxation vibrationnelle c'est-à-dire sous forme de vibration des atomes de la molécule et/ou de chaleur.

Le schéma énergétique de la Figure 11 représente les différents processus d'émission pour un atome isolé décrits ci-dessous. Le niveau fondamental est symbolisé par F, les niveaux excités par G et H, M représente un niveau excité métastable [20]. L'absorption de lumière amène l'atome à un niveau excité : transition $F \rightarrow H$, suivie éventuellement de la transition $H \rightarrow M$. La désexcitation s'effectue soit spontanément par résonance (processus 1), soit par émissions successives de photons (processus 2), soit par apport d'énergie (processus 3). Les processus 1 et 2 correspondent à la fluorescence, alors que le processus 3 est celui d'une phosphorescence. On distingue la fluorescence, qui s'arrête dès que cesse l'illumination, de la phosphorescence, qui persiste.

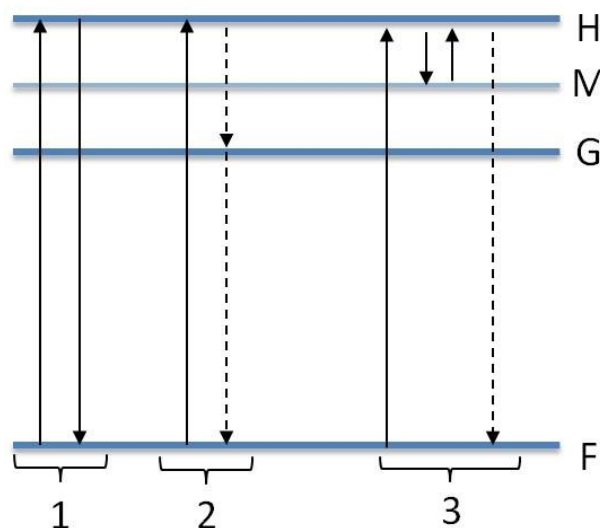


Figure 11 – Schéma énergétique des processus d'émission pour un atome isolé

Pour les molécules isolées, les lois sont plus compliquées : l'énergie d'excitation peut être en partie transformée en énergie mécanique de vibration et de rotation de la molécule.

4.1.2 Rendement

La perte d'énergie entre les photons absorbés et les photons émis (conséquence des relaxations vibrationnelles qui s'opèrent au niveau de l'état excité), est responsable du décalage du spectre d'émission vers de plus grandes longueurs d'onde par rapport à son spectre d'absorption. C'est ce que l'on appelle le déplacement de Stokes (Figure 12).

L'efficacité de Stokes ou l'efficacité de conversion de longueurs d'onde est donné par l'équation suivante : $\eta_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ où λ_1 est la longueur d'onde du photon absorbé par le luminophore et λ_2 est la longueur d'onde du photon émis par le luminophore.

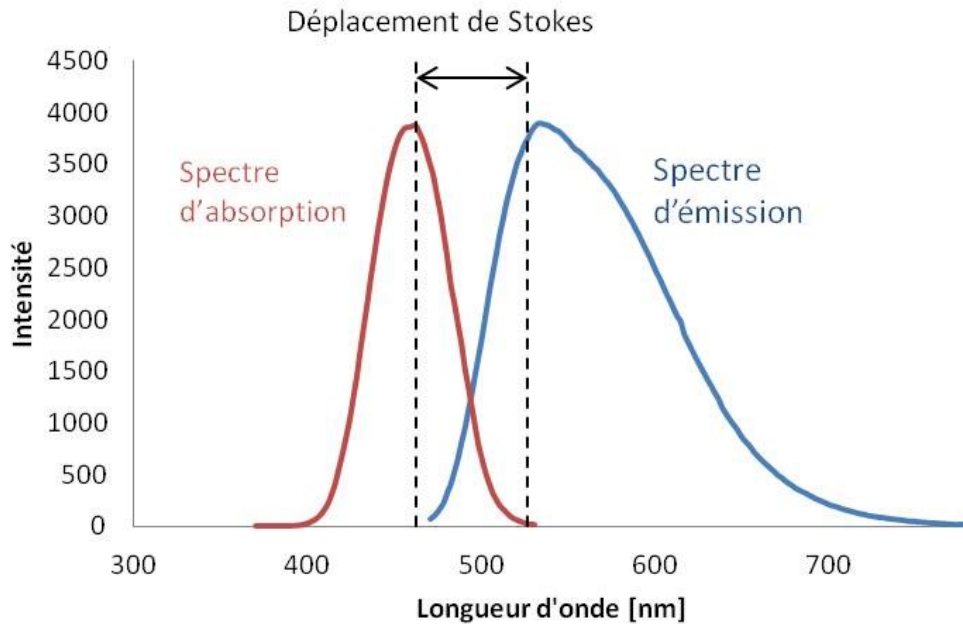


Figure 12 – Illustration du déplacement de Stokes

Le rendement de conversion $\eta_{conv.}$ est la multiplication de l'efficacité de Stokes et du rendement quantique η_{QE} .

Le rendement externe d'un luminophore rouge, tel que $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$, est proche de 0,8, alors que pour un luminophore vert tel que $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$, le rendement est d'environ 0,6 [18].

Des particules de SiO_2 peuvent être ajoutés aux luminophores pour améliorer la diffusion de la lumière afin d'avoir une plus forte absorption de la lumière par les particules de luminophore.

4.1.3 Luminophores utilisés

Pour créer des LEDs blanches, les types de luminophores les plus utilisés sont des grenats, des orthosilicates, des aluminés et des sulfures. La forme des particules de luminophore a été améliorée afin qu'elles deviennent de plus en plus sphérique.

Les matériaux à base de grenat (YAG) dopé au Ce^{3+} et les composants à base de nitrure et de silicate activé par Eu^{2+} ont connu un développement rapide. Ce^{3+} et Eu^{2+} sont devenus les plus utilisés dans les luminophores pour les LEDs [3] car ils ont une bonne absorption des longueurs d'ondes émises par les LEDs, un rendement quantique élevé et une grande stabilité contre les attaques chimiques [21]. Cependant les transitions f-d des « activateurs » Ce^{3+} et Eu^{2+} sont sensibles aux changements de températures. Les luminophores jaunes à base de nitrure sont plus stables thermiquement que le luminophore YAG :Ce, mais ils ont une efficacité lumineuse inférieure : environ 80 % pour le YAG :Ce, et respectivement 60 %, 56 % et 42 % pour $\alpha\text{-sialon}:\text{Eu}$, $\text{CaAlSiN}_3:\text{Ce}$ et $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}:\text{Ce}$ [22].

Les luminophores à base de nitrure ont des propriétés intéressantes : excitation par de la lumière bleue, rendement de conversion important, stable thermiquement et chimiquement.

Les luminophores à base de sulfure sont thermiquement non-stables et très sensibles à l'humidité. S'ils n'ont pas de couche protectrice sous une atmosphère ambiante, leur efficacité baisse de façon significative [23].

4.2 Mise en œuvre de luminophore

Il y a différentes approches de revêtement (Figure 13) pour le packaging des LEDs [3] [24] : revêtement librement distribué en surface, revêtement déporté et revêtement englobant. Ces dispositions limitent l'efficacité du luminophore, car une partie de la lumière générée par le luminophore est émise vers la puce LED qui l'absorbe. [25]

Les particules de luminophores sont mélangées avec un encapsulant à base de silicone afin de former une couche de luminophore. Le mélange encapsulant-luminophore peut être facilement manipulé avec du matériel de dispense.

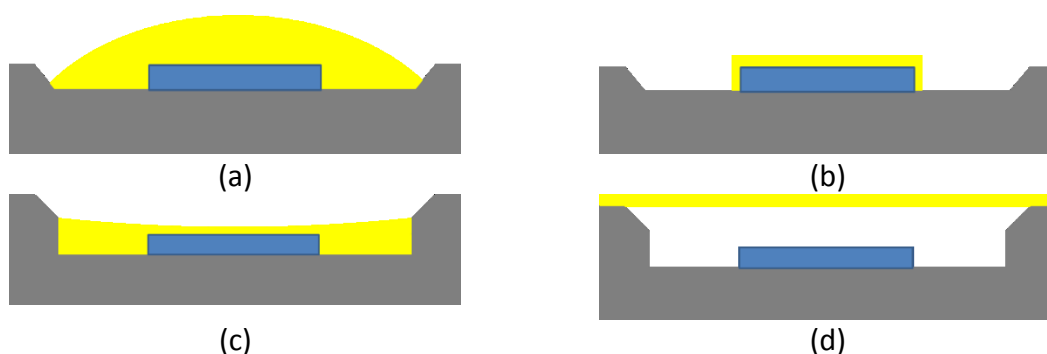


Figure 13 - Illustrations des différentes mises en œuvre de luminophores. (a) Forme convexe. (b) Revêtement enrobant. (c) Forme concave. (d) Revêtement déporté.

- Revêtement librement distribué en surface

Cette méthode a été la première à être développée pour des LEDs émettant de la lumière blanche. Le mélange silicone-luminophore est dispensé sur la puce sans être limité par un moule. La forme de la couche de luminophore est normalement convexe et l'épaisseur au niveau de la partie centrale de la puce est supérieure à celle des côtés. Cela conduit à avoir un blanc chaud sur la partie centrale de la puce et un blanc froid sur les côtés. L'avantage de cette méthode est que l'épaisseur de la couche peut être contrôlée facilement avec le volume du mélange encapsulant-luminophore et la taille de la zone de dispense.

- Revêtement déporté

Le packaging, qui apporte le plus de lumière en sortie et la meilleure efficacité, est le « remote phosphor ». Le luminophore est déporté de la puce de la LED entre une centaine de microns à quelques millimètres [26].

La séparation du luminophore et de la puce par une grande distance (grande par rapport à l'épaisseur de luminophore) réduit la probabilité que la lumière issue du luminophore soit absorbée par la puce. Cela améliore ainsi le rendement du luminophore [25]. Cependant, le principal désavantage du revêtement déporté est que la couche de luminophore n'est pas plane [3].

- Revêtement englobant

Le luminophore peut-être réparti de manière uniforme dans la coupe de réflecteur ou situé dans une couche reproduisant le contour de la puce LED (« conformal coating »). Le procédé d'un revêtement englobant est compliqué : la couche de luminophore est très fine, donc elle doit être réalisée avec une précision microscopique. Cette méthode permet d'avoir une lumière blanche uniforme et peu de pertes lumineuses dans la couche de luminophores.

4.3 Effets de différents paramètres

Certains paramètres du luminophore influent sur ces propriétés optiques, et donc sur les performances du packaging de la LED, tel que l'extraction de la lumière, la distribution spatiale de la couleur et de la qualité de la couleur d'excitation [17].

Les propriétés optiques de luminophore peuvent être mesurées grâce à un système de double sphère intégrante et calculée par les théories de Mie et de Monte Carlo.

Ci-dessous une liste non exhaustive de paramètres du luminophore dont dépend les propriétés optiques :

- Taille des particules

La cristallisation de particules larges est meilleure que pour les particules de petites tailles. Ces derniers contiennent plus de défauts en surface et ont donc une efficacité lumineuse moindre [18]. Selon Tran et al, l'optimisation de la taille des particules de luminophore permet de minimiser la diffusion vers l'arrière (c'est-à-dire vers la puce) et les réflexions arrière de la lumière. La lumière transmise à travers la couche de luminophore représente 40% tandis qu'environ 60% de la lumière est réfléchi vers l'arrière. Des simulations sous LightTools⁵ montreraient que la taille optimale des particules de luminophore est 20 μm pour un luminophore déporté ou englobant. Néanmoins, avec le packaging du luminophore déporté, le flux lumineux est moins dépendant de la taille des particules [27].

- Distribution de la taille des particules

Pour les luminophores avec plusieurs types de particules, la distribution de taille uniforme des particules de luminophore à émission rouge, vert et bleu favorise l'efficacité de la luminescence [18].

La densité de YAG :Ce est 4,6 mg/mm^3 [17].

- Concentration et épaisseur

Si l'épaisseur est trop fine ou si la concentration est trop élevée, le luminophore sature et la lumière convertie est plus réfléchi vers l'arrière [17]. D'après les travaux de Yang et al, l'efficacité lumineuse la plus importante est obtenue avec une concentration faible et une épaisseur importante, ou une concentration élevée et une épaisseur faible [26].

- Nombre de particules

Le flux lumineux de sortie et la température de couleur sont dépendants du nombre de particule de luminophore. Il existe un nombre de particule optimal pour avoir un flux lumineux maximal. Le nombre de particule est un paramètre que l'on retrouve quand on

⁵ LIGHT TOOLS est un logiciel de simulation optique pour la conception et l'analyse de systèmes d'éclairage. Il est développé par Optical Solutions Group.

associe la concentration et l'épaisseur. En 2014, Yang et al. ont étudié la relation entre le nombre de particule et la concentration de luminophore, son épaisseur et la performance final de la LED [26]. Les particules de luminophores sont considérés comme sphérique et distribués uniformément à travers le volume du luminophore. Pour augmenter les chances de conversion de la lumière bleue en lumière jaune, il faut augmenter le nombre de particules de luminophores. Cependant, il ne faut pas que les particules soient trop denses, sinon la lumière ne peut pas sortir de la « lamelle » de luminophore et le flux en sorti baisse.

5 Caractérisation thermique des LEDs – Problématique

5.1 Lien entre température, transferts thermiques et luminance

A l'heure actuelle, peu de publications abordent, à proprement parler, la corrélation Luminance/ Thermique des LEDs. En 2010, J.K. Lee, D.P. Han, J.I. Shim et D.S. Shin écrivent « Relationship between thermal and luminance distributions in high-power lateral GaN/InGaN light-emitting diodes » [28]. Ce travail de recherche, s'appuyant sur de la métrologie et modélisation numérique 3D, met en évidence les liens pressentis qui existent entre la luminance et la thermique des LEDs. Elle souligne également l'importance de l'analyse de densité de distribution du courant électrique au sein de la LED pour l'étude corrélative menée. Cependant, outre le constat d'une relation entre luminance et thermique, cette publication n'émet pas de concept mathématique permettant de passer indifféremment de l'une à l'autre. Un tel lien serait susceptible d'ouvrir la voie à diverses applications industrielles.

Les LEDs de puissance se généralisent et leurs consommations électriques augmentent. Cela conduit à une augmentation de la jonction p-n et une température élevée de la couche de luminophore qui peut atteindre 170 °C pour des produits commerciaux [22]. Il a été observé que, lorsque la température augmentait, deux phénomènes au niveau de la puce bleue apparaissaient: la baisse d'intensité et le décalage du pic d'émission vers des plus grandes longueurs d'onde. Il a été aussi observé une baisse d'émission de la part du luminophore YAG:Ce.

5.2 Thermographie infrarouge

Des équipes de chercheurs ont commencé à étudier la distribution de température en utilisant la thermographie infrarouge. Dans l'article "Analysis of thermal characteristics and mechanism of degradation of flip-chip high power LEDs" [29], cette méthode sert à repérer des points chauds dus à des pertes de courant. D'autres scientifiques veulent optimiser le positionnement des LEDs sur le dissipateur thermique en se basant sur la thermographie infrarouge, « LEDs' thermal management aided by infrared thermography » [30]. Certains chercheurs ont abandonné la thermographie infrarouge pour la mesure de la température de jonction [31] à cause du manque de résolution des caméras.

5.3 Modélisation optique et thermique

En ce qui concerne la modélisation numérique des phénomènes thermiques et photométriques, directement liés aux densités de courant au sein de la LED, plusieurs publications de travaux de recherche ont eu lieu. Une grande partie d'entre eux s'appuie sur des simulations numériques par éléments finis et privilégie principalement le logiciel *COMSOL*.

En 2007, lors de la conférence des utilisateurs de *COMSOL*, trois membres de la société Osram ont fait part de leurs travaux portant sur une méthode permettant de modéliser les densités de courant rencontrés au sein d'une LED [32]. Les résultats obtenus et la démarche utilisée semblent très prometteurs.

La modélisation des aspects thermiques au niveau de la jonction des LEDs inhérents à leur fonctionnement a eux aussi été abordée par divers laboratoires de recherche. La principale étude, elle aussi présentée à une conférence *COMSOL* en 2007, aborde la simulation de température de jonction de LEDs à base de GaN [33]. Les résultats de celle-ci sont également dignes d'intérêt et ouvrent la voie à des modélisations plus poussées.

Ces modélisations et simulations sont pour l'ensemble orientées soit vers les aspects électriques soit vers les aspects thermiques. L'idée de réaliser une modélisation multi physique alliant ces deux phénomènes et en y rajoutant une dimension photométrique serait donc d'un intérêt évident pour le secteur des diodes électroluminescentes.

5.4 Grandeur critique : la température de jonction

Nous nous limiterons à étudier qu'un type de LEDs blanches, celles qui sont le plus fréquemment rencontré : un semi-conducteur émettant dans le bleu ($\lambda_{\text{dom}} \approx 450 \text{ nm}$) recouvert d'un luminophore réémettant une partie du rayonnement dans des longueurs d'ondes jaunes ($\lambda_{\text{dom}} \approx 550 \text{ nm}$). Ce luminophore peut être soit déposé sur la puce, soit inclus, de façon homogène, dans un polymère noyant la puce. Les éléments du luminophore sont le YAG: Ce ($\text{Y}_{33}\text{Al}_{53}\text{O}_{122}$, cerium doped yttrium aluminum garnet) et un substrat de silicone.

La température de jonction est souvent citée comme un élément clé qui détermine la durée de vie d'une LED. Peu d'articles traitent de l'importance du luminophore. L'article "Can junction temperature alone characterize thermal performance of white LED emitters" [34] met en évidence que la température du luminophore joue sur la performance lumineuse de la LED. D'autres scientifiques ont démontré, dans l'article "Decay mechanics of lumen and chromaticity for high power phosphor based white LED in thermal aging" [35], que plus la concentration en phosphore YAG est grande, plus les pertes lumineuses sont importantes.

6 Conclusion préliminaire

Ce chapitre a permis de présenter les différentes techniques pour créer de la lumière blanche, dont plusieurs avec des LEDs. La configuration étudiée, par la suite, est celle

constituée par une puce émettant de la lumière bleue et d'une couche de luminophore, réémettant une partie de cette lumière bleue en lumière jaune. En effet cette technique est la plus commercialisée dans le monde.

De plus, ce chapitre a mis en valeur que la puce, composée d'un semi-conducteur, est sensible à sa température de jonction. L'augmentation de la température de jonction conduit à une baisse de rendement de la LED et à un décalage du pic d'émission.

Notre objectif est de caractériser thermiquement et optiquement au niveau local les puces. Pour cela, les deux principales étapes sont :

- l'étude de la répartition de la chaleur au niveau de la puce,
- l'influence de la chaleur sur les performances optiques de la puce et du luminophore.

Cependant, les méthodes de mesures existantes sont mal adaptées et trop intrusives. Des bancs d'essais spécifiques ont été développés afin de caractériser optiquement et thermiquement.

Dans un premier temps, les matériaux constituant la LED au niveau de la puce et du luminophore vont être identifiés à travers différentes analyses. Ensuite, la puce sera caractérisée optiquement avec et sans luminophore en fonction de la puissance électrique P_{elec} et de la température du PAD T_{PAD} , c'est-à-dire la mesure du flux bleu $\phi_{opt.bleu}$ et du flux blanc $\phi_{opt.blanc}$, de manière globale et locale. Puis, dans les mêmes conditions électriques et thermiques, nous chercherons à mesurer la température de jonction T_j et la température de surface T_w ponctuellement. Enfin un modèle thermo-optique décrira les phénomènes thermiques et optiques au sein de la puce avec luminophore (Figure 14).

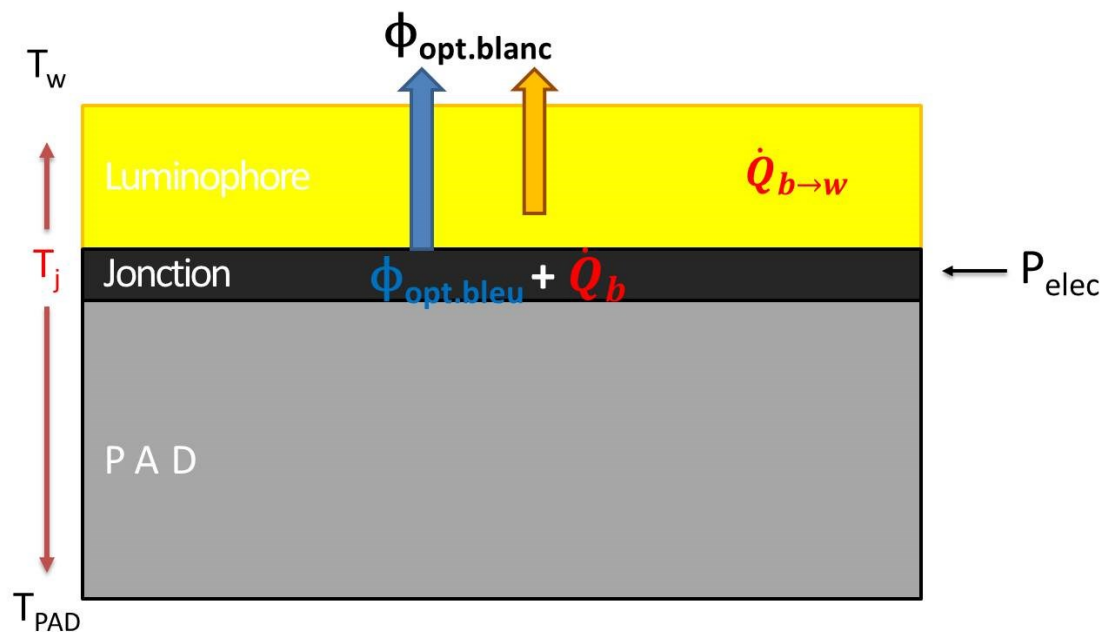


Figure 14 - Résumé des phénomènes thermiques et optiques au sein de la puce

Chapitre 2 - Caractérisation des matériaux constituant une diode électroluminescente

Ce chapitre aborde la caractérisation des matériaux constituant une diode électroluminescente commerciale. Dans la première partie, nous choisissons deux types de LEDs, constitués de la même puce, mais une avec luminophore et une sans luminophore (puce nue). Elles sont commercialisées dans le monde entier, mais le fabricant reste discret sur la composition des couches constituant la puce et sur les propriétés du luminophore. Ces deux LEDs, décapsulées, ont été choisies pour être nos objets d'étude pour tout le reste de la thèse. De plus un dimensionnement du circuit imprimé (PCB) a été effectué afin d'obtenir le moins d'écart de température entre le PAD de la LED et la pastille de cuivre du PCB.

Dans le but d'évaluer les matériaux constituant les LEDs, des analyses au microscope à balayage électronique, complété par une analyse par microsonde, ont été menées. Ces travaux ont permis de révéler, notamment, la position de la jonction p-n dans la puce, les différentes couches avec leur épaisseur et leurs compositions atomiques. Ces analyses ont mis en lumière que la couche des luminophores est composée de deux types de particules : un luminophore qui réémet de la lumière bleue dans le jaune et un luminophore qui réémet de la lumière bleue dans le rouge.

Dans la troisième partie, afin d'améliorer notre compréhension, une étude comparative sera menée sur trois luminophores jaunes. La taille des grains est caractérisée au moyen d'un granulomètre laser. Ensuite, des mesures de luminescences mettent en évidence les longueurs d'onde d'excitation pour chaque luminophore suivant les longueurs d'émission. Puis la conductivité thermique de pastilles de luminophore est recherchée pour différentes concentrations grâce à la méthode de la pastille.

1 Création de module de tests

Les LEDs sont des composants électroniques qui ont besoin d'être alimentées électriquement pour fonctionner. La solution, la plus simple pour les tests optiques et thermiques à venir, est de souder une LED sur un circuit imprimé. Le choix de la LED et le dimensionnement du circuit imprimé vont de paires : l'empâtement de la LED et sa puissance sont nécessaires pour le dimensionnement. Dans cette partie, nous expliquerons le choix des LEDs qui ont été faits et le dimensionnement du circuit imprimé.

1.1 Choix des LEDs

Comme indiqué dans le chapitre précédent, sur le marché de l'éclairage, la configuration la plus utilisée pour créer de la lumière blanche est la combinaison d'une puce émettant de la lumière bleue avec un luminophore jaune. Nous avons choisi une LED de puissance émettant de la lumière bleue (puce nue, autrement dit sans luminophore) et une LED émettant de la lumière blanche (puce avec luminophore) fabriquées par la société américaine CREE, référencées sous le nom de XPE. Ces deux LEDs sont composées de la même puce et du même encapsulant. La société CREE a fabriqué plus d'une centaine de milliers d'exemplaires de ces deux LEDs. De plus cette LED est composée d'une puce qui a une grande surface où des problèmes d'hétérogénéité de température sont potentiellement plus présents. Par contre très peu d'informations sur la composition de la LED (puce, luminophore, encapsulant) sont fournies par le constructeur.

L'alimentation électrique de la puce se fait grâce à deux fils et des pistes en or, créant un maillage rectangulaire (Figure 15). Le maillage d'or est identique pour une puce nue ou avec luminophore. Les données liées aux dimensions sont présentées dans le Tableau 2. Un dôme d'encapsulant transparent recouvre la puce et les fils d'or (Figure 16). Ce dôme agit comme une lentille, il permet d'élargir le cône d'émission de la LED.

Tableau 2 - Spécifications mécaniques de la puce de CREE [36]

Description	Dimensions	Tolérance
Aire de la jonction P-N	950 x 950 μm	$\pm 35 \mu\text{m}$
Aire de la puce	980 x 980 μm	$\pm 35 \mu\text{m}$
Épaisseur de la puce	170 μm	$\pm 25 \mu\text{m}$
Plot de connexion en or – Qté : 2	150 x 150 μm	$\pm 25 \mu\text{m}$
Épaisseur du plot de connexion en or	3,0 μm	$\pm 1,5 \mu\text{m}$
Air du contact métallique sur la face arrière	980 x 980 μm	$\pm 35 \mu\text{m}$
Épaisseur de contact métallique sur la face arrière	3,0 μm	$\pm 1,5 \mu\text{m}$

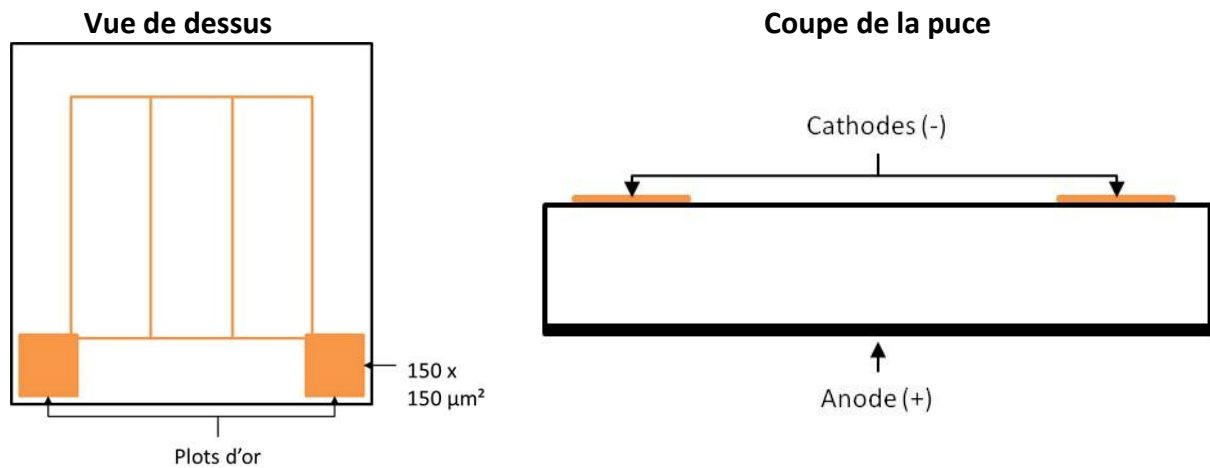


Figure 15 – Géométrie et dimensions de puce de CREE

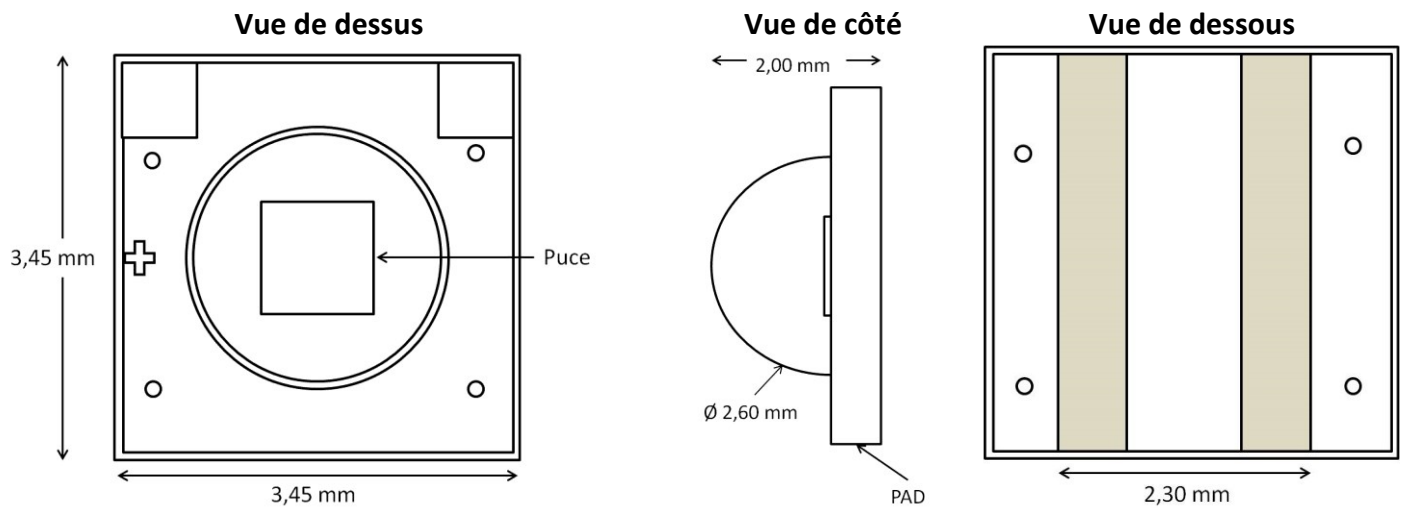


Figure 16 - Schéma des dimensions d'une LED XP-E de CREE

L'objectif est de mesurer directement les flux thermiques et optiques de la puce sous différentes conditions de fonctionnement obtenues pour différentes valeurs de l'alimentation électrique et de la température.

Pour faciliter les mesures optiques et thermiques faites avec une caméra infrarouge, nous avons décidé d'enlever le dôme d'encapsulant, car il est composé de silicone, qui est semi transparent dans l'infrarouge.

En enlevant l'encapsulant, les échanges thermiques au niveau de la surface de la puce ne sont plus les mêmes, ce qui conduit à une température de jonction T_j différente. De plus, en enlevant le dôme, une faible partie de l'épaisseur du luminophore est enlevé de la puce, de l'autre côté des plots d'or.

1.2 Création des supports d'implantation

L'alimentation électrique des LEDs se fait par la soudure de la LED sur un circuit imprimé. Le design du circuit imprimé, ou en anglais *printed circuit board* (PCB), a une grande importance pour la dissipation de la chaleur produite par la LED. Il existe deux types de PCB dont les

propriétés sont différentes. Historiquement, les PCB les plus utilisés sont constitués de FR4⁶. Ces PCB ont une mauvaise conductivité thermique, cela cause des problèmes d'utilisation pour des applications avec des composants de puissance, comme les LEDs. Aujourd'hui les PCB, utilisés pour les composants de puissance, sont composés d'aluminium⁷ car ils conduisent mieux la chaleur. Ces PCB, à base d'aluminium, sont donc plus adaptés aux LEDs. Ils sont composés d'une couche d'aluminium (1,5 mm), d'une couche d'isolant électrique (75 μm), d'une couche de cuivre (35 μm) et une couche de vernis épargne blanc ou noir (70 μm). Ces épaisseurs sont données à titre d'exemple, ils peuvent varier suivant les fabricants de PCB. L'alimentation électrique de la LED se fait grâce à des pistes de cuivre. La chaleur s'évacue à travers les pistes en cuivre et la couche d'aluminium.

Les PCB dimensionnés ont deux trous M3⁸ séparés de 20 mm et deux trous M4 séparés de 25 mm. Ces trous permettront de fixer le PCB, par exemple, sur des plaques ou platines micrométriques.

Le PCB nous permet aussi d'obtenir des informations sur la température du PAD de la LED. Il est possible de souder un thermocouple au plus près de la LED sur la même couche de cuivre ou laisser une partie de cuivre visible pour une caméra thermique. Nous appellerons « pastille » l'emplacement du thermocouple ou la partie du cuivre visible.

1.2.1 Modèle thermique du PCB

La simulation thermique est effectuée dans une optique de dimensionnement du PCB afin d'obtenir le moins d'écart de température entre le PAD de la LED et la pastille de cuivre du PCB. La simulation thermique est effectuée sous le logiciel de simulation numérique COMSOL qui est basé sur la méthode des éléments finis.

L'étude porte sur des transferts thermiques dans des solides en régime stationnaire. Le but est de maximiser la diffusion thermique entre la pastille et la LED. Pour cela, il faut maximiser la surface de cuivre.

- Géométrie

Le PCB fait 25 mm de côté. La LED se situe au milieu du PCB (Figure 17). Celui-ci est composé d'une couche d'aluminium, d'une couche d'isolant électrique et de deux pistes de cuivre qui recouvre chacune la moitié du PCB. Une pastille de cuivre est positionnée sur chacune des pistes, près de l'emplacement de la LED. Le vernis épargne recouvre les pistes, sauf à l'emplacement des pastilles. Cette configuration permet d'avoir une symétrie sur la répartition de la chaleur.

⁶ FR4 : abréviation de l'anglais *Flame Resistant 4*. Le matériau FR4 est un composite de résine époxy renforcé de fibre de verre qui a des propriétés de stabilité thermique et chimique. Le FR4 est le support de la couche de cuivre, conductrice électriquement, dans les circuits imprimés.

⁷ Les PCB à base d'aluminium sont aussi appelés substrats métalliques isolés, ou en anglais *Insulated Metal Substrates* (IMS). Dans ce type de PCB, l'aluminium est utilisé comme support pour une couche isolante électriquement et la couche de cuivre qui conduit l'électricité. Un vernis épargne est déposé sur la couche de cuivre.

⁸ M3 et M4 désignent des diamètres du trou de vissage, dans le système métrique : M3 = 2,5 mm taraudés au pas de 0,5 mm et M4 = 3,3 mm taraudés au pas de 0,7 mm.

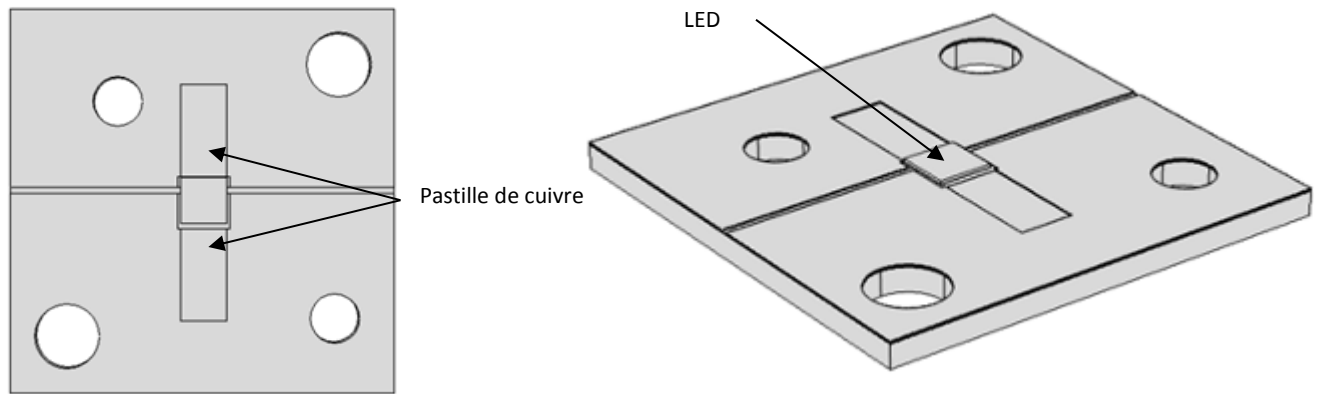


Figure 17 - Schéma du PCB modélisé

- Matériaux

Nous ne connaissons pas les propriétés de certains matériaux. Nous avons cherché, dans la littérature, des matériaux avec des qualités semblables pour déterminer ces paramètres (Tableau 3).

Tableau 3 - Propriétés physiques des matériaux utilisés pour la simulation

Propriétés physiques	Unité	Matériaux				
		Semi-conducteur	Cuivre	Aluminium	Vernis	Isolant
Capacité calorifique à pression constante	$J/(kg.K)$	700	384	904	2165	1369
Masse volumique	kg/m^3	2329	8960	2700	900	1900
Conductivité thermique	$W/(m.K)$	130	401	237	0,3	0,5

- Les phénomènes thermiques

La valeur initiale de la température est de 20 °C pour l'ensemble PCB-LED. En considérant que la LED dégage 1 W de chaleur, la répartition de la chaleur n'est pas uniforme. Il y a trois zones en dessous de la LED (Figure 16 – Vue de dessous) : la chaleur part principalement par la partie centrale (0,6 W), et ensuite les parties extérieures (0,2 W). Les faces du PCB sont refroidies par convection naturelle externe. La température ambiante est de 20 °C.

- Résultats

La simulation donne une différence de température entre le PAD de la LED et la pastille de cuivre de 1,9 °C (Figure 18) : la température moyenne du PAD est de 75,5 °C et la température de la pastille est de 73,6 °C. Les températures moyennes ont une incertitude de 5 %.

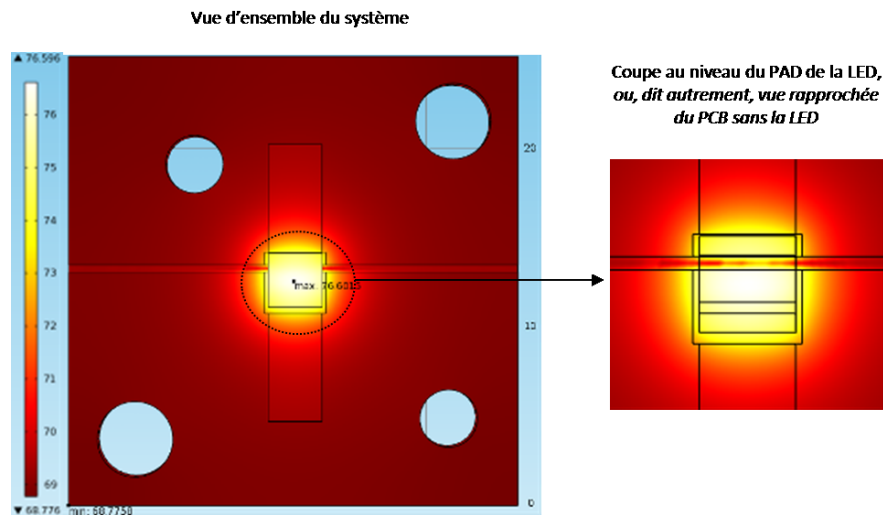


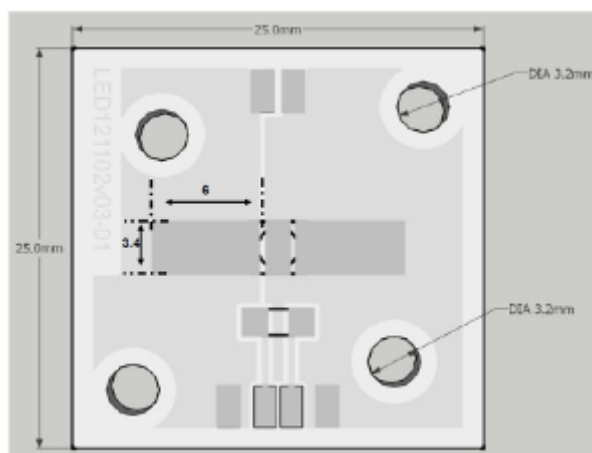
Figure 18 - Température de surface du PCB modélisé [°C]

1.2.2 Fabrication des modules de tests

Les caractéristiques de fabrication des PCB sont les suivantes (Figure 19 et Figure 20):

- Isolation entre piste = 0,3 mm ;
- Largeur des pistes = 0,4 mm ;
- Dimension des pads de soudures = 1,3 mm x 1,5 mm ;
- Isolation entre le cuivre et les trous = 1 mm.

Les dimensions des pads de soudure et l'isolation entre le cuivre et les trous n'ont pas été modélisées car cela n'a pas d'impacts sur le transfert de chaleur.



- Zone gris clair = cuivre + vernis
- Zone gris foncé = cuivre sans vernis
- Zone blanche = vernis

Figure 19 – Schéma du PCB commandé

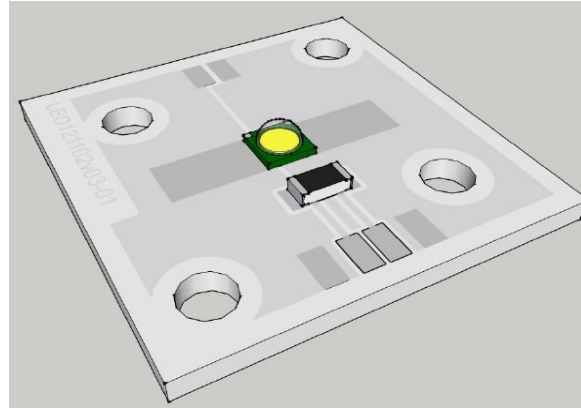


Figure 20 - Illustration du PCB commandé avec une LED et une NTC⁹

2 Caractérisation des matériaux constituant une LED

Nous avons peu de données sur les LEDs que nous avons choisies. Nous devons caractériser les matériaux dont elles sont constituées, les dimensions des différentes couches et la position de la jonction.

2.1 Analyse au Microscope à Balayage Electronique de la puce

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une méthode d'observation et d'analyse qui permet d'avoir une résolution de l'ordre du nanomètre. Cette analyse va nous permettre de connaître le nombre de couches qui composent la puce et la constitution atomique de ces couches.

L'analyse a été faite avec le MEB ESEM FEG Philips équipé d'une microanalyse X, hébergé aux Mines Albi, sur une coupe située au milieu de la puce (Figure 21). La coupe a été obtenue par plusieurs polissages mécaniques.

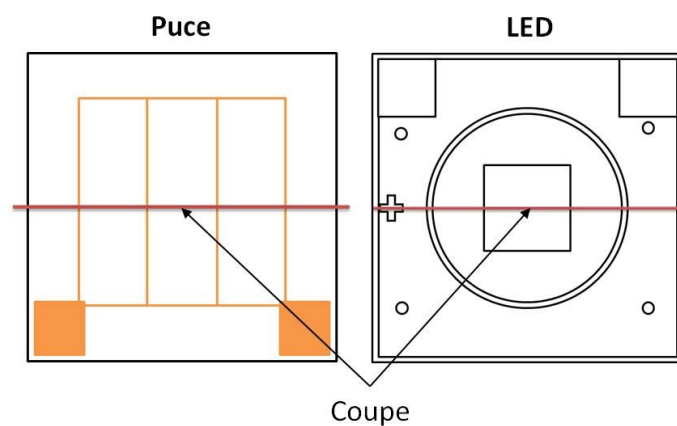


Figure 21 - Position de la coupe pour l'analyse au MEB

⁹ NTC, *Negative Temperature Coefficient*, désigne une thermistance dont la résistance diminue quand la température augmente. A la

Figure 20, la NTC est illustrée de manière indicative.

2.1.1 Principe du microscope à balayage électronique

Un faisceau très fin d'électrons (taille du rayon proche du nanomètre) balaie la surface d'un échantillon où se produisent des interactions détectées par des capteurs : déflexion des électrons primaires, production d'électrons secondaires arrachés à l'échantillon, production de rayon X [37]. Un des détecteurs est pour la topographie de la surface et un pour la répartition chimique des éléments présents à la surface de l'échantillon. Les détecteurs sont synchronisés avec le balayage électronique à la surface de l'échantillon pour former une image.

Les rayons X émis par les atomes portent une information chimique : le spectre de leurs longueurs d'onde comporte des raies caractéristiques permettant de reconnaître la présence de certains atomes. [38]

2.1.2 Analyse d'une puce nue

2.1.2.1 Les différentes couches d'une puce nue

Les images ont été obtenues par une analyse en électrons rétrodiffusés (Back scattered electrons). Les zones formées d'atomes avec un nombre atomique élevé apparaissent plus brillante que les autres. Toutes les images ont été orientées dans le même sens, c'est-à-dire le PAD vers le bas et les fils d'or en haut. La Figure 22 illustre la puce entière avec le maillage d'or, soudée sur le PAD. La Figure 23 représente un zoom de la partie qui est étudiée.

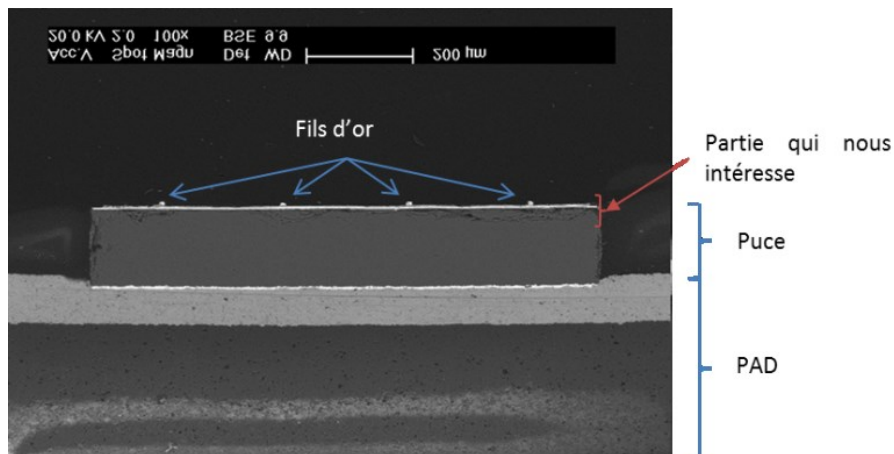


Figure 22 - Image de la puce bleue entière

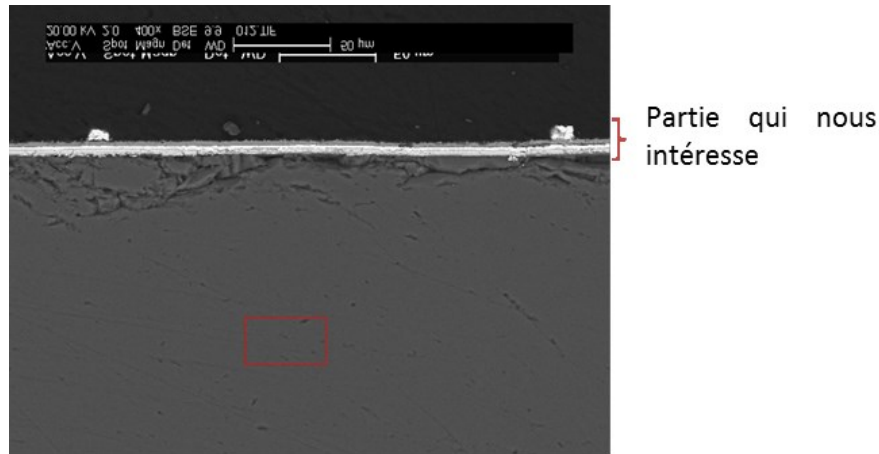


Figure 23 - Zoom de la partie à étudier

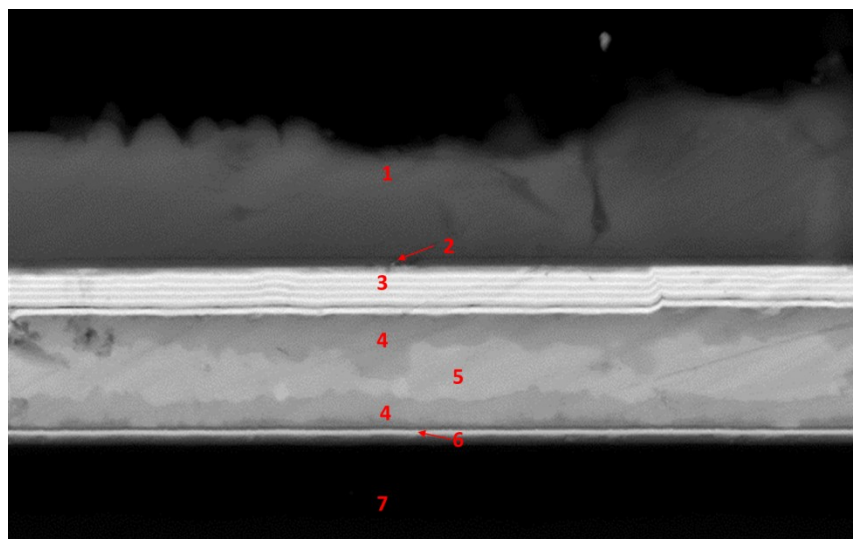


Figure 24 - Visualisation des différentes couches analysées

Nous avons repéré sept couches à analyser (Figure 24). Nous avons déterminé l'épaisseur moyenne des différentes couches et leur composition chimique. La **couche 1** a une épaisseur irrégulière qui est due au polissage. La **couche 5** est comprise entre deux **couches 4**. L'irrégularité de l'épaisseur n'est pas due au polissage, mais à la structure de la puce. Pour la **couche 3**, nous avons deux hypothèses :

- Hypothèse 1 : c'est un réseau de Bragg ou réflecteur de Bragg, créé par une alternance de matériau avec des indices de réfraction différente.
- Hypothèse 2 : c'est une couche qui permet que les atomes d'or de soudure ne se diffusent vers la jonction.

Nous avons trouvé très peu d'informations dans la littérature sur la présence de cette couche et sur sa fonctionnalité.

Les résultats d'analyses sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 - Résumé des différentes couches

Couche	Epaisseur	Principaux atomes ¹⁰	Autres atomes	Hypothèses : fonctionnalités
1	2,2 μm – 3,26 μm	Ga	Ag, Si, C, O, N	Jonction
2	192 nm	Ga, Ag, C	W, Pt, Ni, Ti, N, O	Jonction
3	958 nm	W, Pt	C, O, Si, Ag, Ti, Ni, Ga	Hyp. 1 : Réseau de Bragg (réflecteur) Hyp. 2 : Couche de non-diffusion
4	2,3 μm	Sn, Ni	Pt, Au, W, Si, C, O, N, Ti, Ca	Soudure
5		Sn, Ni	Pt, Au, N, C, O, Si, Ca, Ti, W	Soudure
6	115 nm	Si, W, Ti	Ni, Sn, Ca, Au	Substrat
7	141 μm	Si		Substrat

2.1.2.2 Détails des différentes couches de la puce

La **couche 1** correspond très certainement à la jonction car cette couche est majoritairement composée de Ga (Figure 25). Cela signifierait que pour une puce bleue nue, la jonction se situerait en surface.

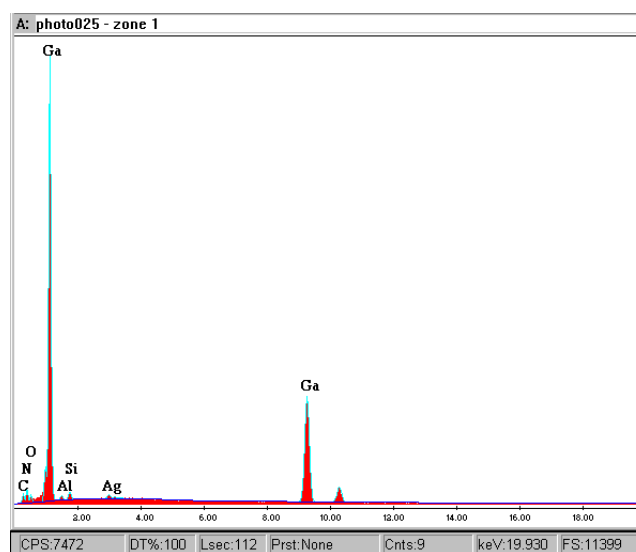


Figure 25 - Composition atomique de la couche 1

La **couche 2** a une structure en forme de triangle (Figure 26). Cette structure est sûrement là pour mieux extraire la lumière.

¹⁰ Rappel des symboles des atomes

Ag	Au	C	Ca	Cu	Ga	N	Ni	O
Argent	Or	Carbone	Calcium	Cuivre	Gallium	Azote	Nickel	Oxygène
Pt	S	Si	Sn	Sr	Ti	W	Y	
Platine	Soufre	Silicium	Etain	Strontium	Titane	Tungstène	Yttrium	

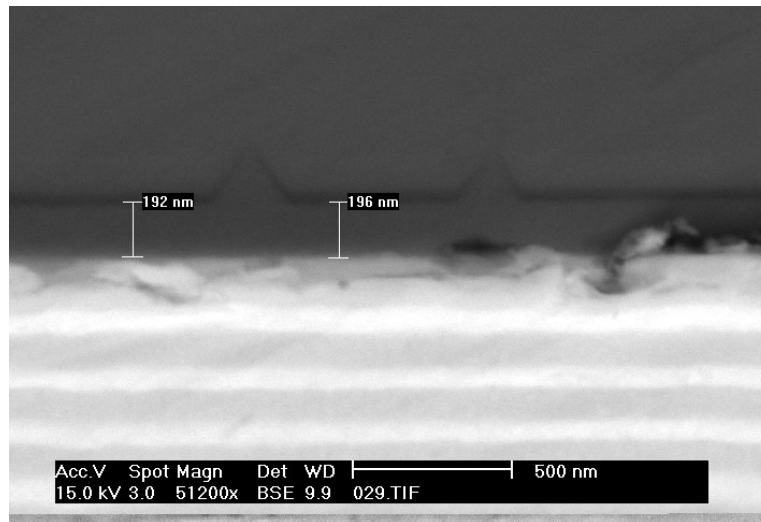


Figure 26 - Structure de la couche 2

La **couche 3** a une structure multicouche. Il est difficile de différencier la structure atomique de chaque couche à cause de la faible épaisseur et de la similitude de la composition chimique. La Figure 27 montre plus précisément la **couche 3**. Cette image est dans le sens inverse aux autres : le PAD est en haut et les fils d'or en bas.

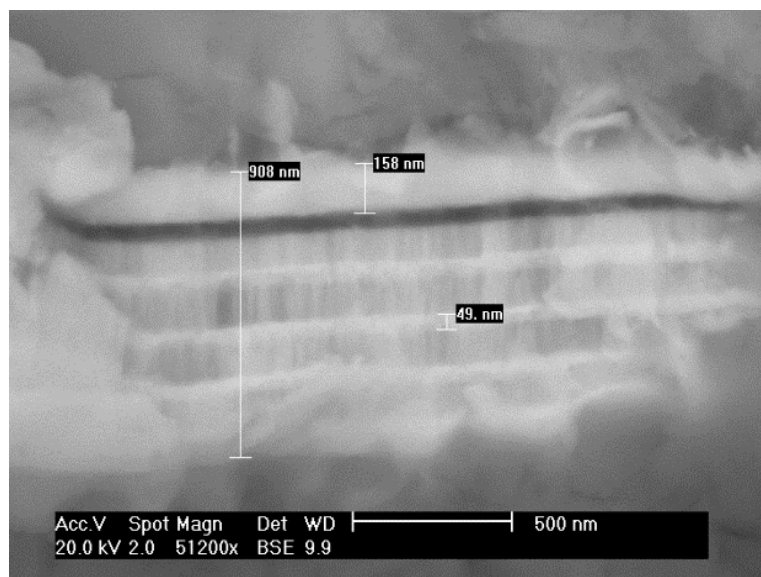


Figure 27 - Structure de la couche 3

La différence entre la **couche 4** et la **couche 5** est due à la plus grande quantité de Pt et Au dans la couche 5. Dans la Figure 28, le trait noir sans remplissage représente la couche 5. La courbe rouge représente la couche 4.

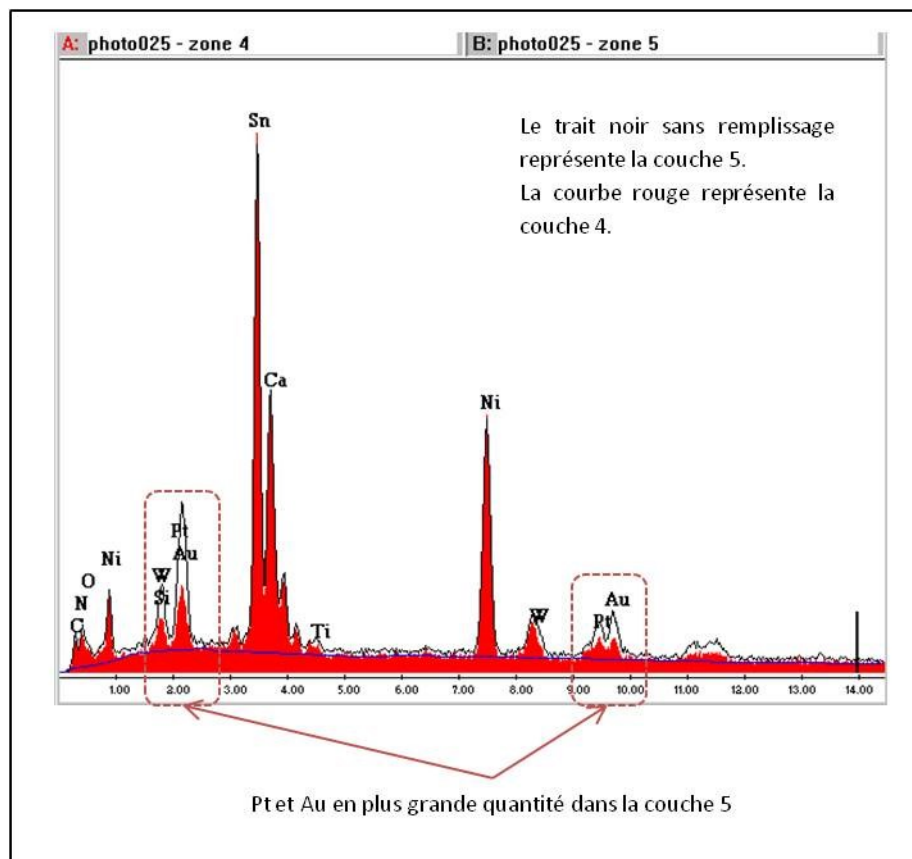


Figure 28 - Comparaison entre les compositions de la couche 4 et de la couche 5

L'analyse chimique nous a permis de déterminer aussi que la **couche 7** ne contient que du silicium (Figure 29), et non pas du carbure de silicium, comme le fabricant le décrit [39].

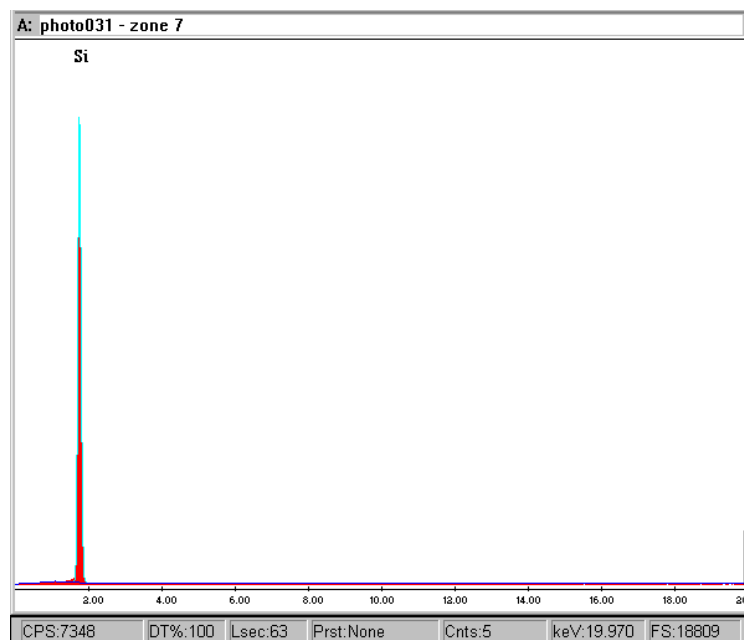


Figure 29 - Composition chimique de la couche 7

2.1.3 Analyse de la couche de luminophore

Après avoir analysé la puce, nous analysons la couche de luminophore d'une LED émettant de la lumière blanche. La Figure 30 compare les deux configurations : puce nue et puce avec luminophore.

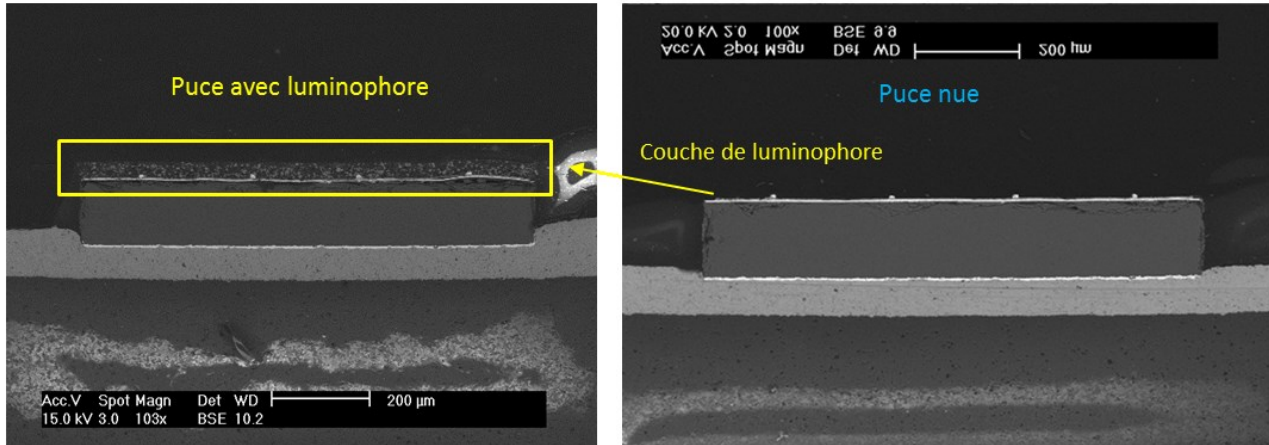


Figure 30 - Comparaison entre une puce avec luminophore et une puce nue

La couche de luminophore a une épaisseur d'environ 35 µm (Figure 31). La couche de luminophore est composée d'une poudre d'un ou plusieurs luminophores et d'un encapsulant.

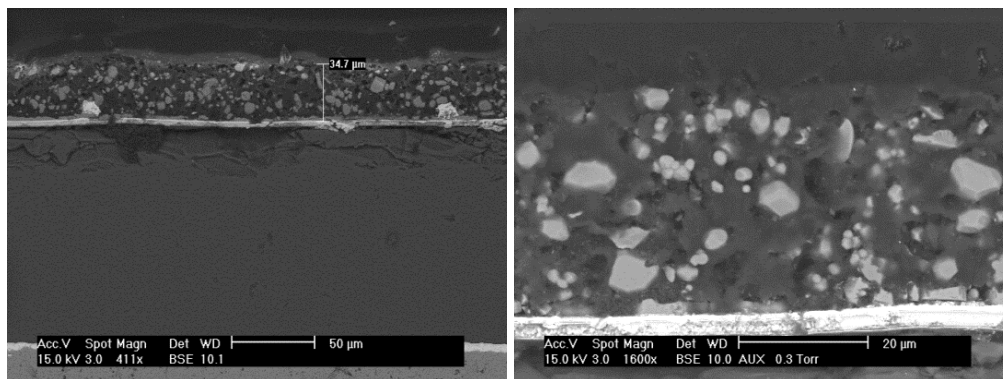
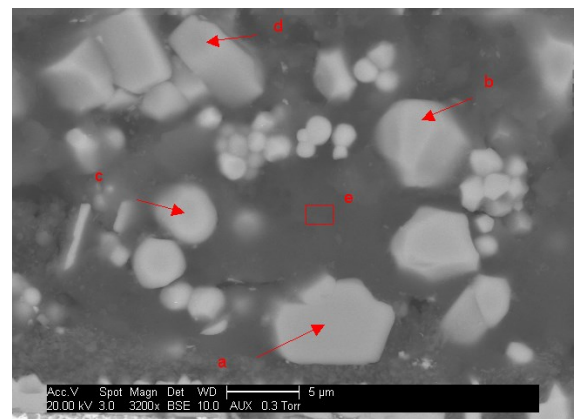


Figure 31 - Détails de la couche de luminophore

Le diamètre des particules se situe entre 1,4 µm et 7,1 µm. Ces données sont à prendre avec précaution car le polissage a pu réduire la taille des particules. L'épaisseur de la couche est de 35 µm. Les atomes principaux qui la composent sont Y, Sr, O, Al, les atomes secondaires sont C, Si, Cu et Ca.

Nom de la zone analysée	Principaux atomes	Atomes secondaires
A - particules	Sr, C, Si, N, Al	O, Ca, Cu, S
B - particules	Y, O, C, Al	Si, S, Cu
C - particules	Y, O, C, Al	Si, S, Cu
D - particules	Sr, C, Si, N, Al	O, Ca, Cu, S
E - encapsulant	C, O, Si	Al, Cu, S



L'analyse au MEB n'a pas permis de mettre à jour des terres-rares, tel que le cérium Ce ou l'euporium Eu. Malgré cette absence, les analyses chimiques nous révèlent deux types de luminophores :

- le grenat d'yttrium et d'aluminium YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) qui « transforme » la lumière bleu en jaune
- l'élément Sr (strontium) est utilisé dans de nombreuses formulations pour « transformer » la lumière bleue en rouge. Les formules possibles sont $\text{Sr}_2\text{Si}_2\text{N}_8$, SrSO_4 ou $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)\text{S}$.

2.2 Analyse de la couche de luminophore faite par microsonde

L'analyse par microsonde, faite à l'ICMCB¹¹, a pour but de compléter notre analyse chimique au MEB de la couche de luminophore et de déterminer la composition chimique de celui-ci.

2.2.1 Le principe de la microsonde

Le principe de la microsonde à spectrométrie X [40] consiste à exciter le matériau par un faisceau d'électrons focalisé et à analyser par un spectromètre à dispersion de longueur d'onde (WDS) le rayonnement X élémentaire provenant de l'échantillon. Une microsonde est généralement équipée de 3 à 5 spectromètres WDS munis de 2 ou 4 monochromateurs. Il est possible d'analyser tous les éléments à partir du bore. La spectrométrie par WDS présente l'avantage d'une résolution spectrale 5 à 10 fois meilleure que celle de l'EDS, habituellement utilisée en Microscopie à balayage, ce qui permet d'obtenir des résultats fiables, avec une précision de l'ordre de 1 à 2 % (relatifs) de la composition chimique élémentaire.

La microsonde CAMECA SX 100 a un seuil de détection de 10 ppm (partie par million), à partir du sodium. La taille de la sonde est de $1\text{ }\mu\text{m}^3$. L'appareil permet de faire des profils de composition quantitatifs, des cartographies X ou des mesures de composition locale sur tous les matériaux inorganiques.

2.2.2 Résultats obtenus par microsonde

Les analyses ont été effectuées sur des tranches d'une LED coupée à la scie à fil. Sur la Figure 32, la puce est en dessous. La couche de luminophore fait une épaisseur d'environ $30\text{ }\mu\text{m}$. Les gros amas, de diamètre de $40\text{ }\mu\text{m}$, doivent être dus à des impuretés amenées lors du découpage, transport et mise en place dans la microsonde.

¹¹ Le sigle ICMCB correspond à l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux, CNRS - UPR 9048. ICMCB accueille le groupe de recherche « Chimie et Photonique des Matériaux Oxydes et Fluorures » qui s'intéresse à la luminescence.

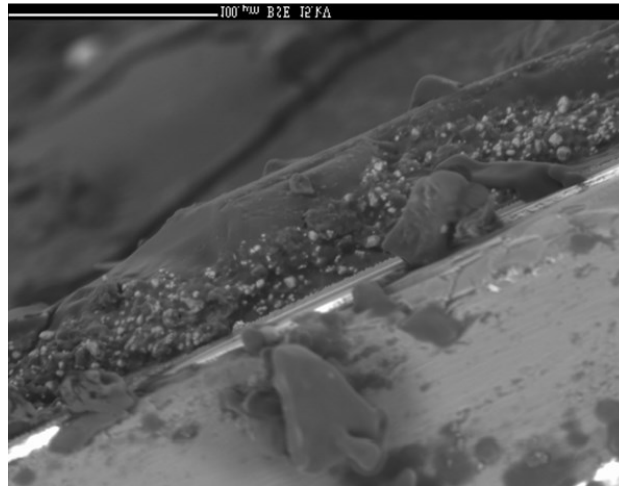


Figure 32 - Vue en coupe de la LED - image obtenue à l'IMCB

Des analyses élémentaires ont ensuite été effectuées sur des zones et des points, afin de connaître les compositions des luminophores et leur répartition. Les images des analyses sont représentées à la Figure 33.

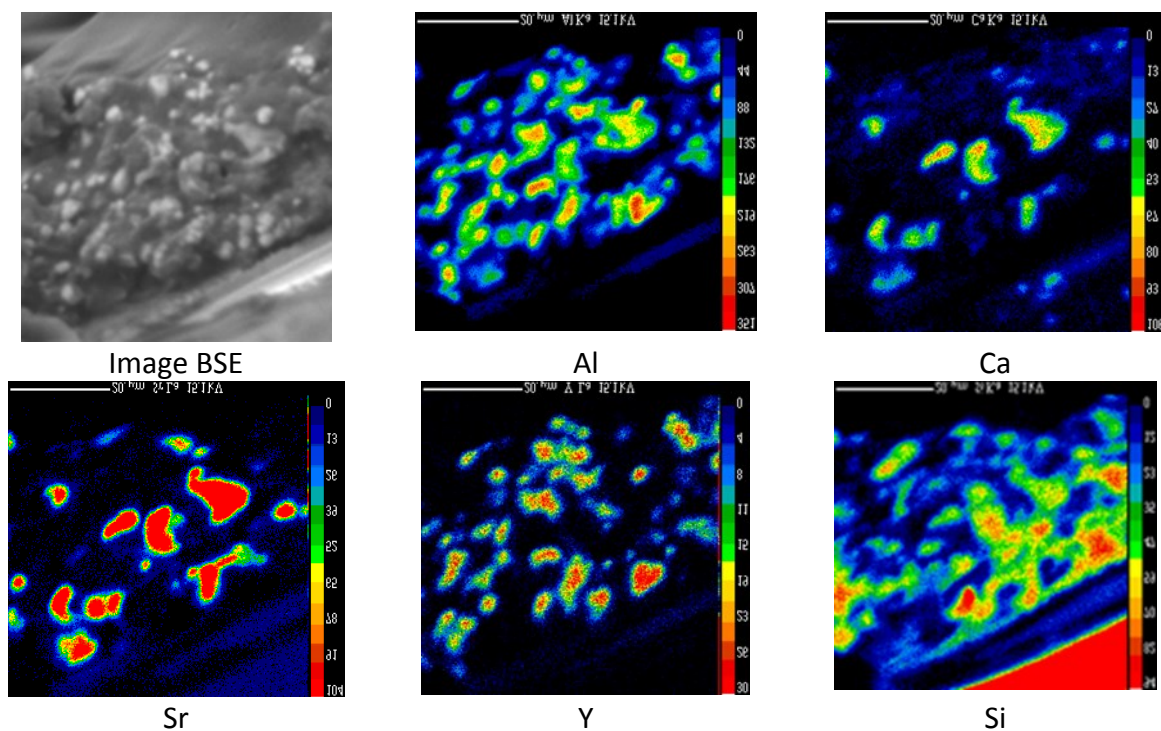


Figure 33 - Répartition des particules dans la couche de luminophore

Les éléments détectés sont Sr, Y, Al, Ca. L'yttrium est localisé sur des zones distinctes de celles contenant du calcium et du strontium. L'aluminium est présent dans les deux zones, de même que le silicium. Mais ce dernier est plus difficile à interpréter car le silicium est présent dans le polymère. Les phases riches en yttrium et en strontium sont mélangées de façon homogène. Les particules riches en yttrium ont des tailles de 8-10 μm , avec quelques particules de l'ordre de 1 μm . Les particules riches en strontium ont des tailles plus dispersées, allant de 3 μm à 15 μm .

La présence d'euprium et de cérium est notée en très faible quantité. La présence d'azote est aussi détectée, sur les zones contenant du strontium.

Des zones précises, de l'ordre du $1\text{ }\mu\text{m}^3$, ont été aussi analysés. Les résultats nous donnent les formules des différents luminophores :

- Le YAG a une formule proche de la formule générique théorique $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, avec un dopage en cérium de 3 % par rapport l'yttrium ;
- Le luminophore à base de strontium et de calcium est de la famille des nitrures de formule $(\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{AlSiN}_3$. Dans notre cas, x est égal à 0,7. Le taux de substitution de l'euprium est de 1 %.

Ces résultats ont permis de confirmer l'analyse faite au microscope à balayage électronique : le luminophore est constitué de deux poudres du YAG dopé au cérium et un nitrure dopé à l'euprium. La microsonde apporte plus de précisions sur la composition chimique des différents luminophores. Cependant l'analyse au MEB donne des informations sur l'intégralité de la puce.

3 Caractérisation de luminophores

Trois luminophores jaunes (*THLAA1*, *THLAB1* et *THLAK*), commercialisés par la société Merck, ont été caractérisés. Le luminophore, présent sur les LEDs choisies précédemment, n'a pas pu être approvisionné. Pour certaines mesures, nous mélangerons ces luminophores à un encapsulant à base de silicone. Cet encapsulant a été choisi pour ses propriétés similaires à ceux utilisés dans la fabrication des LEDs.

Dans un premier temps, nous souhaitons connaître la répartition des grains de luminophore en fonction de leur taille. Nous allons ensuite étudier les propriétés de luminescence, en fonction d'une excitation donnée. Enfin nous déterminerons la conductivité thermique pour des pastilles de luminophores différentes concentrations.

3.1 Caractériser la taille des grains

Nous avons choisi d'utiliser la granulométrie pour caractériser la taille des grains de luminophore, car les mesures sont rapides et reproductibles et la justesse des résultats. Un granulomètre s'étalonne avec des échantillons témoins.

3.1.1 Principe

Le granulomètre laser est basé sur le principe de la **diffraction de la lumière** (Figure 34). Les particules en suspension (dans l'eau ou dans un courant d'air) diffractent la lumière émise par un faisceau laser. La répartition spatiale de cette lumière, qui est fonction de la taille des particules, est enregistrée par un ensemble de photodiodes. L'analyse de cette distribution dans le plan focal permet de déterminer la proportion de chaque classe dimensionnelle. Elle permet la mesure de tailles comprises entre 0,05 et 900 μm . L'interprétation se fait au moyen de la théorie de Fraunhofer. Toutefois cette méthode est limitée d'une part par la longueur d'onde du faisceau laser et par la transparence des grains. En effet, la théorie de Fraunhofer suppose des particules opaques mais également significativement plus grandes que la longueur d'onde de la lumière. De nouvelles méthodes d'analyse des enregistrements

de la répartition spatiale de la lumière à partir de la théorie de Rayleigh-Mie ont été développées. Dans ce cas, on prend en compte la diffraction, la réfraction, la réflexion et l'absorption de la lumière par les grains. Cela permet de réaliser des mesures de tailles bien plus faibles.

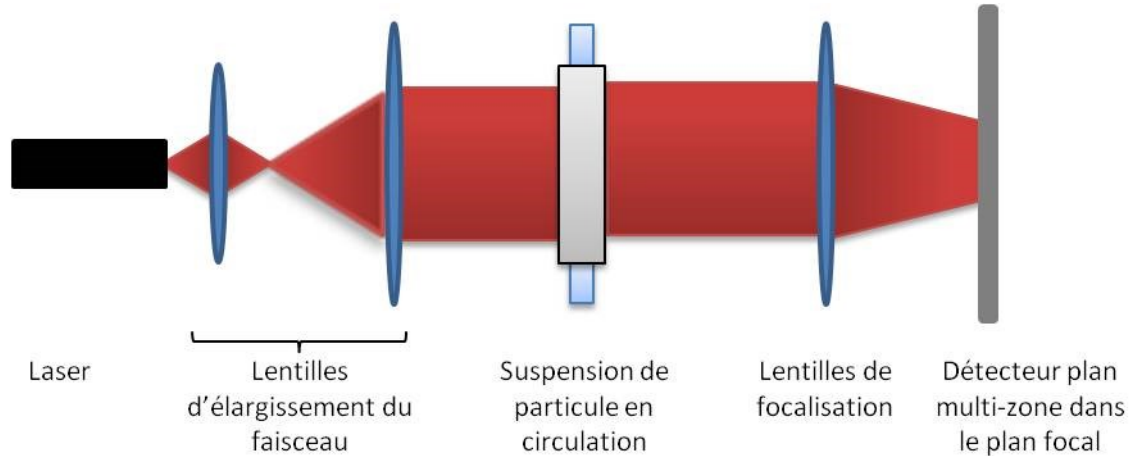


Figure 34 - Schéma de principe de la granulométrie à diffraction laser

Théorie de Fraunhofer

En optique et électromagnétisme, la diffraction de Fraunhofer, encore nommée diffraction en champ lointain ou approximation de Fraunhofer, est une description en champ lointain du phénomène physique de diffraction qui apparaît lorsqu'une onde diffracte à travers une ouverture ou autour d'un objet.

Pour des particules de taille grande devant λ (supérieur à $50 \mu\text{m}$), l'absorption est importante. On peut considérer que l'intensité diffusée provient uniquement de la surface. L'approximation de Fraunhofer n'est valable que pour les particules de taille grande devant λ (supérieur à $50\mu\text{m}$). Dans ce domaine, l'influence des indices de réfraction sur la figure de diffraction est négligeable.

Théorie de Mie

En optique ondulatoire, la théorie de Mie est une solution particulière des équations de Maxwell décrivant la diffusion de la lumière par des particules sphériques.

Elle permet la résolution des équations de Maxwell dans un milieu hétérogène avec comme hypothèses :

- Une lumière incidente monochromatique ;
- Des particules sphériques, de rayon a , homogènes, isotropes ;
- Un milieu de dispersion non absorbant ;
- Une concentration faible (diffusion simple).

3.1.2 Expérimentations

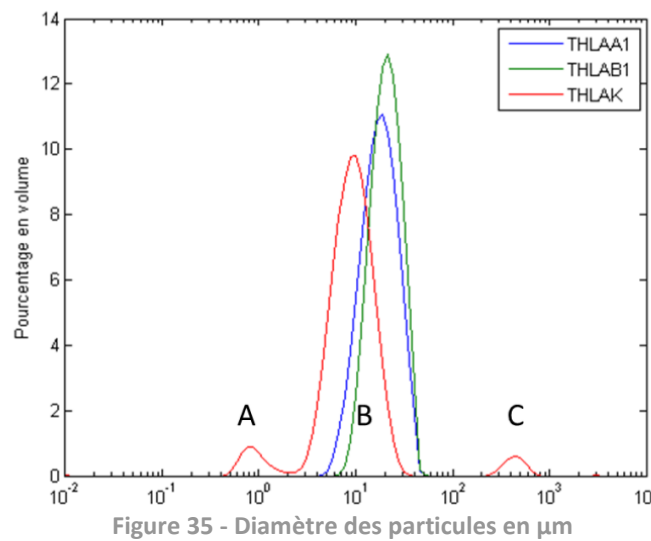
La granulométrie à diffraction laser a été faite dans la partie *Poudre* du laboratoire RAPSODEE. Il a été choisi de mettre en suspension les particules de luminophores dans de l'eau, qui sera utilisé comme un non-solvant. Les luminophores ne sont pas solubles dans l'eau. On peut aussi utiliser des tensioactifs pour prévenir l'agrégation des particules.

Le granulomètre utilisé détecte des particules d'une taille minimum de 50-100 nm (diffusion isotrope pour les particules de taille petite) et d'une taille maximum de quelques millimètres (résolution angulaire du détecteur aux petits angles).

Pour traiter nos résultats, nous prenons comme hypothèse que les particules ont des formes sphériques.

L'analyse de la granulométrie des trois luminophores nous donne le pourcentage des grains dans le volume en fonction du diamètre des particules en μm (Figure 35). Nous remarquons trois zones pour la granulométrie du THLAK :

- Zone A : particules de faibles tailles vers $0,7 \mu\text{m}$;
- Zone B : particules vers $9 \mu\text{m}$;
- Zone C : agglomérats constitués de plus petites particules, centrés sur $700 \mu\text{m}$.



Le luminophore THLAA1 a une distribution homogène, autour de $10,7 \mu\text{m}$. Le luminophore THLAB1 a aussi une distribution homogène, mais elle est plus resserrée que THLAA1.

3.1.3 Modélisation

Nous pouvons modéliser les courbes de répartition des grains par une fonction gaussienne, de type :

$$G(d) = \frac{B(1)}{d} \times e^{-\frac{\ln d - \ln M}{2 \times \frac{E_c}{B(2)}}^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Où :

- $B(1)$ et $B(2)$ sont des paramètres ajustables,
- d le diamètre des particules,
- M la moyenne de la probabilité, c'est-à-dire le diamètre pour lequel nous obtenons le plus grand pourcentage,
- E_c représente la largeur de distribution (valeur donnée lors des mesures)

Les paramètres B sont optimisés pour chaque luminophore avec une fonction d'optimisation *fminsearch* sous Matlab. Cette fonction utilise la méthode de Nedler-Mead simplex. Nous obtenons les résultats suivants :

	B(1)	B(2)
THLAA1	204.2778	2.8866
THLAB1	274.5863	2.8002
THLAK	95.6919	3.5544

La taille des grains est un paramètre important sur le rendement optique d'un luminophore.

3.2 Mesure de luminescence

Pour la caractérisation optique, nous souhaitons mesurer pour les trois luminophores, THLAK, THLAA1 et THLAB1 :

- La longueur d'onde d'émission λ_{em} d'un luminophore pour une longueur d'onde d'excitation λ_{ex} imposée ;
- La longueur d'onde d'excitation λ_{ex} pour une longueur d'onde d'émission λ_{em} voulue.

La Figure 36 rappelle le fonctionnement d'un luminophore. Un rayonnement avec la longueur d'onde λ_{ex} excite le luminophore, qui ensuite réémet un rayonnement avec une longueur d'onde d'émission λ_{em} . Une partie du rayonnement d'excitation est transmis à travers le luminophore. Les rayonnements d'excitation et d'émission sont aussi rétrodiffusés et absorbés par le luminophore. Le modèle du luminophore est expliqué plus en détails dans le Chapitre 5.

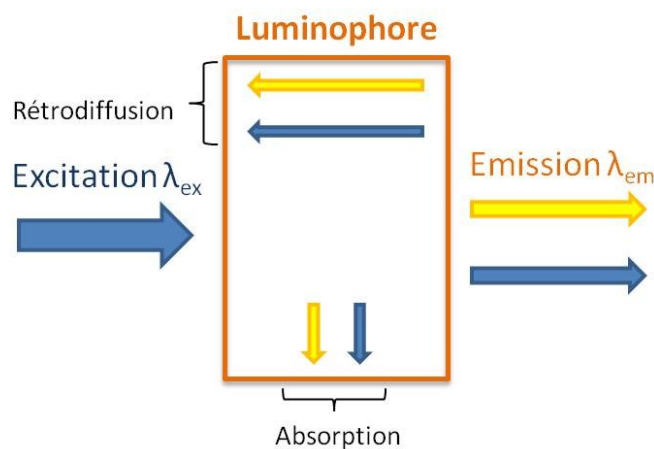


Figure 36 - Schéma explicatif du fonctionnement d'un luminophore

Pour mesurer la luminescence, nous utilisons l'appareil de marque *Varioskan*, un lecteur multi-modes à balayage spectral, englobant les technologies d'intensité de fluorescence, de fluorescence à résolution dans le temps (TRF), photométrie et de détection de luminescence. La gamme d'excitation de l'appareil est comprise entre 200 – 1000 nm, la gamme d'émission est comprise entre 270 – 840 nm. La source de lumière est une lampe flash Xenon. La précision de la longueur d'onde est de ± 3 nm.

Chaque luminophore est mélangé au même encapsulant avec une concentration de 20 %. Ce mélange, une masse d'environ 0,03 g, est déposé dans une alvéole. La température, donnée par le *Varioskan* est d'environ 28,5 °C pendant les mesures. Les données en ordonnées sont

exprimées dans une unité relative. En abscisse, nous avons les longueurs d'onde en nanomètre.

3.2.1 Excitation imposée entre 450nm et 500nm

Nous avons imposé une excitation entre 450 nm et 500 nm tous les 5 nm. Pour chaque excitation, le spectre d'émission est recueilli sur la gamme de longueur d'onde compris entre la longueur d'onde d'excitation et 800 nm.

Comparaison de la réponse des luminophores pour une excitation imposée

Pour comparer le spectre d'émission des trois luminophores, nous avons choisi trois longueurs d'onde d'excitation λ_{ex} : 450 nm, 475 nm et 500 nm. La réponse spectrale diffère pour les trois luminophores (Figure 37). Le luminophore THLAB1 a une réponse spectrale supérieure aux autres luminophores pour des excitations à 450 nm et 475 nm. La longueur d'onde λ_{em} , où le spectre d'émission est maximum, est différente pour chaque luminophore : 550 nm pour THLAA1, 530 nm pour THLAB1 et 535 nm pour THLAK, indépendamment de la longueur d'onde d'excitation λ_{ex} .

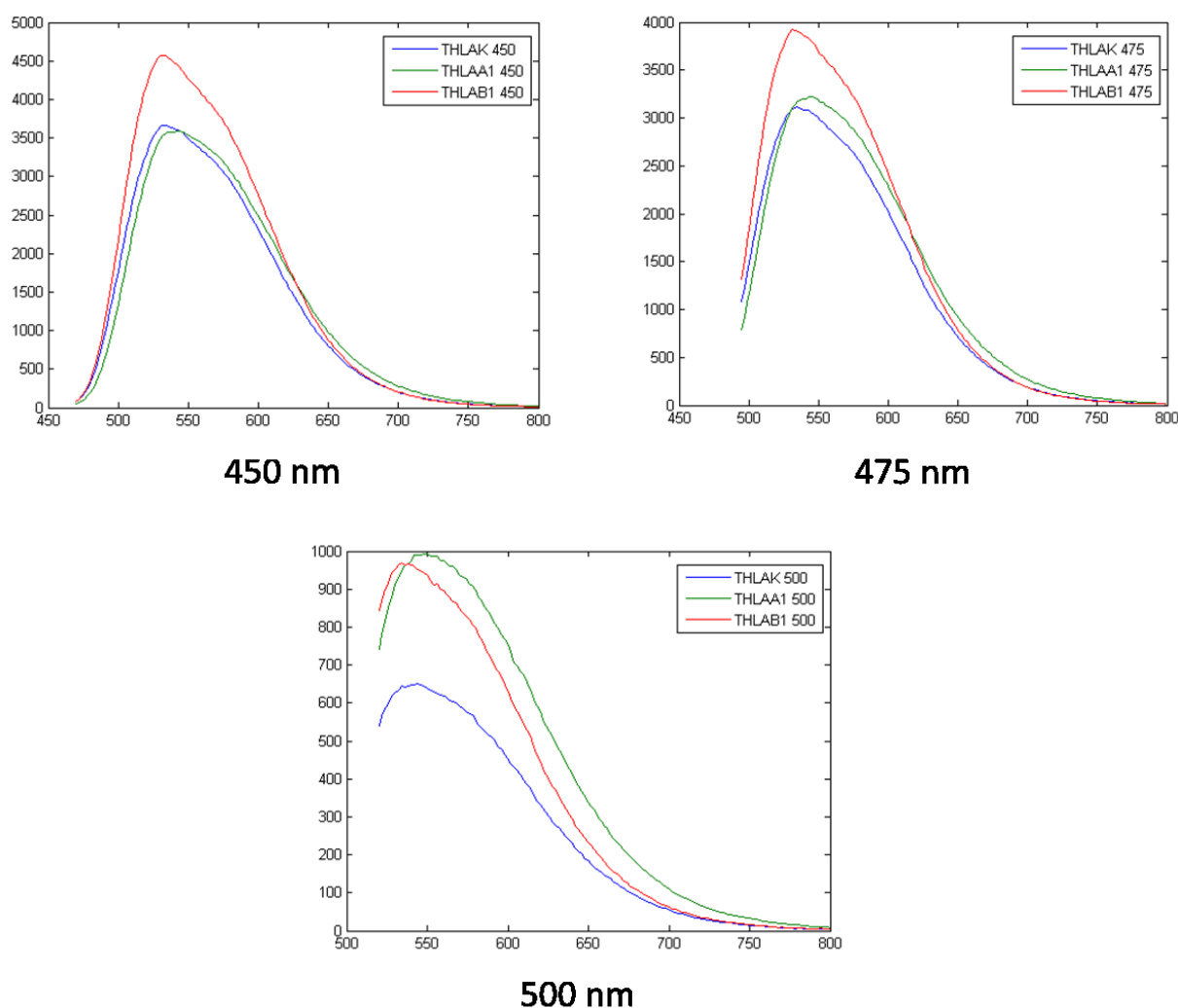


Figure 37 - Réponses spectrales à trois excitations pour trois luminophores

Evolution du spectre d'émission en fonction de l'excitation pour un luminophore

Nous avons tracé le maximum obtenu pour chaque courbe d'émission en fonction de la longueur d'onde d'excitation, de 450 nm à 500 nm (Figure 38). Nous obtenons le maximum de la réponse spectrale pour une excitation proche de 460 nm pour les trois luminophores.

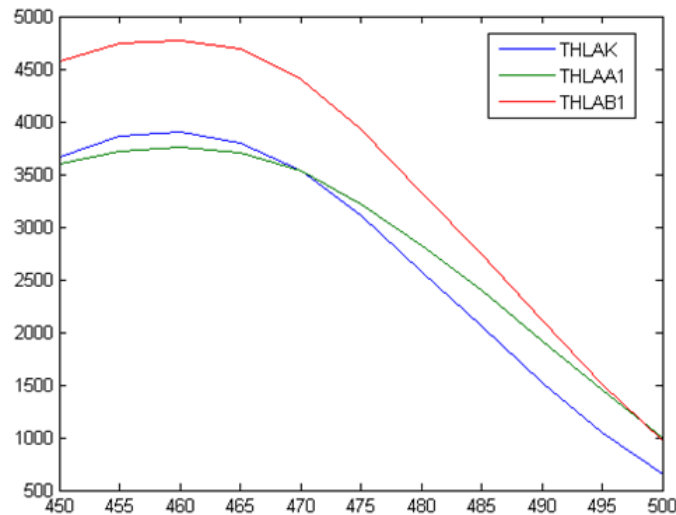


Figure 38 - Evolution du maximum de la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde d'excitation

Pour obtenir le maximum de lumière d'émission de ces trois luminophores, il faut les exciter avec une lumière à 460 nm (lumière bleue).

3.2.2 Recherche de l'excitation pour une émission entre 500nm et 570 nm

Pour les industriels, il est important de connaître la longueur d'excitation qu'il faut imposer afin d'obtenir la longueur d'émission souhaitée. Les longueurs d'onde d'excitation λ_{ex} sont recherchées pour obtenir une longueur d'émission λ_{em} . Une longueur d'onde d'émission est recherchée entre 500 nm et 570 nm tous les 5 nm. Pour chaque longueur d'onde d'émission, nous allons récupérer le spectre d'excitation.

Comparaison de la réponse des luminophores pour une émission imposée

Trois longueurs d'onde d'émissions (520 nm, 545 nm et 570 nm) ont été choisies pour mieux comparer les spectres d'excitation des trois luminophores. La Figure 39 montre qu'il y a trois zones où on peut exciter un luminophore autour de la lumière ultraviolette 230 nm et 340 nm, et la lumière visible 460 nm. Ces trois zones sont identiques pour les trois luminophores, cela confirme la similitude de la composition chimique des luminophores.

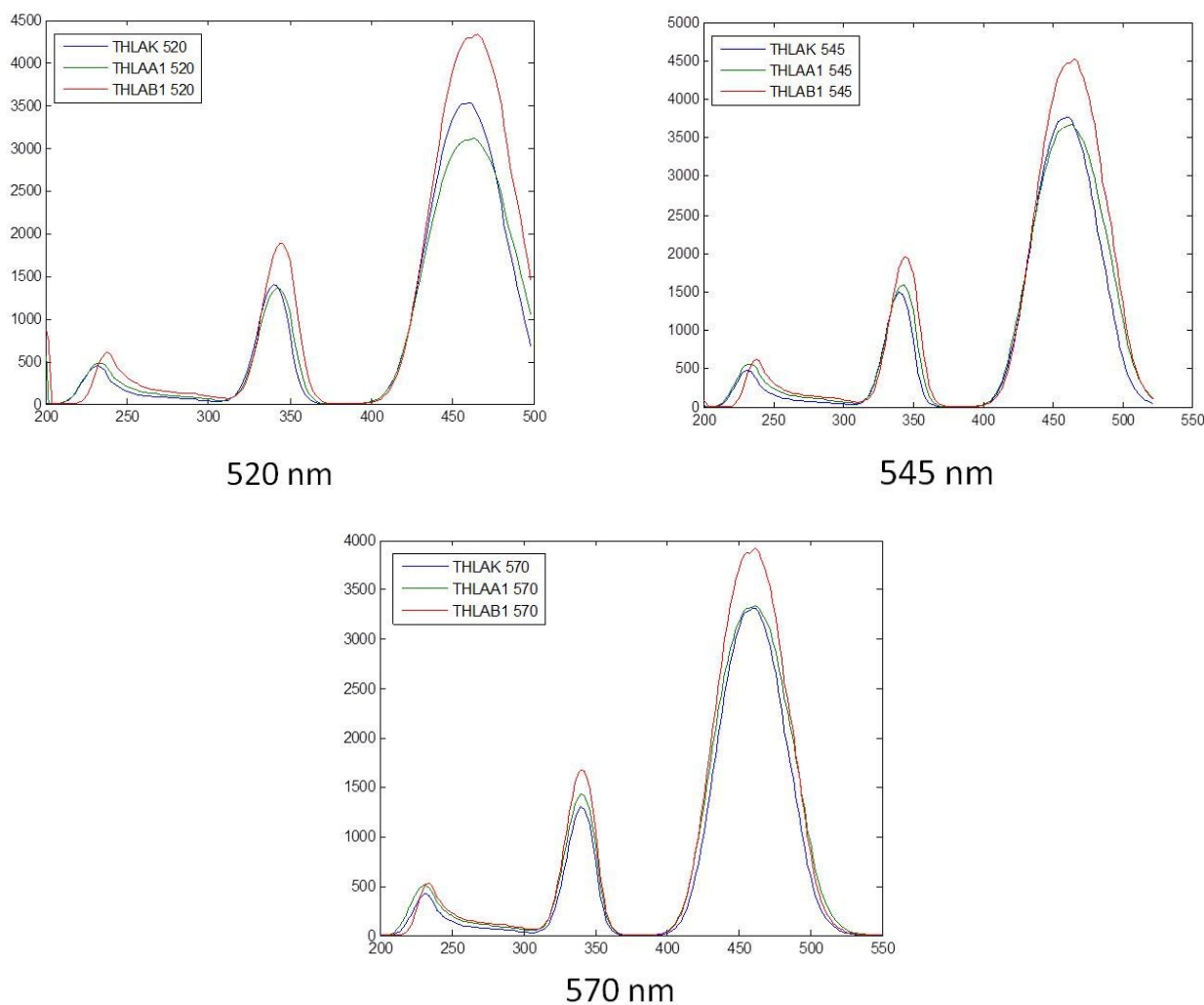


Figure 39 - Spectres d'excitation de trois luminophores pour trois émissions

Cette méthode, pour mesurer la luminescence, permet rapidement de connaître les propriétés optiques d'un luminophore. Ensuite nous pouvons choisir le luminophore qui correspond le mieux à notre puce ou à notre besoin.

3.3 Conductivité thermique

La conductivité thermique de pastilles de luminophore est recherchée pour différentes concentrations. Dans un premier temps, la conductivité thermique est mesurée pour l'encapsulant seul, puis pour les luminophores (THLAA1, THLAB1 et THLAK).

3.3.1 Définitions

La **conductivité thermique k** est une grandeur physique qui caractérise le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps quand les deux faces opposées d'un même corps diffèrent d'une unité de température, donc en présence d'un gradient de température. La conductivité thermique dépend essentiellement de la nature des matériaux, et de la température. Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en Watts par Mètre Kelvin [W/m.K].

La **diffusivité thermique** d est une grandeur physique qui permet de caractériser l'aptitude d'un matériau à diffuser la chaleur, c'est à dire d'imposer sa température au milieu extérieur. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique). En effet, elle représente la vitesse de pénétration et atténuation d'une onde thermique dans un milieu. La diffusivité thermique est exprimée en $[m^2/s]$, et elle est liée à la conductivité thermique par la relation :

$$Diffusivité \left[\frac{m^2}{s} \right] = \frac{Conductivité \left[\frac{W}{m.K} \right]}{Masse Volumique \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot Chaleur spécifique \left[\frac{J}{kg.K} \right]} \quad \text{Eq. 11}$$

3.3.2 Méthode de la pastille

Montage expérimental

Pour mesurer la conductivité thermique d'un matériau, la méthode de la pastille est utilisée. Le principe de base du système est de fournir au matériau à caractériser un échelon de flux pendant un temps défini via la sonde Hot Disk¹² afin de générer une augmentation de température de quelques degrés [41] [42]. C'est également la sonde qui est utilisée pour mesurer l'élévation de température, grâce à l'enregistrement de la variation de sa résistance électrique via un pont de Wheastone. La sonde Hot Disk est donc utilisée à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température. Elle est placée entre deux échantillons du matériau à caractériser. Ces échantillons sont positionnés entre un matériau conducteur avec une épaisseur plus grande devant l'épaisseur des échantillons.

La sonde est très fine (80 μm) de section égale ou inférieure à celle de l'échantillon (Figure 40).

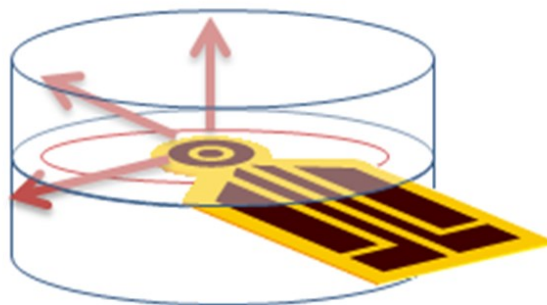


Figure 40 - Schéma du dispositif de la méthode de la pastille

La sonde Hot Disk, qui est utilisée ici, permet de mesurer des conductivités thermiques entre 0,005 et 500 W/m.K, avec une précision de 2 à 5 % et une répétabilité de 1 à 2 % [43].

Modélisation

Nous avons dû créer notre propre modèle et méthode d'estimation de paramètre car le milieu est trop mince pour être estimé par le logiciel fourni avec la sonde Hot Disk. Le

¹² La sonde Hot Disk se compose d'un motif conducteur électrique d'une épaisseur de 55 μm , qui se présente sous la forme d'une double spirale en nickel sérigraphiée sur des feuilles minces d'un matériau isolant (Kapton ou Mica) [43].

modèle, développé dans cette partie, est basé sur le modèle créé dans la thèse de B. Ladevie [44].

L'équation de la chaleur, en coordonnée cylindrique, adaptée au modèle du plan chaud à symétrie radiale est décrite dans les équations suivantes et par la Figure 41, où :

- r_0 correspond au rayon de la sonde ;
- R : rayon de l'échantillon ;
- e : l'épaisseur de l'échantillon ;
- k : la conductivité de l'échantillon recherchée.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} ; \begin{cases} 0 < r < R \\ 0 < z < e \\ t > 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 12}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad ; \quad \begin{cases} r = 0 \text{ et } r = R \\ 0 \leq z \leq e \\ t > 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 13}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} \varphi_0 \text{ si } 0 \leq r \leq r_0 \\ 0 ; r_0 < r < R \end{cases} ; \quad \begin{cases} z = 0 \\ t > 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 14}$$

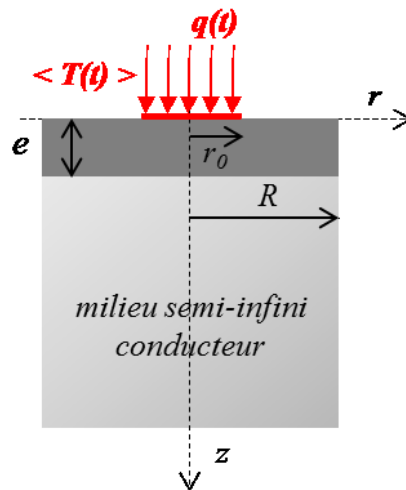


Figure 41 - Modélisation de la méthode de la pastille chaude

Afin d'obtenir des équations différentielles simples, les transformées de Laplace (en temps) et les transformées de Hankel (en r) sont utilisées. La résolution de ces équations se fait grâce à la méthode des quadripôles thermiques [44]. La sonde est considérée comme une résistance thermique ayant une inertie thermique. La condition aux limites est le milieu semi-infini en face arrière.

Etude de sensibilité des paramètres

Nous estimons la conductivité thermique de l'échantillon k , la chaleur volumique de l'échantillon ρc (la masse volumique ρ x la chaleur spécifique C_p), la résistance de contact R_c entre la sonde et l'échantillon, et la capacité de la sonde C_s . Tout d'abord la sensibilité de ces paramètres en fonction du temps est évaluée (Figure 42).

La capacité de la sonde a peu d'influence sur le calcul de la température. La sensibilité à la conductivité thermique augmente avec le temps de l'expérience, de manière plus importante que la chaleur volumique.

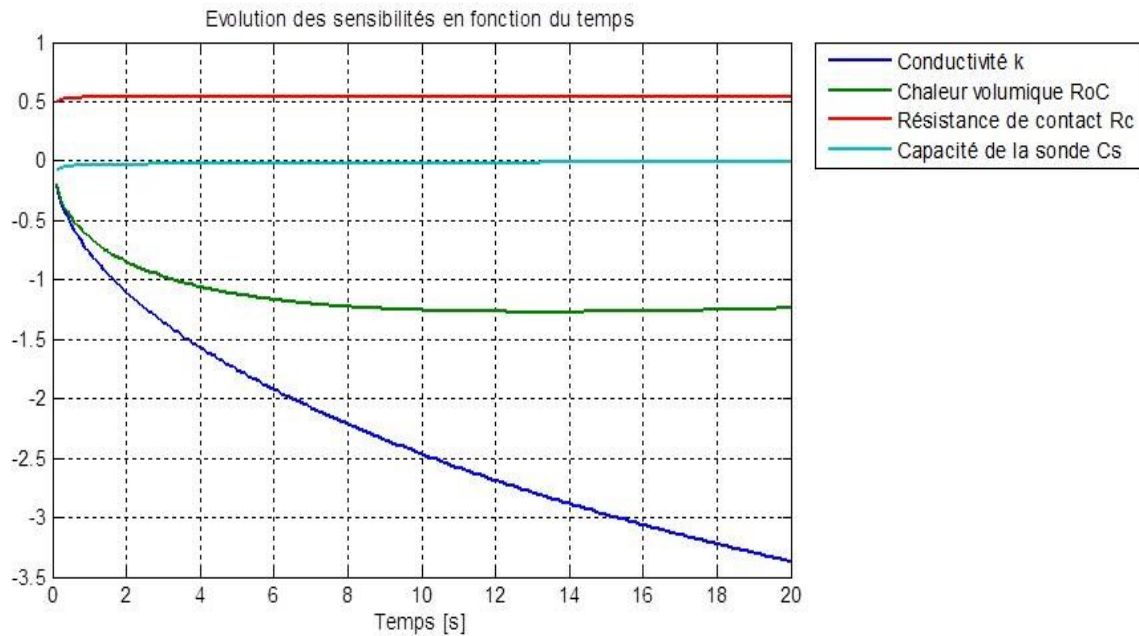


Figure 42 - Evolution des sensibilités en fonction du temps

Estimation de paramètres (MCMC)

Le problème d'estimation considéré n'est pas linéaire, et il est nécessaire d'utiliser une méthode de calcul itérative. Nous utilisons l'algorithme de Metropolis-Hastings qui est une méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC) [45]. Le résultat de cette méthode est la distribution de probabilité a posteriori.

La chaîne de Markov est un processus aléatoire où l'état actuel, étant donné l'état précédent, est indépendant des états passés. La chaîne doit avoir un nombre d'états ($nstates$) suffisamment grand tel que les états ont pour distribution la loi a posteriori. Les premiers états ($nburn$) sont éliminés afin de ne garder que les états pour lesquels les chaînes de Markov ont convergé. La variation des paramètres se fait avec une probabilité de transition donnée. La reconstruction de la distribution de probabilité permet alors d'inférer ses propriétés statistiques telles que la moyenne et la variance.

3.3.3 Mesure de la conductivité thermique de l'encapsulant

Dans un premier temps, la conductivité thermique de l'encapsulant est mesurée seul, sans l'influence des luminophores. Pour l'encapsulant, le tableau suivant (Tableau 5) résume les paramètres d'entrée choisis, les résultats obtenus et une vérification que nous ne sommes pas dans un cas limite.

Tableau 5 - Résumé de la caractérisation thermique de l'encapsulant

Paramètres d'entrée	Flux	35 mW
	Rayon	0,012 m
	Epaisseur	5,35E-03 m
	Conditions Limites CL	Milieu semi infini
	Point de départ (temps) nstart	1
	Nombre de points nt	200
	Pas de temps dt (s)	0.1
	Nombre d'états nstates	40000
	Nombre des premiers états éliminés nburn	20000
	Coefficient pour bouger les paramètres epsi	[0,002 0,002 0,002]
Résultats	Nombre d'états acceptés / Nombre d'états compteur	0,18
	Conductivité k [W/m.K]	0,198
	Chaleur volumique roc	1,92E+06
	Résistance de contact Rc	4,09E-04
	Capacité de la sonde Cs	Fixé à 20

La figure ci-dessous (Figure 43) nous montre la hausse de la température de la sonde en fonction du temps. Nous avons trois courbes :

- Les points d'expérience ;
- La courbe des paramètres initiaux ;
- La courbe avec les paramètres finaux.

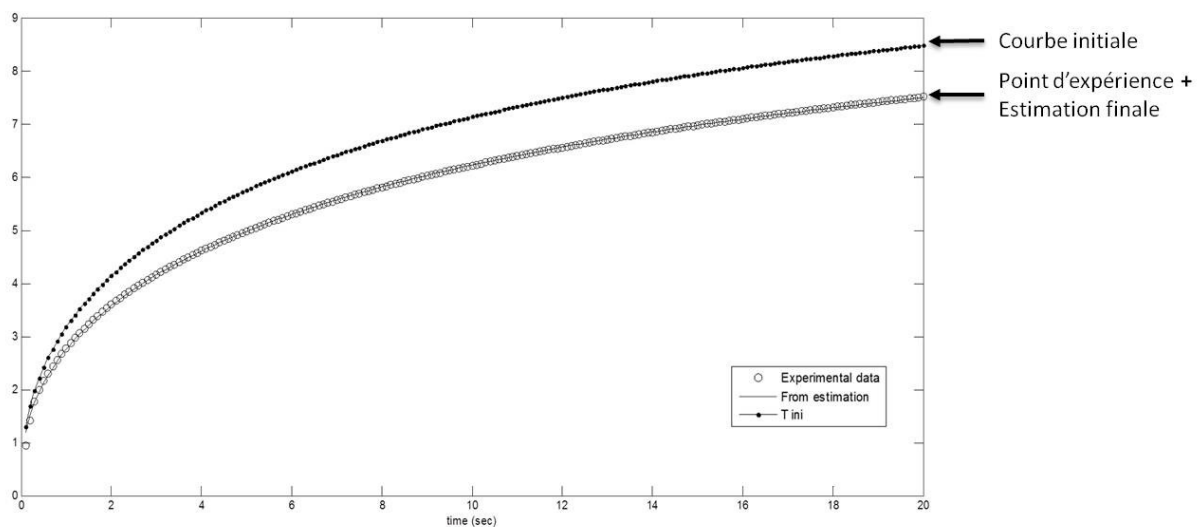


Figure 43 - Courbe de la hausse de la température en fonction du temps : données expérimentales et données estimées

La Figure 44 illustre les distributions uniformes de probabilité a posteriori obtenues par la méthode MCMC des paramètres k , roc et Rc .

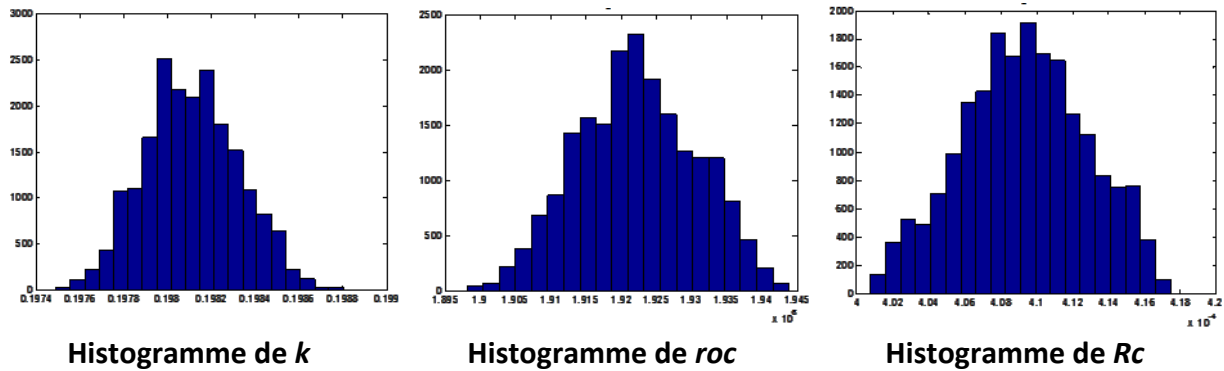


Figure 44- Distributions obtenues a posteriori des différents paramètres

On vérifie la convergence des chaînes de Markov. La Figure 45 montre que les paramètres k et roc sont stables, alors que le paramètre Rc continue de varier faiblement depuis les 30 000 derniers états. Il ne semble pas pertinent d'augmenter des états pour atteindre une meilleure stabilité du paramètre Rc .

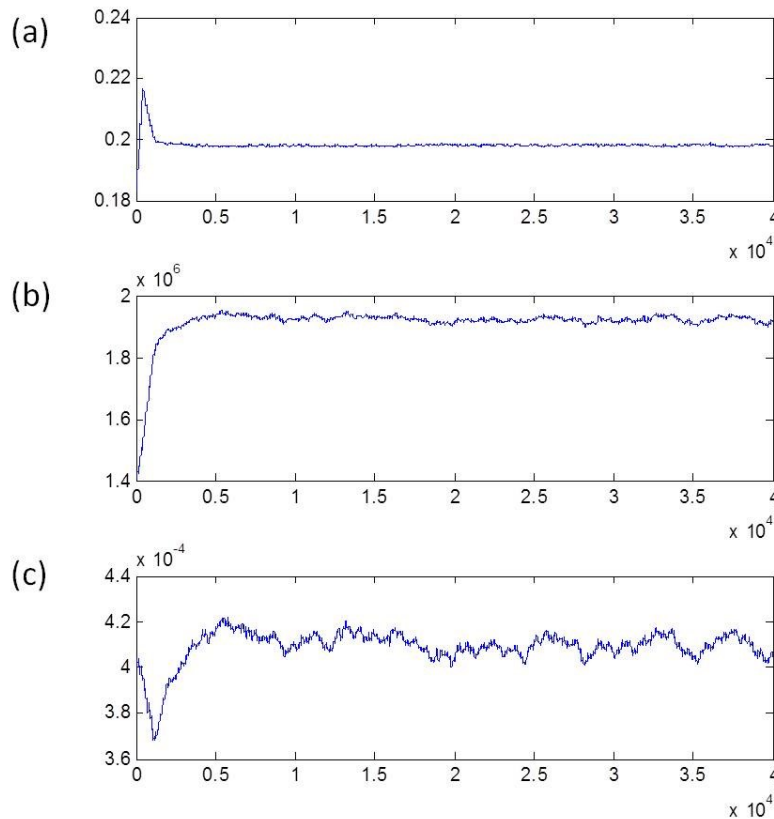


Figure 45 – Evolution de la chaîne de Markov : (a) Conductivité thermique, (b) Chaleur volumique, (c) Résistance de contact

Enfin, pour évaluer la qualité de l'estimation, nous calculons l'écart résiduel entre le modèle calculé avec les paramètres estimés et les données expérimentales en fonction du temps. L'écart est important aux temps courts relevant probablement un biais du modèle aux temps courts, dû au manque d'uniformité de la sonde (Figure 46). On remarque toutefois qu'au-delà des temps courts, l'écart reste très inférieur à 1 % du signal.

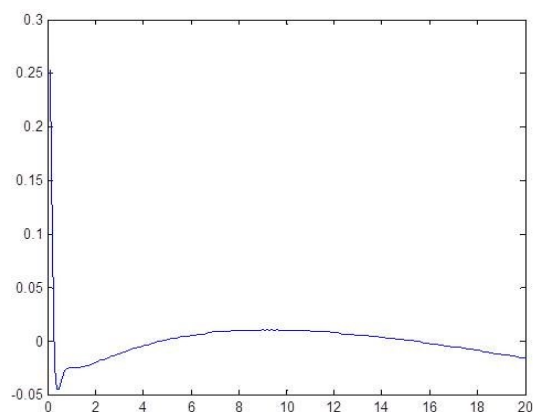


Figure 46 - Ecart résiduel entre le modèle et l'expérience

3.3.4 Mesure de la conductivité thermique de luminophore

Nous procédons à la même estimation pour trois échantillons de luminophore constitués d'encapsulant et de luminophore :

- THLAK à 20 % de masse ;
- THLAB1 à 40 % de masse ;
- THLAA1 à 60 % de masse.

Nous n'avons pas pu faire plus de pastilles de luminophores car nous n'avions pas assez de poudre. Le temps d'expérience est plus long pour les pastilles de luminophores que pour l'encapsulant, minimum deux fois supérieur. De plus, nous avons fait varier la valeur de la capacité de la sonde C_s .

Pour chaque cas, nous adaptons le nombre d'état et le nombre d'états à éliminer. Nous ne détaillerons que le cas de THLAB1 à 40 %, ci-dessous.

Tableau 6- Résumé du modèle pour THLAB1 à 40%

Paramètres d'entrée	Echantillon	THLAB1
	Flux	20 mW
	Rayon	0,012 m
	Epaisseur	1,95E-03 m
	Conditions Limites CL	Milieu semi infini
	Point de départ (temps) nstart	1
	Nombre de points nt	200
	Pas de temps dt (s)	0,4
	Nombre d'états nstates	40000
	Nombre des premiers états éliminés nburn	20000
Résultats	Coefficient pour bouger les paramètres epsi	[0,002 0,002 0,002 0,002]
	Nombre d'états acceptés / Nombre d'états compteur	0,2023
	Conductivité k [W/m.K]	0,282
	Chaleur volumique roc	3,52E+06
	Résistance de contact Rc	5,50E-04
	Capacité de la sonde C_s	20,22

La Figure 47 montre l'évolution des chaînes de Markov des paramètres. L'écart résiduel reste élevé aux temps courts, mais devient acceptable aux temps longs (Figure 48). La sensibilité de la sonde C_s est presque nulle, c'est pourquoi cela converge mal. La sensibilité de la résistance de contact a peu d'influence par rapport à la conductivité thermique et la chaleur volumique (*Partie 3.3.2 Méthode - Etude de sensibilité des paramètres*).

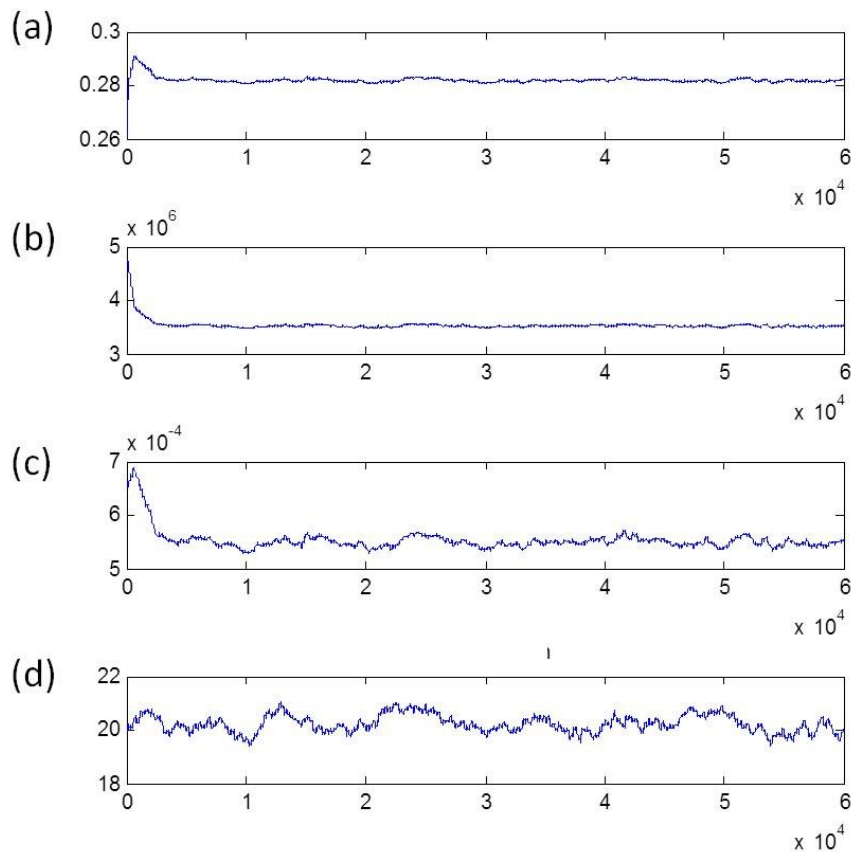


Figure 47 – Evolution des chaînes de Markov : (a) Conductivité thermique, (b) Chaleur volumique, (c) Résistance de contact, (d) Capacité de la sonde

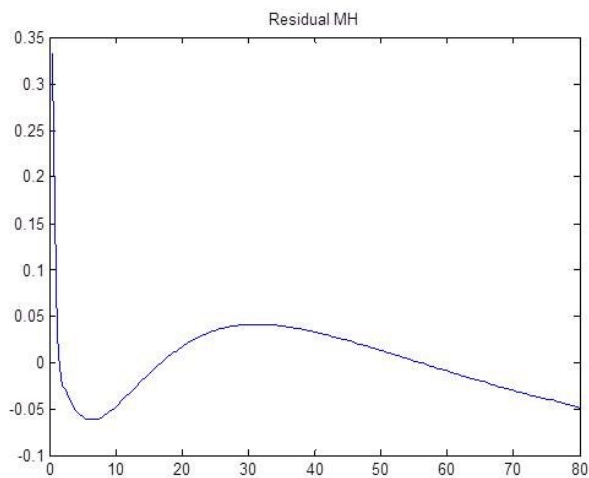


Figure 48 - Ecart résiduel entre le modèle et l'expérience

Nous avons calculé la conductivité thermique pour chaque configuration de luminophore (Tableau 7). Pour deux luminophores, la conductivité thermique est supérieure à celle de l'encapsulant seul. Il est difficile de conclure sur l'influence de la concentration du luminophore sur la conductivité thermique des pastilles. La conductivité thermique moyenne des luminophores sera choisi arbitrairement autour de 0,23 W/m.K, qui correspond à la moyenne des conductivités.

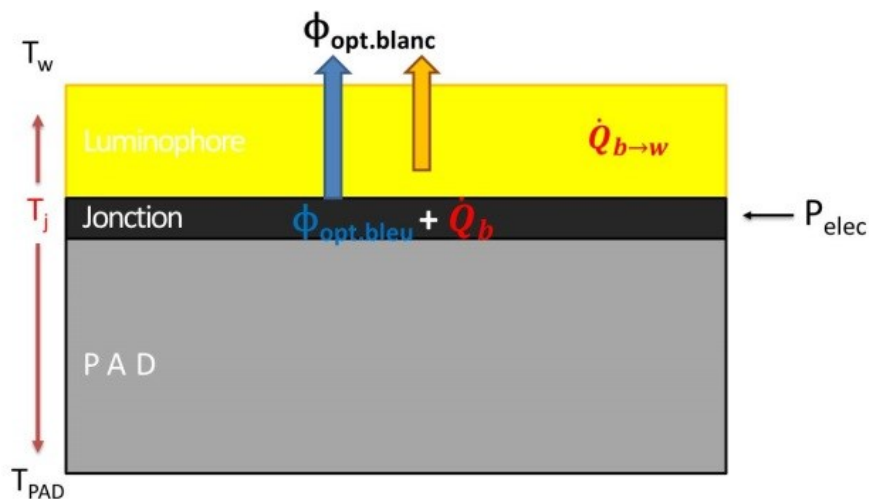
Tableau 7 - Résumé des conductivités thermiques

	Conductivité thermique k [W/m.K]	Chaleur spécifique ρc_p [J/kg.K]
Encapsulant	0,198	1,95e+06
THLAK à 20%	0,180	5,77e+06
THLAB1 à 40%	0,282	3,52e+06
THLAA1 à 60%	0,260	8,00e+06

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé, grâce à différentes analyses, les matériaux constituant la LED que nous avons choisi. L'analyse au MEB a mis, notamment, en valeur que la jonction se situe à la surface de la puce nue. L'analyse par microsonde a servi à établir que la couche de luminophore est constitué de deux types de particules.

Nous nous intéressons ensuite à la caractérisation du flux lumineux, de manière globale ou locale, en sorti de la puce avec ou sans luminophore.



Chapitre 3 - Caractérisation optique de puces nues et avec luminophore

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude optique de nos LEDs émettant de la lumière bleue et de la lumière blanche. Le flux visible émis par les puces est mesuré grâce à une sphère intégrante, puis le rendement de celles-ci est calculé pour différentes alimentations et différentes températures de PAD. Cela nous permet de montrer que le rendement de manière significative avec la hausse du courant et de façon moindre avec l'augmentation de la température du PAD.

Ensuite nous nous intéressons à l'homogénéité du flux optique sur la surface de la puce. Un banc automatisé a été mis en place pour mesurer la luminance énergétique spectrale émis par petites surfaces de la puce (moins de $1 \mu\text{m}^2$), afin d'obtenir une cartographie de la luminance énergétique. L'hétérogénéité augmente avec la hausse du courant, quel que soit le type de LED : la luminance énergétique est plus importante près des plots d'or.

Dans ce chapitre, la température du PAD, base de la LED (Figure 15), est imposée pour chaque mesure optique effectuée, que ce soit pour une mesure globale ou locale. Un thermo-élément Peltier est collé avec une interface thermique (ou résistant à la chaleur) sur la face inférieure du PCB. La température du PAD est contrôlée au niveau d'une pastille de cuivre du PCB, décrite dans le chapitre précédent, partie 1.2 Création des supports d'implantation, par deux manières :

- avec un thermocouple ;
- par thermographie infrarouge après avoir peint la pastille de cuivre avec une peinture noire d'émissivité proche de 0,96.

1 Mesure du flux global lumineux visible

1.1 Description du banc

Nous avons mesuré le flux lumineux ϕ_{opt} (en watt) pour d'obtenir le spectre dans le visible de puces avec luminophore (lumière blanche) et de puce nue (lumière bleue) grâce à un spectromètre relié à une sphère intégrante de 50 cm par une fibre optique (Figure 49), à LED Engineering Development.

La sphère intégrante est un outil indispensable pour de nombreuses mesures photométriques, notamment les mesures de flux émis par une source lumineuse. La sphère produit un éclairage uniforme sur toute sa surface interne : la cavité sphérique creuse est recouverte d'un traitement diffusant blanc.

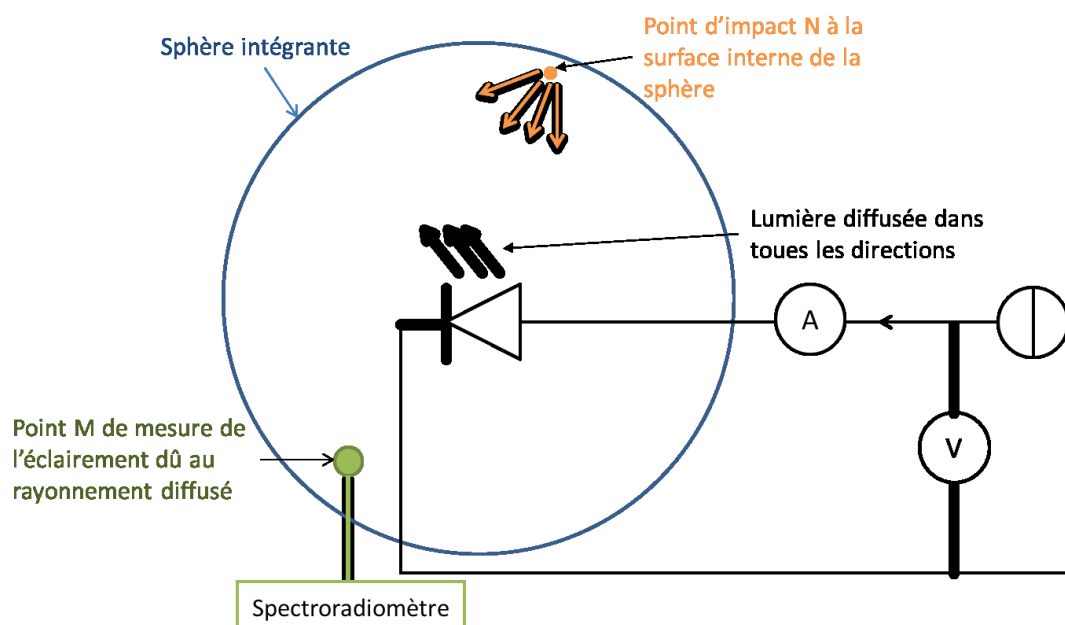


Figure 49 – Schéma de mesure du flux global lumineux

Au même moment de la mesure de flux lumineux, des multimètres mesurent la tension et le courant d'alimentation de la LED (Figure 50). Nous calculons ainsi la puissance injectée en watt.

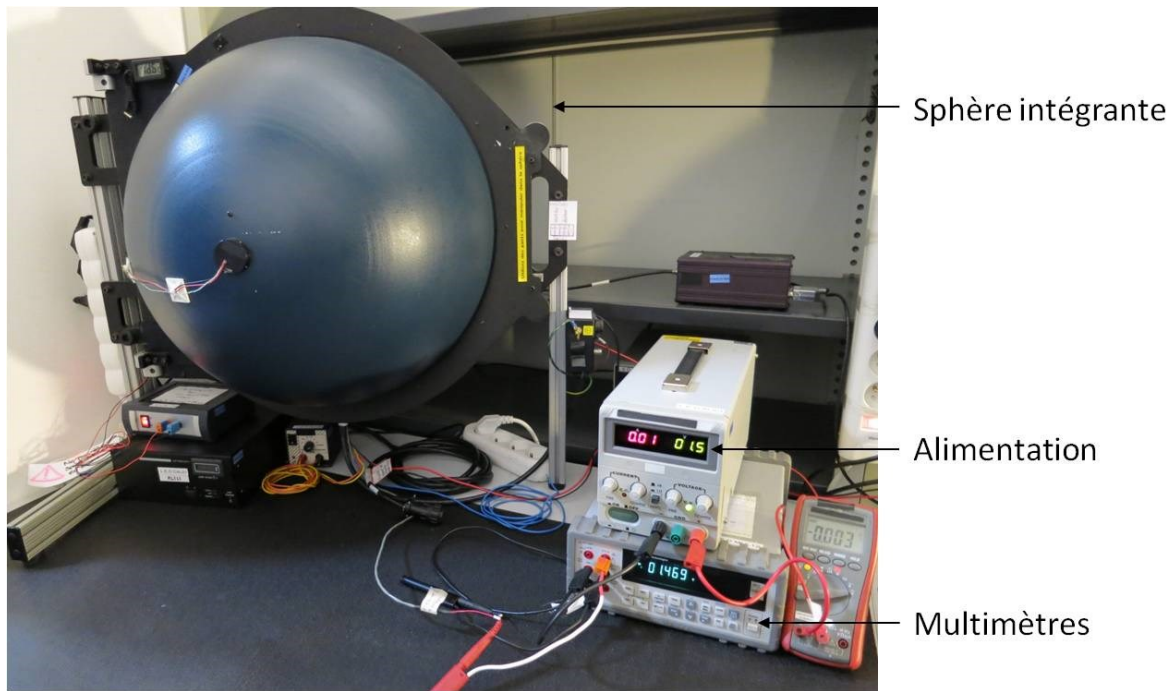


Figure 50 - Banc pour la mesure de flux lumineux

Pour calculer le rendement de la LED, nous comparons le flux lumineux mesuré à la puissance électrique injectée dans la LED. La puissance perdue correspond à la chaleur générée au niveau de la puce et du luminophore. Une partie de cette chaleur est transférée par conduction vers le PAD, et par convection et rayonnement dans l'environnement.

Nous avons mesuré le flux lumineux d'une puce nue et d'une puce avec luminophore pour cinq valeurs imposées du courant électrique (200 mA, 350 mA, 700 mA, 1 A et 1,5 A) et pour trois températures (25 °C, 55 °C et 85 °C) imposées grâce à un thermo-élément Peltier. La mesure de température est faite en surface du circuit imprimé avec une caméra infrarouge.

1.2 Mesure d'une puce nue

Pour chaque température de PAD et chaque puissance électrique appliquée, le flux optique visible est mesuré. La longueur d'onde $\lambda_{\max}$ où le flux atteint son maximum est relevée. Le rendement de la LED est calculé grâce à la puissance électrique injectée P_{elec} et au flux optique $\phi_{opt.b}$ (Tableau 8).

Tableau 8 - Résultats des mesures de flux pour une puce nue

Températures [°C]	25 °C					55 °C					85 °C				
Tension [V]	2,90	3,03	3,23	3,34	3,47	2,79	2,91	3,10	3,21	3,36	2,72	2,83	3,01	3,12	3,27
Courant [A]	0,19	0,35	0,70	1,00	1,50	0,19	0,35	0,70	1,00	1,50	0,20	0,35	0,70	1,00	1,50
P_{elec} [W]	0,58	1,06	2,26	3,34	5,21	0,552	1,019	2,170	3,210	5,043	0,54	0,99	2,11	3,123	4,91
$\phi_{opt.b}$ [W]	0,249	0,417	0,738	0,941	1,191	0,239	0,392	0,689	0,863	1,075	0,224	0,365	0,624	0,788	0,953
Rendement [%]	43%	39%	33%	28%	23%	43%	38%	32%	27%	21%	41%	37%	30%	25%	19%
$\lambda_{\max}$ [nm]	470,0	468,2 5	467,0	466,75	466,75	472,0	470,0	469,25	467,25	467,25	472,75	472,25	469,5	469,25	469,5

Les mesures électriques permettent de tracer l'intensité en fonction de la tension pour les différentes températures du PAD T_{PAD} (Figure 51). Ces courbes sont spécifiques aux diodes. L'augmentation de la température du PAD conduit à la diminution de la tension, pour un courant imposé, donc de la puissance électrique consommée par la LED.

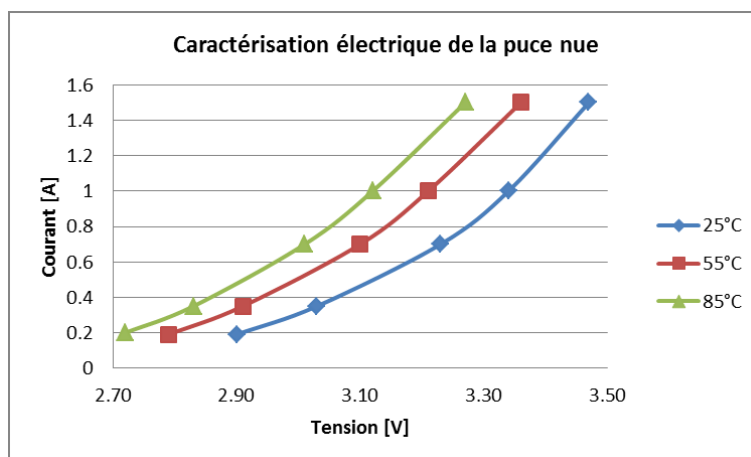


Figure 51 - Caractérisation électrique d'une puce nue pour différents T_{PAD}

Le rendement diminue faiblement avec l'augmentation de la température du PAD (baisse moyenne de 3 % pour une augmentation de 60 °C), et diminue de moitié avec l'augmentation de 1,3 A de l'intensité du courant.

La puissance électrique non transformée en flux optique bleu est convertie en chaleur $\dot{Q}_b$, ce qui conduit à :

- une augmentation de la température de la puce ;
- une augmentation du rayonnement infrarouge ;
- un flux conductif à travers le composant vers le circuit imprimé.

La longueur d'onde maximum augmente avec l'augmentation de la température du PAD T_{PAD} et diminue avec l'intensité du courant I . Nous définirons la déviation chromatique comme la déviation du spectre lumineux avec l'augmentation de la température ou la diminution du courant.

1.3 Mesure d'une puce avec luminophore

Nous retrouvons des comportements similaires pour une puce avec luminophore (Tableau 9) : baisse du rendement de la puce avec l'augmentation de T_{PAD} et du courant I . Le flux lumineux $\phi_{opt.w}$ de la puce avec luminophore est inférieur à celui de la puce nue car une partie du flux bleu est absorbée et réémise avec un rendement par le luminophore. La déviation chromatique est peu visible, car deux déviations chromatiques rentrent en jeu : celle de la puce nue et celle du luminophore. La lumière créée au niveau de la puce évolue en fonction de T_{PAD} et du courant, ce qui induit un changement de la longueur d'onde d'émission du luminophore. De plus, la température influe aussi sur la photo-conversion du luminophore : le pic d'émission va se déplacer vers de longueur d'ondes supérieures ou inférieures suivant le type de luminophore.

Tableau 9 - Résultats des mesures de flux pour une LED avec luminophore

Températures [°C]	25 °C					55 °C					85 °C				
Tension [V]	2,90	3,03	3,23	3,36	3,53	2,82	2,93	3,12	3,25	3,43	2,76	2,86	3,05	3,18	3,36
Courant [A]	0,19	0,35	0,69	1,00	1,50	0,19	0,35	0,69	1,00	1,50	0,19	0,35	0,69	1,00	1,50
P_{elec} [W]	0,58	1,06	2,26	3,36	5,30	0,561	1,026	2,181	3,250	5,145	0,55	1,00	2,13	3,18	5,04
$\Phi_{opt.b}$ [W]	0,178	0,292	0,508	0,646	0,788	0,168	0,275	0,470	0,587	0,682	0,157	0,250	0,420	0,518	0,566
Rendement [%]	31 %	28 %	22 %	19 %	15 %	30 %	27 %	22 %	18 %	13 %	29 %	25 %	20 %	16 %	11 %

1.4 Conclusion

La baisse du rendement, lorsque l'intensité du courant augmente, peut s'expliquer par l'effet d'Auger d'après des travaux publiés en 2013 [46] [47]. L'effet Auger se manifeste lorsque la densité d'électrons traversant le semi-conducteur est grande. Une paire électron-trou peut ne pas se recombiner en émettant un photon, mais en excitant un deuxième électron sous forme d'énergie cinétique. Ce dernier est appelé électron Auger. Son énergie excédentaire est dissipée sous forme de chaleur.

Ces premières mesures optiques que la température a un petit rôle sur l'alimentation électrique de la LED et sur ces performances optiques, telles que la longueur d'onde λ_{max} où le flux atteint son maximum.

2 Cartographie de la luminance énergétique spectrale

Le banc précédent a permis de mesurer le spectre des LEDs de façon globale. Nous souhaitons mesurer ce spectre localement sur les puces afin de savoir si le flux est homogène sur toute la partie de la puce. L'observation locale du flux lumineux permet de révéler des défauts locaux au niveau de la puce ou du luminophore qui ne sont pas détectables dans une mesure globale. Ces défauts peuvent se manifester par une longueur d'onde ou une intensité différente.

2.1 Description du banc

L'objectif de ce banc est de mesurer le spectre visible en des points précis de la surface de la puce afin d'évaluer l'évolution du spectre en fonction de la position sur la puce, du courant d'alimentation de la puce et de la température imposée à la surface du PAD.

De plus, ce banc n'est pas spécifique à nos LEDs d'étude, d'autres modules lumineux peuvent être étudiés.

La dimension des puces est proche du millimètre carré. La surface lumineuse de la LED est agrandie grâce à un objectif de microscope, qui est placée à quelques centaines de microns de la surface de la puce. Une fibre optique, de diamètre de 100 nm, est placée au plan image de l'objectif, dans notre cas à 0,57 m au-dessus de l'objectif ; cette distance dépend de l'objectif et de la LED utilisés. La fibre récupère la lumière en un point de la surface lumineuse. Afin de connaître la position précise de la fibre sur la surface lumineuse, la fibre est fixée sur un écran blanc, sur lequel est projetée la surface lumineuse (Figure 52). L'angle

solide entre la sortie de l'objectif et l'écran est $0,22 \text{ sr}^{13}$. La lumière récupérée par la fibre est transmise à un spectroradiomètre.

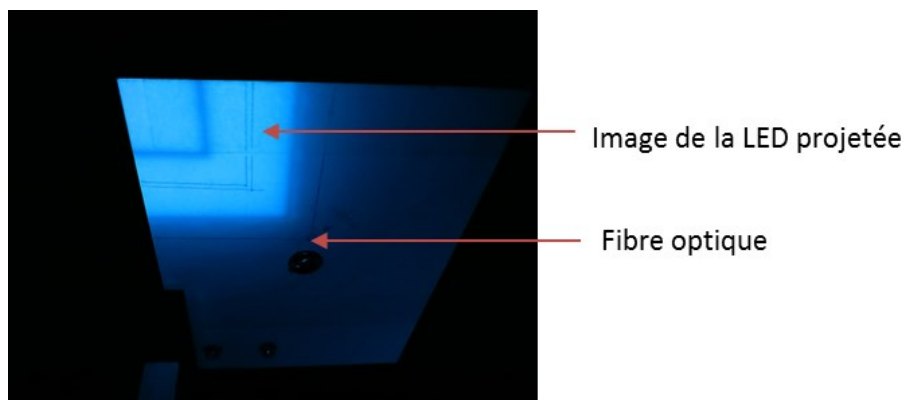


Figure 52 - Acquisition du spectre en un point de la surface lumineuse par la fibre

La LED est fixée sur un support mobile micrométrique dans les trois directions, x, y et z. Les déplacements en x et en y ont été obtenus grâce à des butées micrométriques motorisées pilotées depuis un PC par un programme informatique réalisant des séquences de positionnement automatiques. Cela permet d'obtenir des mesures précises (tolérance de $1 \mu\text{m}$) en plusieurs milliers de points de la puce, afin d'avoir une cartographie du flux optique dans le visible. La LED est positionnée sur un thermo-élément Peltier régulé qui impose la température au niveau du PAD (Figure 53).

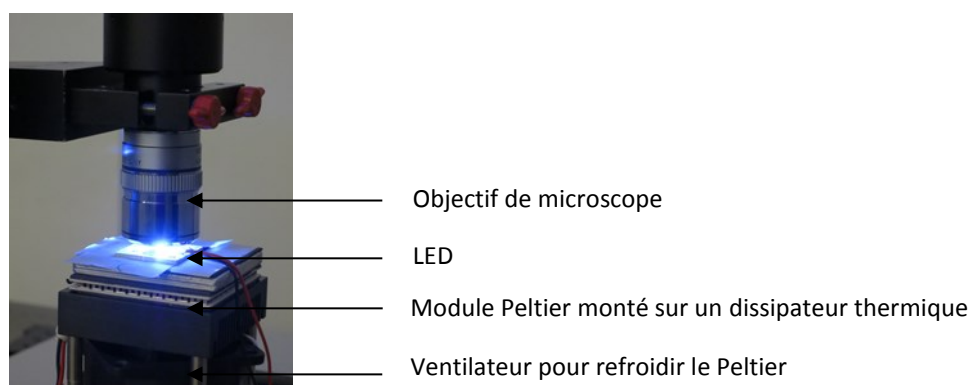


Figure 53 - Vue rapprochée du banc de cartographie de luminance énergétique spectrale

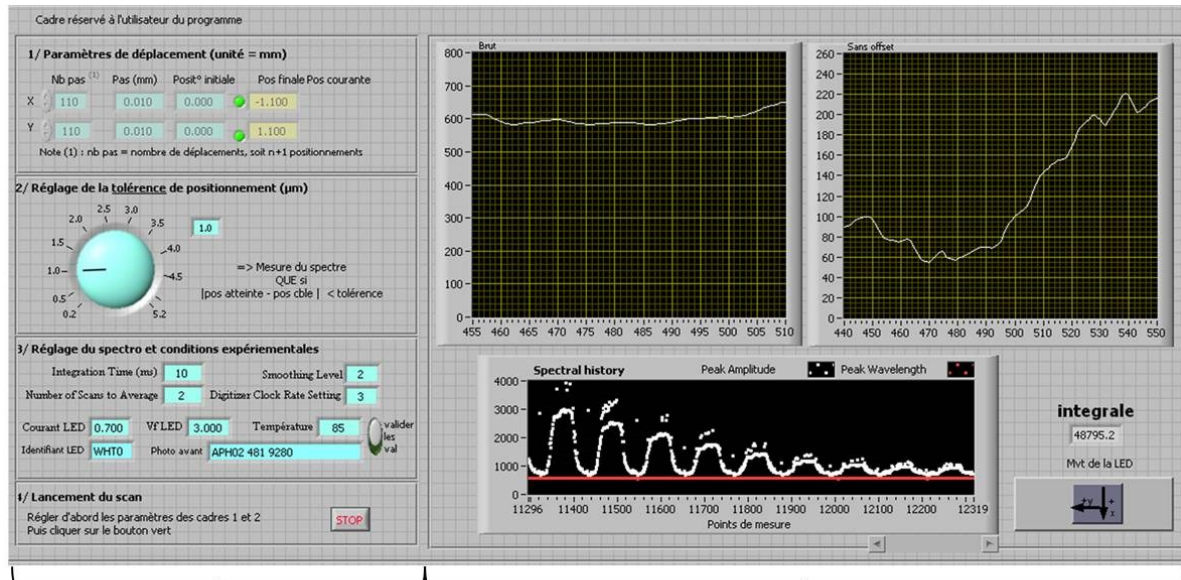
La gestion du positionnement de la puce et la récupération du spectre lumineux ont été automatisés grâce au programme LabVIEW. Une interface a été créée spécialement pour ce banc (Figure 54). Elle nous permet de gérer les paramètres liés au déplacement de la puce :

- le nombre de pas voulue en x et en y,
- le déplacement entre chaque pas en x et en y,
- la tolérance souhaitée dans le déplacement de la puce,

et les paramètres liés au spectroradiomètre :

- le temps d'intégration en microseconde,
- le nombre de mesure pour faire la moyenne,
- le niveau de lissage.

¹³ Calcul de l'angle solide : $\Omega = Surface/Distance^2$



Gestion des paramètres

Récupération des données

Figure 54 - Interface créée sous LabVIEW

Dans cette interface, nous indiquons quelle LED nous étudions, son courant et sa tension d'alimentation, la température du PAD et le numéro de la photographie faite au point (0,0). Pendant une cartographie, nous voyons apparaître, pour le dernier point de mesure, le spectre lumineux et l'évolution de l'intégrale du spectre lumineux pour les mille derniers points de mesure.

2.2 Méthode de mesure

Le spectre obtenu avec le banc de cartographie **C** ne représente pas le spectre « vrai » émis par la puce. En effet, la lumière émise par la puce est atténuée par l'objectif de microscope et la fibre optique. Nous devons identifier la fonction d'étalonnage F_T entre la puce et les valeurs obtenues par le spectroradiomètre du banc de cartographie. Pour cela nous procédons à plusieurs étapes (Figure 55) :

- 1- L'éclairement spectral S ($\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$), ou éclairement énergétique, en anglais *spectral irradiance*, est mesuré en fonction de la longueur d'onde (nm) de la LED, alimentée à un courant I et à une température T_{PAD} , directement avec un spectroradiomètre calibré. Celui-ci est placé à une distance choisie, comme le compromis entre le rapport signal sur bruit du spectroradiomètre et la nécessité de se placer à une distance suffisante grande de la source pour que son étendue soit considéré comme négligeable.
- 2- L'éclairement spectral S est multiplié par le coefficient K et la fonction $V(\lambda)$: K est égal à 683 lm.W^{-1} et $V(\lambda)$ correspond à la sensibilité de l'œil en fonction de la longueur d'onde. Il en résulte le spectre S_1 que nous normalisons, ensuite, par rapport à son intégrale : obtention du spectre S_2 sans unité.
- 3- Nous mesurons la luminance L (exprimé cd.m^{-2} ou $\text{lm.sr}^{-1}.\text{m}^{-2}$) de la surface de la puce au courant I et à la température T , grâce à une caméra de luminance. Nous calculons la luminance moyenne L_{moy} de la puce. Cette valeur est multipliée au spectre S_2 pour obtenir le spectre S_3 .

- 4- Le spectre S_3 est divisé par le coefficient K et la fonction $V(\lambda)$ pour obtenir le spectre S_4 qui donne la luminance énergétique¹⁴ spectrale ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$), également nommée radiance spectrale.
- 5- Le banc de cartographie donne le spectre brut de chaque point de la puce alimentée à un courant I et à une température T_{PAD} . Avec la moyenne de tous ces spectres, nous obtenons le spectre C_{moy} .
- 6- La fonction d'étalonnage F_T , pour le courant I et la température T , est obtenue par division du spectre S_4 par le spectre brute moyen C_{moy} obtenu par le banc de cartographie.

$$F_T(\lambda) = S_4(\lambda)/C(\lambda) \quad \text{Eq. 15}$$

- 7- En post-traitement, à tous les points de mesure de la même cartographie, avec laquelle C_{moy} a été obtenue, la fonction d'étalonnage est multipliée à chaque spectre brut obtenu. Ainsi, en chaque point, la luminance énergétique spectrale est obtenue.

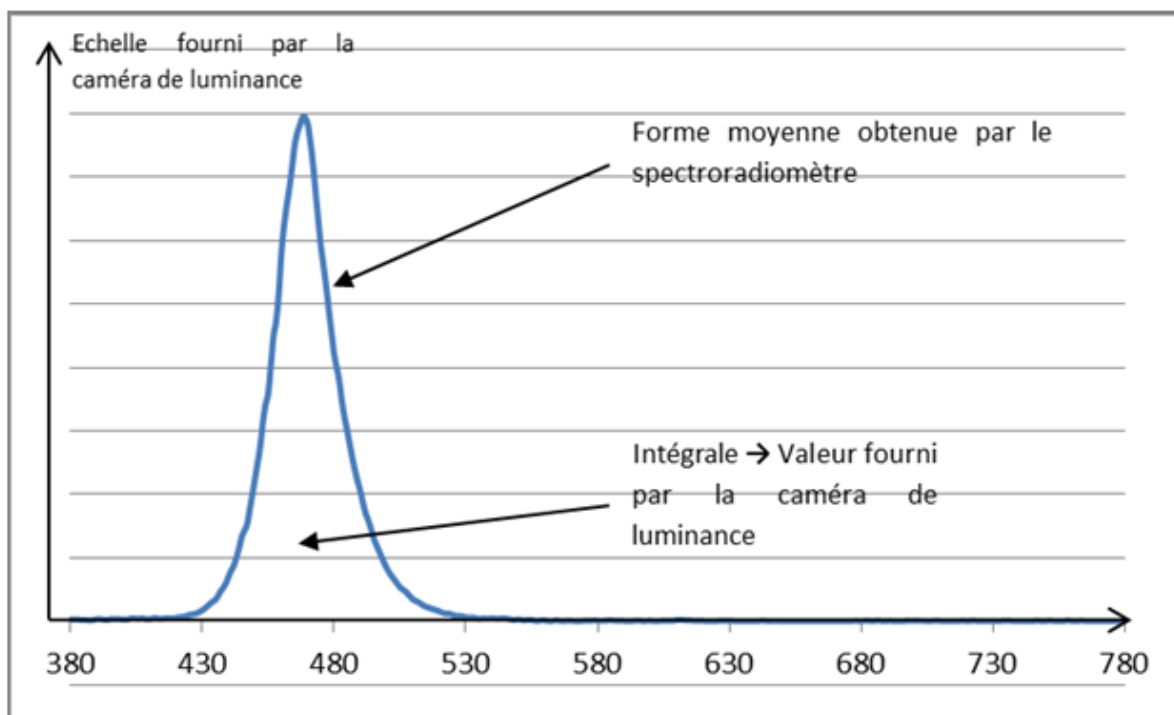


Figure 55 - Schéma explicatif

La température du PAD est mesurée grâce à une caméra infrarouge, sur une pastille de cuivre du PCB peinte en noire.

2.3 Etude d'une puce nue

L'étude de la puce nue BLU04 a été portée sur :

- cinq mesures de luminances faites à cinq courants d'alimentation différents (200 mA, 350 mA, 700 mA, 1 A et 1,5 A) à 25 °C ;

¹⁴ La définition de la luminance énergétique est la quantité de radiation étant émis par une surface dans un certain angle solide.

- trois mesures de spectres faites à trois courants différents (200 mA, 350 mA et 700 mA) à 25 °C ;
- neuf cartographies de luminances énergétiques spectrales: trois courants (200 mA, 350 mA et 700 mA) et à trois températures (25 °C, 55 °C et 85 °C).

2.3.1 Mesure de luminance

Des clichés de luminances ont été pris pour cinq courants (200 mA, 350 mA, 700 mA, 1 A et 1,5 A) avec $T_{PAD} = 25$ °C. L'unité des mesures de luminance est le candéla par mètre carré (cd/m^2). La moyenne de la luminance de la puce augmente avec le courant d'alimentation de la LED. Nous comparons la luminance moyenne de deux zones : celles proche des plots d'or et celle éloignée des plots d'or (Figure 56). L'écart de luminance entre ces deux zones augmente avec le courant de manière plus linéaire que la moyenne de la luminance de la puce (Figure 57).

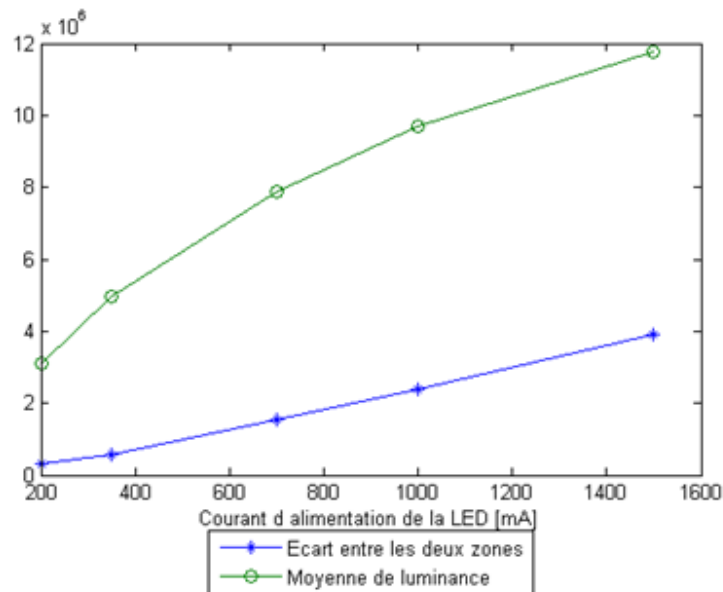
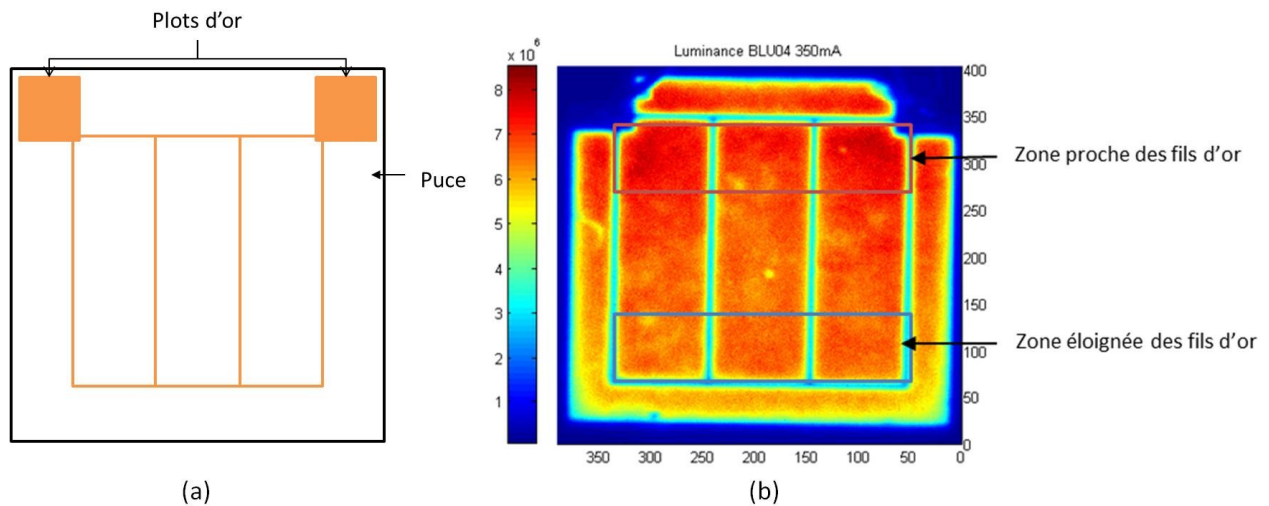


Figure 57 - Evolution de la luminance [cd/m^2] en fonction du courant d'alimentation [mA] de la LED

2.3.2 Mesures de la luminance énergétique spectrale moyenne

La luminance énergétique spectrale moyenne ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$) de la puce nue a été calculée pour trois courants d'alimentation (200 mA, 350 mA et 700 mA) et trois températures (25 °C, 55 °C et 85 °C).

Evolution en fonction de la température

La luminance énergétique spectrale diminue entre 25 °C et 85 °C, quel que soit le courant d'alimentation, voir l'exemple pour 200 mA (Figure 58). Avec l'augmentation de la température, la tension d'alimentation baisse aussi, il y a moins de puissance consommée, environ 7 % entre 25 °C et 85 °C. Pour comparer facilement, nous calculons l'intégrale de la luminance énergétique spectrale entre 380 nm et 780 nm (lumière visible) qui correspond à la luminance énergétique ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$).

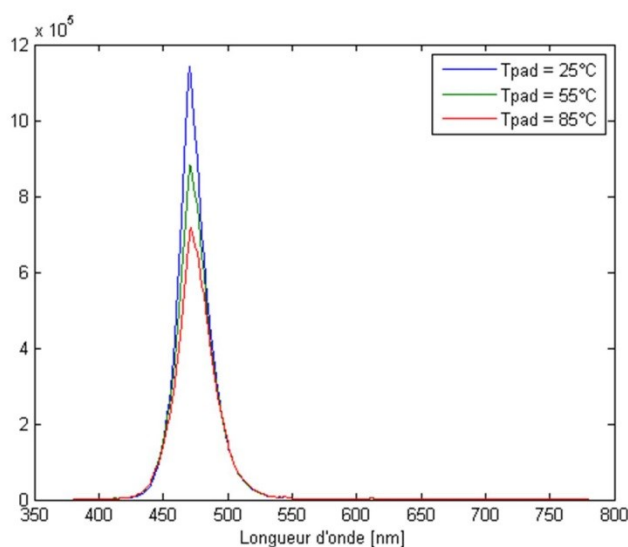


Figure 58 - Luminance énergétique spectrale [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$] à 200 mA

Evolution du spectre en fonction du courant

L'augmentation du courant conduit à une augmentation de la luminance énergétique spectrale moyenne de la puce (Figure 59). Cette augmentation semble créer une déviation chromatique très légère de la luminance maximale énergétique spectrale vers des longueurs d'onde plus faible (Tableau 10). Vu que l'augmentation de la température conduit à une baisse de la luminance, nous obtenons, par exemple, la même luminance moyenne pour les couples suivants 200 mA – 25 °C et 350 mA – 55 °C.

Tableau 10 - Longueur d'onde pour laquelle la luminance est maximale

[nm]	25 °C	55 °C	85 °C
200 mA	470	471	472
350 mA	470	470	472
700 mA	469	469	469

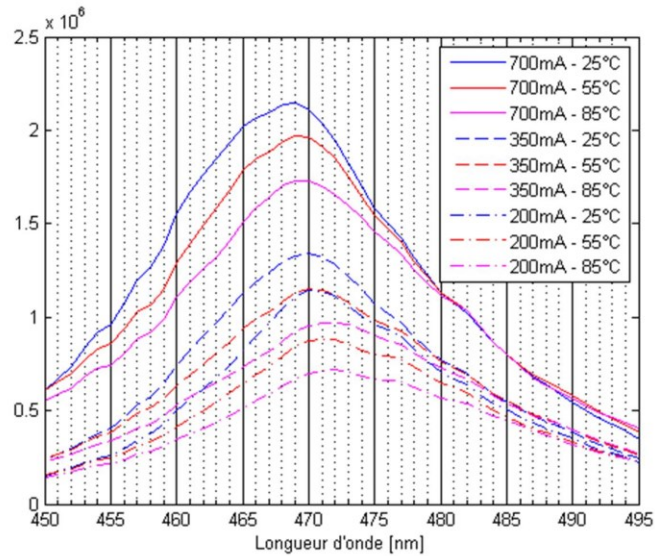


Figure 59 - Courbe de luminance énergétique spectrale moyenne à plusieurs courants et températures – Zoom entre 450 nm et 495 nm

2.3.3 Cartographie de la luminance énergétique

Les cartographies que nous avons menées ont été toujours effectuées avec le même pas (10 μm). Le temps d'intégration du spectroradiomètre a été adapté afin de ne pas être à saturation. Pour chaque point, nous obtenons la luminance énergétique spectrale ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$) et nous calculons la luminance énergétique pour les longueurs d'onde entre 380 nm et 780 nm et la luminance énergétique pour la lumière bleue (entre 442 et 502 nm).

Le Tableau 11 résume l'ensemble des cartographies faites pour les trois courants (200 mA, 350 mA et 700 mA) et les trois températures T_{PAD} (25 °C, 55 °C et 85 °C). Ce tableau permet de remarquer l'évolution de l'hétérogénéité du flux lumineux avec l'augmentation de la température et avec l'augmentation du courant d'alimentation. Afin de faciliter les comparaisons, pour chaque cartographie, nous nous sommes intéressés à deux zones particulières : une près des plots en or et une éloignée des plots en or (Figure 60).

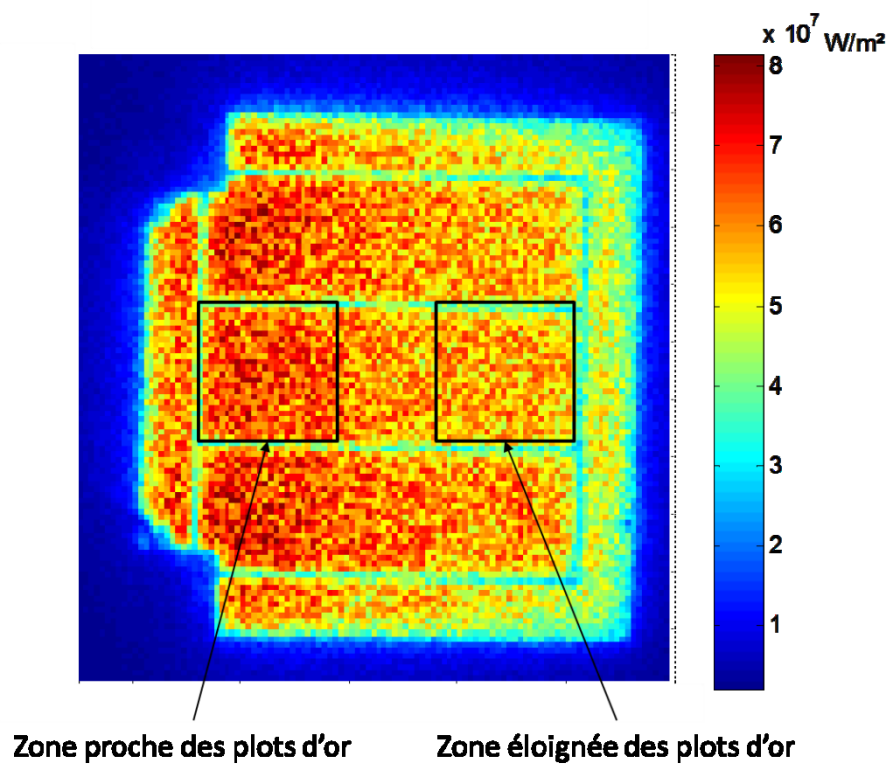
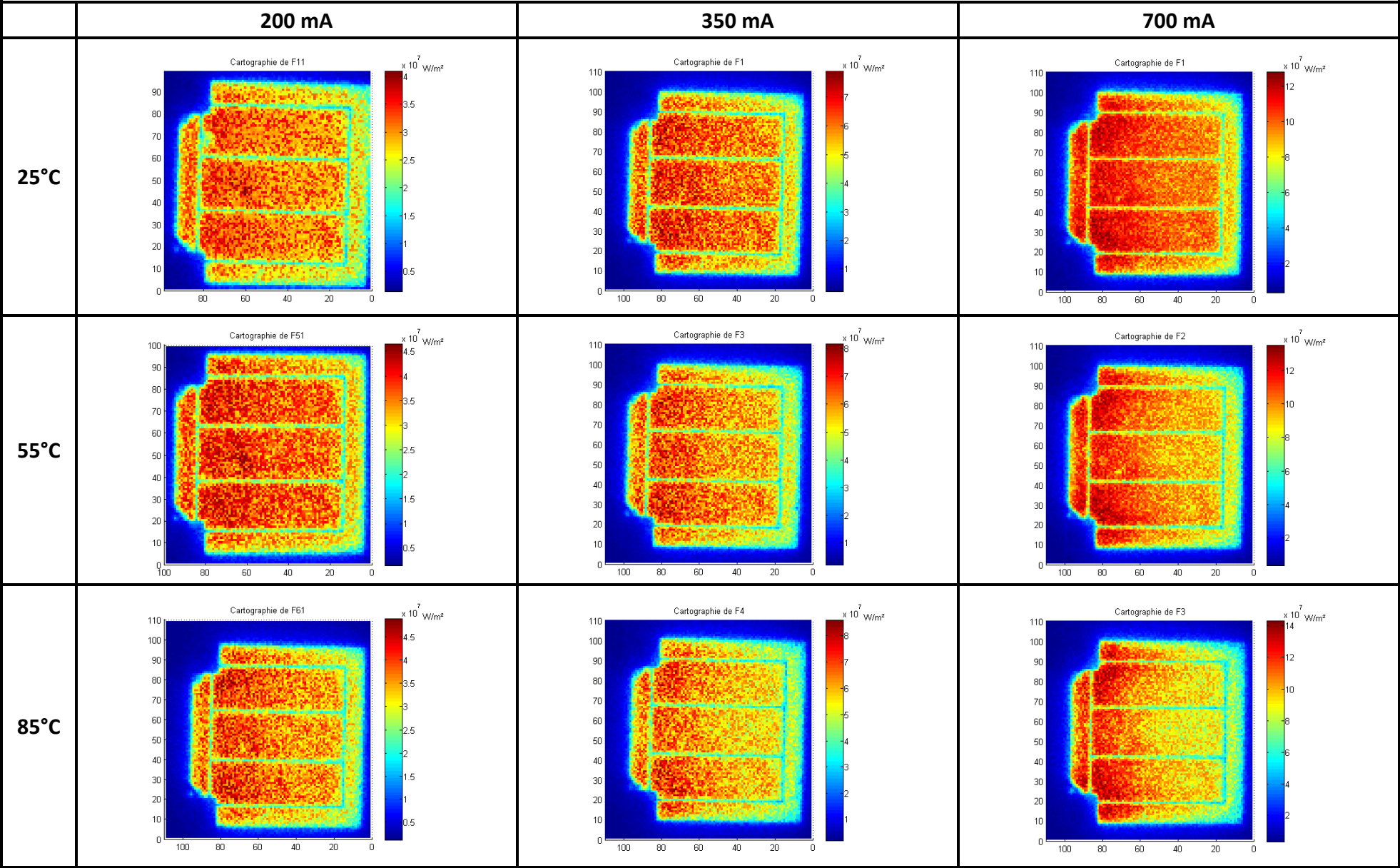


Figure 60 - Comparaison de deux zones de la cartographie de puce nue alimentée à 350 mA et avec $T_{PAD}=55^\circ\text{C}$

Tableau 11 - Résumé des cartographies de luminance énergétique [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$] de la puce bleue



Comme nous avons vu dans la partie précédente, la luminance énergétique moyenne de la puce diminue avec la température. La luminance énergétique diminue dans chaque zone avec l'augmentation de la température mais l'écart entre les deux zones augmente (Figure 61). Avec un courant de 200 mA ou 350 mA, l'augmentation de l'écart est de 43 % entre 25 °C et 85 °C, alors que pour un courant de 700 mA, l'augmentation est de 63 %.

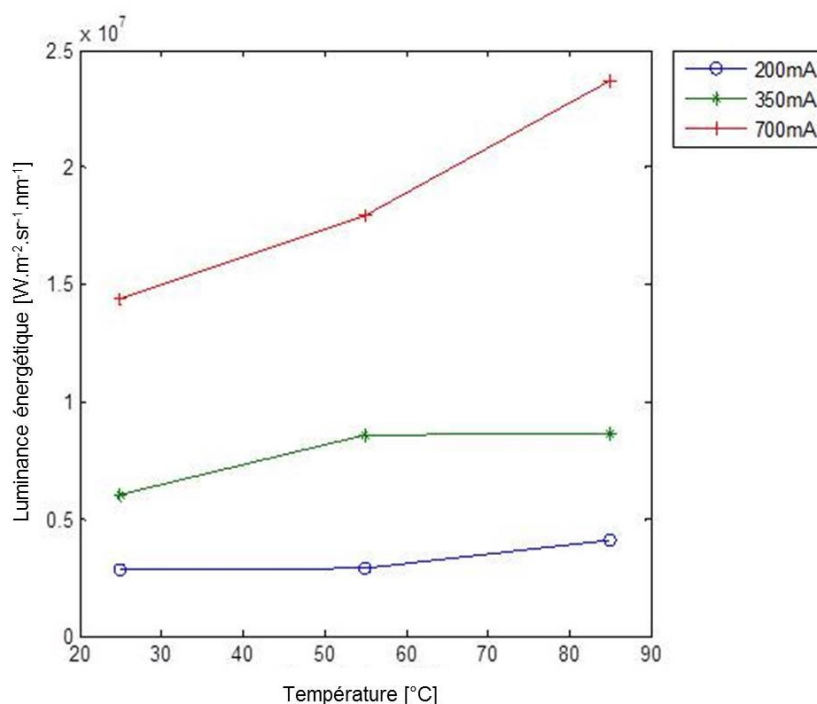


Figure 61 - Influence sur l'écart entre les deux zones étudiées [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$]

Les figures ci-dessus illustrent aussi que l'écart entre les deux zones augmente fortement avec le courant pour une température donnée. L'écart de la luminance énergétique entre les deux zones a été multiplié en moyenne par 5,6, entre 200 mA et 700 mA.

Il semblerait que le courant électrique devienne moins homogène à la surface de la puce quand l'intensité du courant augmente : le courant passe en majorité entre les deux plots d'or. Cela conduit à une plus grande production de lumière dans les zones situées près des deux plots d'or.

2.4 Etude d'une puce avec luminophore

2.4.1 Mesure de luminance

Des clichés de luminances ont été pris pour cinq courants (200 mA, 350 mA, 700 mA, 1 A et 1,5 A) à 25 °C grâce à une caméra de luminance. L'unité des mesures de luminance est le candela par mètre carré (cd/m^2). La moyenne de la luminance de la puce augmente avec le courant d'alimentation de la LED (Figure 63). La couche de luminophore au-dessus de la puce donne l'impression que le cliché de luminance est moins net (Figure 62).

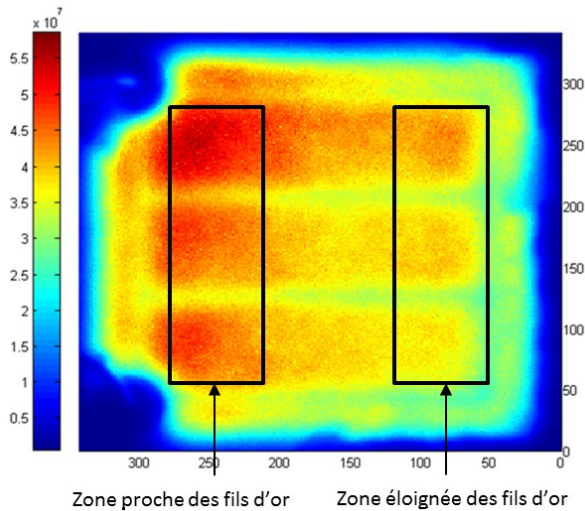


Figure 62 - Luminance de la puce blanche alimentée à 700 mA

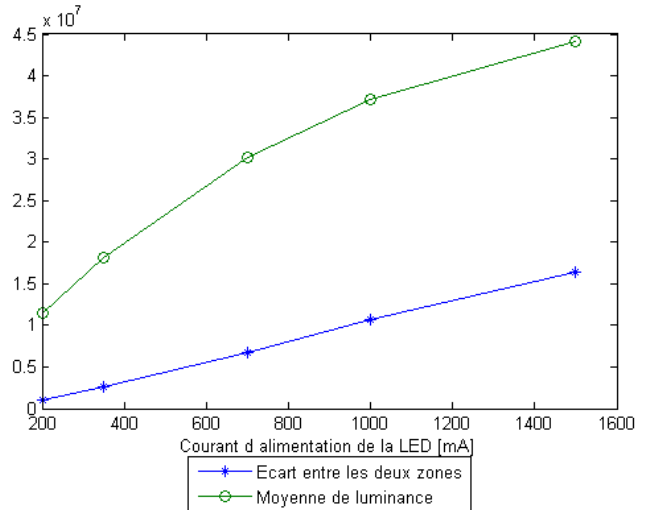


Figure 63 - Influence du courant sur la luminance [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$]

Nous remarquons aussi que la luminance est plus importante près des fils d'or. L'écart entre la zone près des fils d'or et la zone éloignée augmentent aussi avec le courant. Cette observation est sûrement due à l'évolution de la répartition du courant à la surface de la puce (Plus d'explication Chapitre 5).

2.4.2 Mesures de la luminance énergétique spectrale moyenne

Comme pour la puce nue, la luminance énergétique spectrale moyenne a été calculée pour cinq courants d'alimentation (200 mA, 350 mA, 700 mA, 1 A et 1,5 A) et trois températures T_{PAD} (25 °C, 55 °C et 85 °C).

Nous retrouvons le même comportement que pour la puce nue : une baisse de la luminance énergétique spectrale avec une augmentation de la température T_{PAD} (Figure 64). Cette baisse de flux a été aussi mesurée globalement grâce à la sphère intégrante (Partie 1.3 Mesure d'une puce avec luminophore). L'écart de luminance entre 25 °C et 85 °C passe de 13 % à 200 mA, à 21 % à 1,5 A.

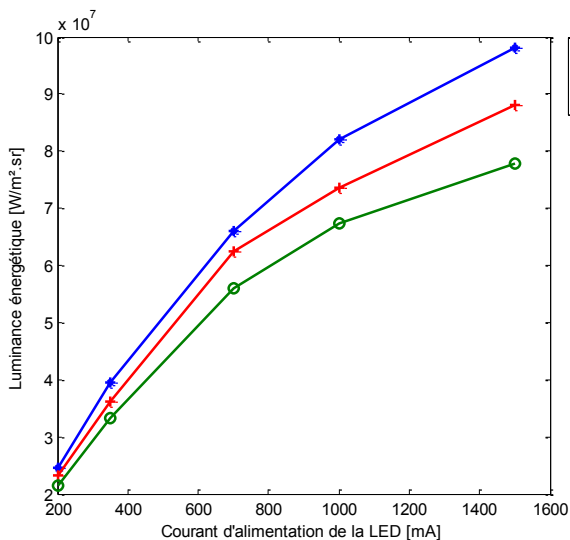


Figure 64 - Luminance énergétique moyenne [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$] à différents courants pour une puce avec luminophore

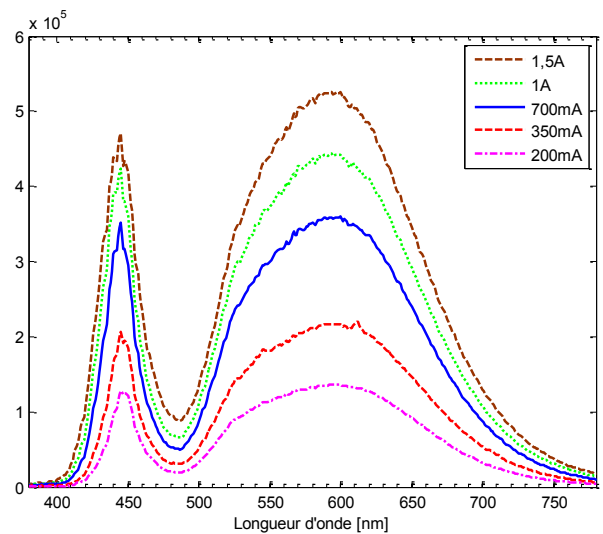


Figure 65 - Comparaison des luminances énergétiques spectrales [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$] à 25 °C

Pour une température T_{PAD} donnée, quand le courant d'alimentation augmente, le rendement de la LED baisse. Cela conduit à une augmentation non linéaire de la luminance énergétique spectrale en fonction du courant d'alimentation : alors que le courant augmente de 7,5 fois, la luminance n'augmente que d'environ 4 fois (Figure 65).

2.4.3 Cartographie de la luminance énergétique

Les cartographies ont été effectuées avec un pas de 10 μm . Pour chaque point, nous obtenons la luminance énergétique spectrale ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$), nous calculons la luminance énergétique pour la lumière visible (les longueurs d'onde comprises entre 380 nm et 780 nm), pour la lumière bleue (entre 442 nm et 502 nm) et la lumière jaune (550 nm et 660 nm).

Dans le Tableau 12, nous avons résumé toutes les cartographies pour chaque courant et chaque température T_{PAD} . Comme pour la puce nue, nous remarquons que l'hétérogénéité de la luminance énergétique spectrale sur la puce progresse avec l'augmentation de la température et du courant. Pour mettre en évidence cette hétérogénéité, nous avons calculé l'écart de luminance en pourcentage entre la zone près des plots d'or et la zone éloignée, en fonction du courant d'alimentation (Figure 66). L'écart est proche de 30 %, quel que soit la température, avec un courant de 1,5 A, alors qu'il est en dessous de 10 % pour un courant de 0,2 A. À part pour le cas 1,5 A de courant, l'écart est supérieur pour une température de 85 °C, et il est inférieur pour une température de 25 °C.

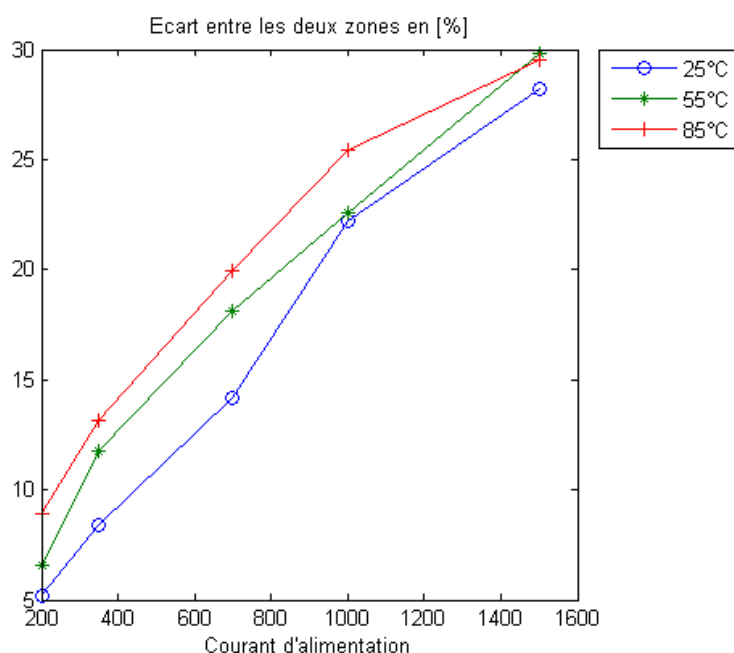
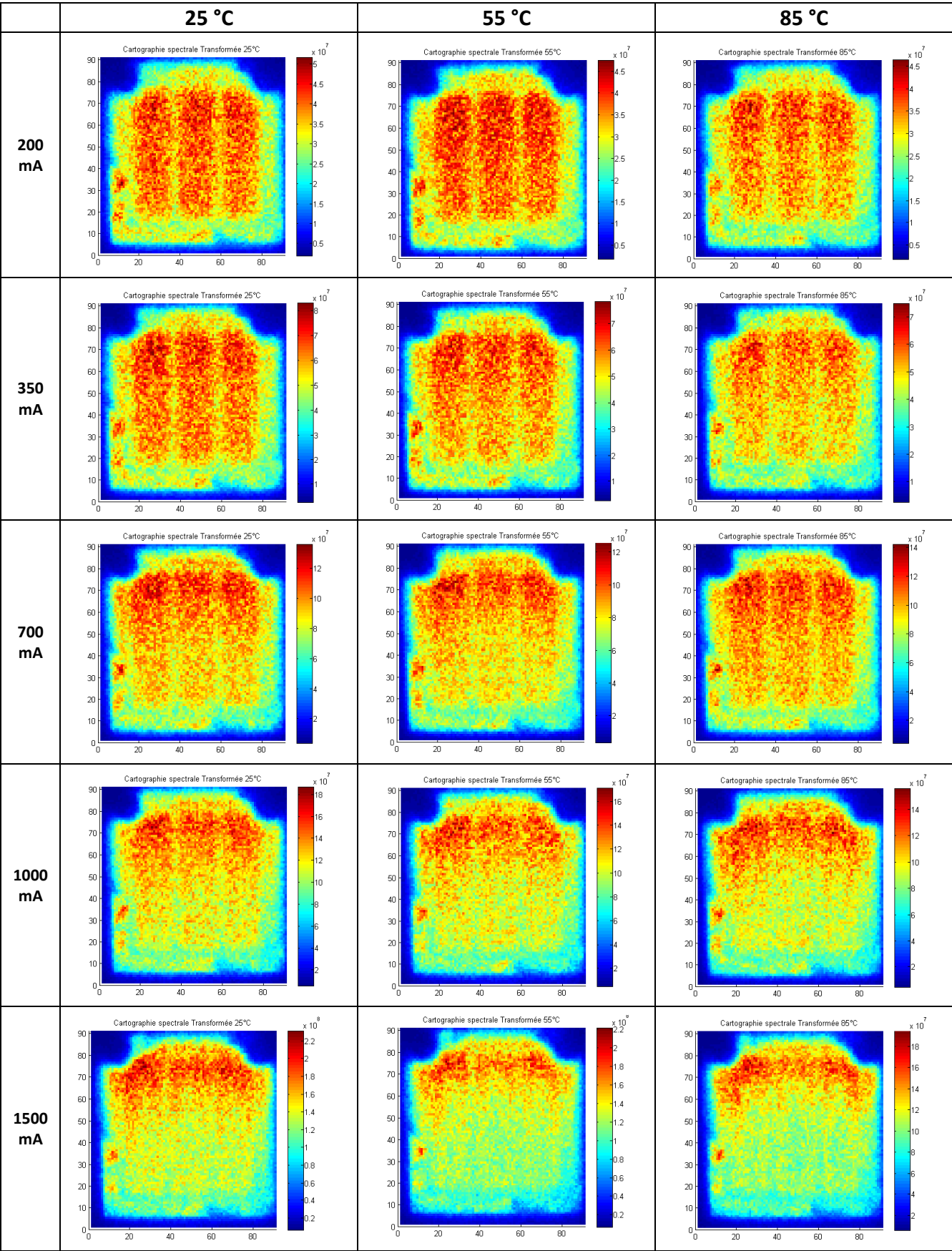


Figure 66 - Ecart de luminance [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$] en fonction du courant d'alimentation [mA]

Tableau 12 - Résumé des cartographies de luminance énergétique [W.m⁻².sr⁻¹] de la puce avec luminophore



3 Conclusion

Dans cette partie, le flux lumineux en sortie de la jonction et du luminophore a été mesuré de manière globale et locale sous différentes conditions électriques et thermiques. L'augmentation du courant et de la température du PAD a une influence, premièrement, sur le rendement de la LED, puis sur la répartition du flux à la surface de la LED.

Par la suite, nous souhaitons mesurer localement la température de surface de puce avec luminophore et de la température de jonction d'une puce nue afin de les coupler aux mesures optiques et d'étudier l'homogénéité de la cartographie de la température de jonction et de la température de la surface.

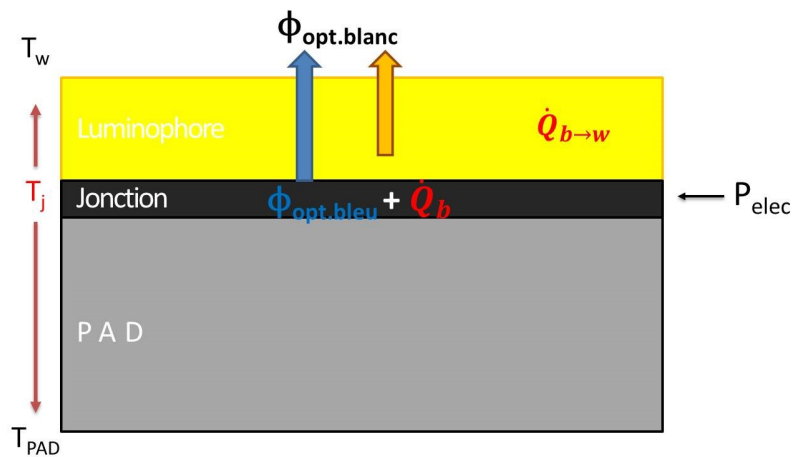


Figure 67 - Résumé des phénomènes thermiques et optiques au sein de la puce

Chapitre 4 - Caractérisation thermique de puces nues et avec luminophore

Ce chapitre aborde la caractérisation thermique des diodes électroluminescentes. Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'utilisation de la thermographie infrarouge pour obtenir des cartographies de température de surface. Afin de mesurer des valeurs vraies de températures, une cartographie d'émissivité est faite par une méthode conventionnelle, pour les deux types de LEDs.

Ensuite la température de jonction de la puce nue est mesurée par différentes méthodes, dont la thermographie infrarouge, à l'aide de la cartographie d'émissivité. La méthode par thermographie infrarouge n'est valable que pour une puce nue, car la jonction se trouve à la surface de puce.

Puis nous comparons aussi ces différentes méthodes pour le calcul de la résistance thermique $R_{th\ j-PAD}$ entre la jonction et le PAD. La résistance thermique augmente de 15,5 K/W à 21 K/W avec l'augmentation de T_{PAD} de 25 °C à 85 °C. Cette influence de la température sur la résistance thermique a été déjà notifié dans la littérature, elle est peut être due au changement de propriété thermique des matériaux avec l'augmentation de la température.

Enfin, nous remarquons que la différence de température entre la jonction et le PAD a une influence similaire sur le rendement, pour n'importe quel température de PAD.

Nous souhaitons connaître et comparer la température de jonction T_j d'une puce nue et d'une puce avec luminophore. La température de jonction influe sur le rendement optique et les longueurs d'onde émises par la LED. L'augmentation de la température de jonction, due à l'augmentation de l'intensité du courant ou due à l'augmentation de la température ambiante, influe sur la dégradation de la durée de vie de la LED [48]. La diminution de la durée de vie de la LED en fonction de la température de jonction dépend fortement du packaging de la LED [49]. L'augmentation de la température de jonction peut conduire aussi à un jaunissement de l'encapsulant. Nous souhaitons aussi connaître l'influence thermique du luminophore sur la température de jonction T_j . La thermographie infrarouge est utilisée, dans le milieu des LEDs, pour repérer des points chauds sur les PCBs. Dans notre cas, nous allons mesurer la température de la surface de puces nues et avec luminophore, en passant par une mesure d'émissivité. Ensuite, nous mesurerons de différentes manières la température de jonction d'une puce nue. Enfin, nous calculerons la résistance thermique $R_{th\ j-PAD}$ entre la jonction et le PAD d'une puce nue.

1 La thermographie infrarouge

L'infrarouge est associé à la chaleur car, à température ambiante ordinaire, les objets émettent spontanément des radiations dans le domaine infrarouge. La relation est modélisée par la loi du rayonnement du corps noir dite aussi loi de Planck, décrite ci-dessous.

1.1 Le rayonnement thermique

Loi de Stefan-Boltzmann

La loi de Stefan-Boltzmann ou de Stefan établit que la puissance totale rayonnée par unité de surface dans le demi-espace libre d'un corps noir (exitance¹ énergétique du corps noir) s'exprime par la formule : $M = \sigma T^4$ où σ est la constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ (aussi appelée constante de Stefan), T la température en kelvin et M l'exitance énergétique en W.m^{-2} .

Loi de Planck

La loi de Planck définit la distribution de luminance énergétique monochromatique du rayonnement thermique du corps noir en fonction de la température thermodynamique.

La luminance énergétique monochromatique est un flux énergétique par unité de surface, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde ; elle s'exprime donc en $\text{W m}^{-2}.\text{sr}^{-1}\text{m}^{-1}$ en unités SI :

$$L_\lambda = \frac{2 h c_\lambda^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{h c_\lambda / k \lambda T} - 1} \quad \text{Eq. 16}$$

$c_\lambda = c/n_\lambda$ est la vitesse du rayonnement électromagnétique dans le milieu où se propage le rayonnement, avec :

- n_λ indice de réfraction du milieu pour la longueur d'onde λ ;
- $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ (vitesse de la lumière dans le vide) ;
- $h = 6,626\,17 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ (constante de Planck) ;
- $k = 1,380\,66 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (constante de Boltzmann) ;
- T est la température de la surface du corps noir en Kelvin.

Loi du déplacement de Wien

La loi de Planck décrit la distribution de l'énergie $W(\lambda)$ rayonnée en fonction de la température T du corps noir. Selon la loi de Planck, à une température T donnée, l'énergie $W(\lambda)$ passe par un maximum W_{max} pour une longueur d'onde λ_{max} .

La loi de Wien décrit la relation liant la longueur d'onde λ_{max} , correspondant au pic d'émission lumineuse du corps noir, et la température T . On retient généralement, en exprimant la longueur d'onde en mètre et la température en kelvin :

$$\lambda_{max} = \frac{h c}{4,965 .k.T} = \frac{2,898.10^{-3}}{T} \quad \text{Eq. 17}$$

où h est la constante de Planck, k est la constante de Boltzmann, et c est la célérité de la lumière. La constante de Wien, notée b ou σ_w , est défini comme $\sigma_w = 2,898.10^{-3} \text{ m.K}$.

1.2 Emissivité

L'émissivité ε d'un matériau est un nombre sans dimension (sans unité), représentant le rapport entre l'énergie rayonnée et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température étant entendue que le corps noir absorbe la totalité de ce flux et le réémet en intégralité lorsqu'il est à l'équilibre thermique.

L'émissivité dépend de l'angle d'observation, de la longueur d'onde, de la température du corps et du temps.

1.3 La caméra infrarouge

La chaîne radiométrique est l'ensemble des phénomènes qui se produisent depuis l'émission par la source de rayonnement, jusqu'à l'absorption par le récepteur (Figure 68).

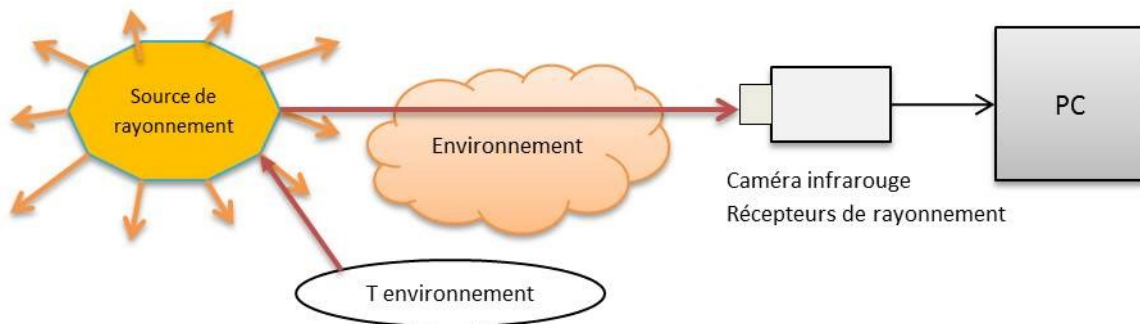


Figure 68 - Chaîne radiométrique

La source de rayonnement émet un flux reçu par le récepteur, atténué par l'atmosphère, mais aussi influencé par les réflexions de l'environnement sur la source. Une partie de ce flux est également associée à l'optique même de la caméra et a sa capacité de transformer le flux en signal électrique.

$$U_{Source} = C \times W(T) \quad \text{Eq. 18}$$

$$U_{Source} = \varepsilon_T W_{object} + (1 - \varepsilon) W_{reflehi} + (1 - \tau) W_{atm} \quad \text{Eq. 19}$$

Sur les caméras, chaque pixel est considéré comme un capteur indépendant. Une correction d'uniformité est alors nécessaire (NUC), qui consiste à ramener chaque réponse d'un détecteur sur la courbe moyenne de l'ensemble de la matrice, ou les valeurs numériques ont leur équivalent en flux de chaleur. On obtient ainsi une seule courbe d'étalonnage pour tous les pixels.

Il faut essayer de trouver la fonction de transfert associée à la caméra infrarouge, qu'on peut écrire de la manière suivante : $ImageCaméra = h(caméra) \times ImageRéelle + Erreur$.

Pour le moment, on considère que les images fournies par la caméra sont représentatives de la réalité.

2 Cartographie d'émissivité

2.1 Mesure de l'émissivité

2.1.1 Méthode de mesure

La méthode de mesure d'émissivité conventionnelle [50] [51] consiste à enregistrer des clichés infrarouges quand l'échantillon a été chauffé uniformément à une température T_2 . La température T_1 correspond à la température ambiante. Les températures T_1 et T_2 doivent avoir une différence minimale de 20 °C pour avoir une sensibilité suffisante. La zone où l'on souhaite mesurer l'émissivité est comparée à une zone de référence, dont l'émissivité est comme un signal de corps noir. Le calcul de l'émissivité peut être décrit par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{J_{ij2} - J_{ij1}}{J_{b,T_2} - J_{b,T_1}} \quad \text{Eq. 20}$$

où :

- J_{ij2} et J_{ij1} correspondent aux signaux obtenus par la caméra infrarouge à la température T_2 et T_1 .
- ε_{ij} l'émissivité de l'aire i .
- J_{b,T_2} et J_{b,T_1} correspondent aux signaux obtenus par la caméra infrarouge, du corps noir, à la température T_2 et T_1 .

2.1.2 Le banc de mesure

Dans notre cas, nous souhaitons faire une cartographie d'émissivité d'une puce de 880 μm de côté. La LED a été soudée sur un circuit imprimé. Nous avons peint une petite zone de cuivre près du PAD de la LED (Figure 69). La peinture est une peinture noire VELVET avec une émissivité comprise entre 0,95 et 0,98. Nous prenons comme hypothèse que l'émissivité de la peinture noire est égale à 1.

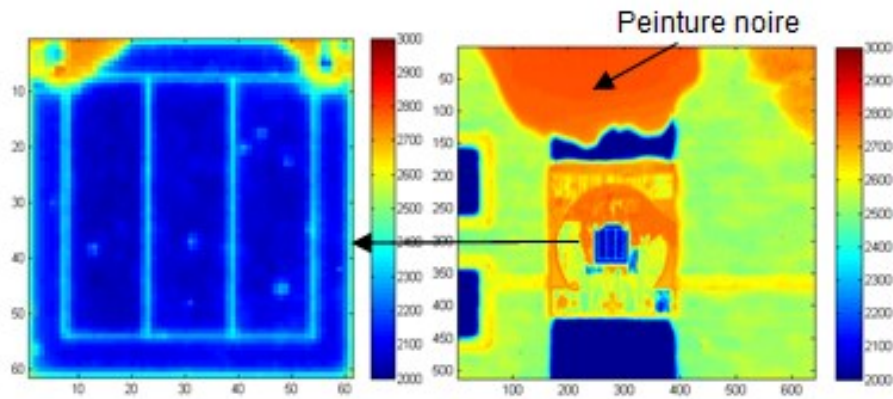


Figure 69 - Cliché infrarouge d'une puce nue [unité : Digital Level]

Nous utilisons un module Peltier pour maintenir T_{PAD} à une température fixe. La température ambiante était d'environ 20 °C. Des clichés IR ont été pris entre 20 °C et 80 °C, environ tous les 3 °C, pour constater l'évolution de l'émissivité. Nous allons mesurer l'émissivité pour chaque température. Pour mesurer la distribution du rayonnement thermique sur la surface LED [52], nous utilisons une caméra de FLIR SC7600 avec un objectif avec un grossissement de 1 (G1). Ce modèle est équipé d'une matrice de détecteurs quantiques de type InSb de 640 x 512 pixels, dont la réponse spectrale est comprise entre 3,5-5,1 μm . La taille annoncée pour le pitch¹⁵ est de 15 μm de côté. Ce montage permet d'obtenir une résolution apparente de 11 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. La fréquence d'acquisition des images utilisait est 25 Hz. Les mesures prises sont des moyennes de 50 images prises sur 2 secondes pour éliminer une partie du bruit de mesure.

La température du PCB est vérifiée avec un thermocouple de type T avec un lecteur étalonné. Ce type de thermocouple a une erreur standard comprise entre 0,75 % et 1 %.

Nous prenons comme hypothèse que la température est uniforme au niveau de la surface de la puce. Le module Peltier permet d'imposer une température à la surface arrière du PCB. La chaleur est transmise par conductivité à la surface de la puce. Le PCB et la LED sont constitués de matériaux plutôt conducteurs thermiquement, tels que l'aluminium, le cuivre ou la céramique. De plus, les épaisseurs des couches de la LED sont relativement faibles (inférieur aux millimètres).

2.2 Cartographie d'émissivité d'une puce nue et d'une puce avec luminophore

2.2.1 Puce nue

Pour chaque température, nous avons calculé l'émissivité moyenne sur la totalité de la puce et sur la partie centrale de puce.

De plus l'émissivité a été calculée pour chaque pixel. La Figure 70 montre la cartographie de l'émissivité pour deux valeurs différentes de la température uniforme $T_2 = 40\text{ °C}$ et $T_2 = 79\text{ °C}$. L'émissivité de la puce bleue est constante proche de $\epsilon_b = 0,49$ entre 30 °C et 80 °C (Figure

¹⁵ En terme de résolution spatiale, le Pitch représente physiquement la surface élémentaire du carré d'un pixel sur la matrice du détecteur. [73]

71). Normalement, l'émissivité des pistes d'or devrait être inférieure à celle de la puce (ϵ_{or} proche de 0,1). Les dimensions des pistes d'or sont trop petites pour la résolution de la caméra: l'épaisseur est égale à 10 μm et la hauteur est égale à 8 μm .

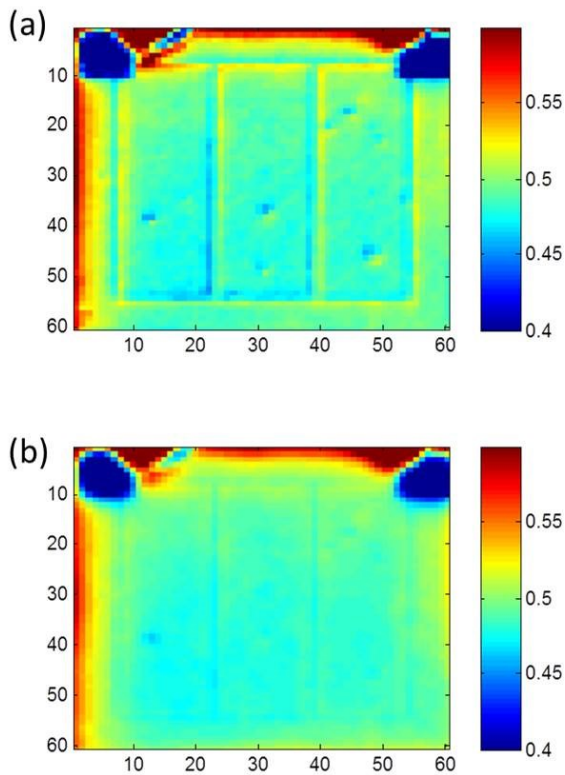


Figure 70 - Cartographie d'émissivité pour une puce nue avec $T_2 = 40\text{ °C}$ (a) et 79 °C (b)

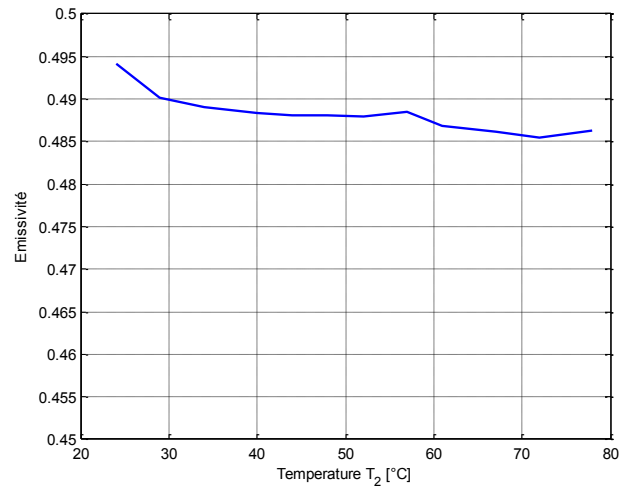


Figure 71 – Emissivité constante calculée sur la partie centrale de la puce avec la température T_2

L'émissivité trouvée est appliquée aux images infrarouges de la même puce nue. Nous avons pris deux clichés infrarouges, avec la même température ambiante :

- La LED éteinte (Figure 72),
- La LED alimentée par une puissance électrique de 3,65 W (Figure 73).

Pour la Figure 72, il y a une erreur sur l'émissivité des fils d'or, ce qui conduit à une différence de température d'environ 2,5 °C. Cette erreur est due à la faible résolution de la cartographie d'émissivité.

La LED bleue, alimentée par 3,65 W, a un rendement de 28 %, donc elle libère 2,6 W de chaleur. Le rendement a été mesuré dans le Chapitre 31 Mesure du flux global lumineux visible. Sa température moyenne augmente jusqu'à 68 °C (Figure 73). Près des plots d'or, on observe une surchauffe importante.

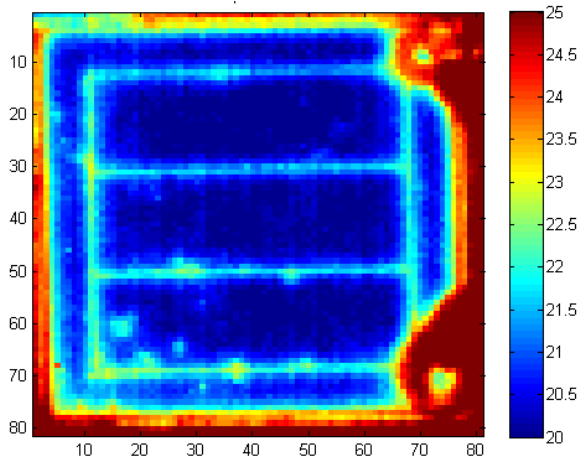


Figure 72 - Distribution de la température d'une puce nue éteinte [°C]

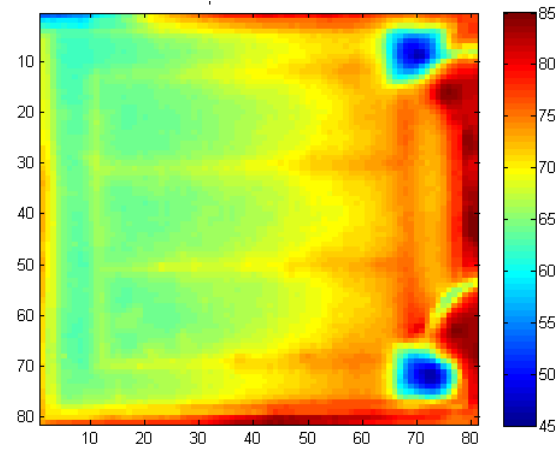


Figure 73 - Distribution de la température [°C] d'une puce nue alimentée par 3.65W et qui génère 2,6W de chaleur

Nous devons rester critique face à la mesure d'émissivité d'une puce nue, car le matériau¹⁶, situé en surface de la puce, a une épaisseur de 3 μm . Cette épaisseur est proche de la gamme spectrale de la caméra (3 μm – 5 μm). Cela peut fausser les mesures d'émissivité et de températures

2.2.2 Puce avec luminophore

La méthode est similaire pour la puce blanche. Les pistes d'or sont moins apparentes à cause du luminophore qui recouvre la surface de la puce. L'émissivité reste constante sur la gamme de température, elle a une valeur d'environ $\epsilon_w = 0,82$.

3 Mesures de la température de jonction d'une puce nue

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la température de jonction de LED, et ainsi calculer la résistance thermique :

- **La méthode de la différence de tension**

Aussi appelée méthode électrique ou mesure de la tension directe, c'est une méthode de référence. Elle consiste, dans un premier temps, à déterminer le coefficient directeur k_F de la courbe de la tension V_F en fonction de la température T_M . La LED est alimentée à de faibles courants pour ne pas créer de chaleur : la température de jonction est considérée égale à T_M . Par exemple *Narendran et al.* alimentent la LED avec un courant pulsé à 1 mA de formé carré de 200 μs [53]. La méthode d'étalonnage du coefficient k_F est décrite par la norme EIA/JEDEC écrite par *Electronic Industries Association* [54].

Dans un second temps, la LED est alimentée à un courant élevé pendant une certaine période, et l'alimentation de la LED est rapidement basculée vers un courant de faible intensité [55]. Les tensions mesurées avant et après le basculement sont comparées ΔV_F . La

¹⁶ Matériau principalement constitué de gallium, analysé au microscope à balayage électronique dans le chapitre 2.

température de jonction est obtenue par l'équation suivante : $T_j = T_{case} + \Delta V_F / k_F$ où T_{case} représente la température ambiante.

- **La thermographie infrarouge**

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir cartographier la température de jonction mais elle demande des mesures préalables d'émissivité de la puce. Cependant elle est limitée par la résolution de la caméra [31].

- **La mesure de flux optique**

Les performances optiques et électriques des LEDs évoluent avec la température de jonction [56]. Les chercheurs ont d'abord remarqué que le déplacement du pic de longueur d'onde est proportionnel à la température de jonction [57]: pour une LED émettant de la lumière rouge, ils ont estimé un déplacement de 0,1367 nm par degré de la température de jonction. Ils ont ensuite estimé la température de jonction à partir du ratio entre la lumière blanche et la lumière bleue [58].

- **La micro spectroscopie Ramen**

Cette méthode est utilisée pour les LEDs émettant la lumière ultraviolette [59] [60].

- **La mesure directe avec des micro-thermocouples** [31].

Cependant ces méthodes ne semblent pas valables pour les LEDs alimentées avec un courant alternatif, par rapport à une alimentation continue [61].

Dans notre cas, la mesure de la température de jonction est étudiée à travers la méthode de la différence de tension et la mesure par thermographie infrarouge, car la première est la méthode de référence dans le milieu des LEDs et la deuxième permet d'avoir une cartographie.

3.1 Méthode de la différence de tension

Dans un premier temps, il faut déterminer le coefficient directeur k_F de la courbe de la tension V_F en fonction de la température ambiante T_m , qui correspond aussi à la température du PAD. Dans cette méthode, la LED est alimentée avec un courant continu très faible I_b d'environ 1 mA. Ainsi la température de jonction T_j peut être considérée égale à T_M . Nous faisons varier la température T_M de la LED à l'aide d'un module Peltier pour obtenir la courbe $V_f(T_M)$. La mesure de la température T_M se fait sur le PCB près de la LED par un thermocouple ou un cliché infrarouge.

Ensuite, après avoir arrêté la régulation de température T_M , la LED est alimentée avec un courant nominal I_n jusqu'à être stable thermiquement. Après nous faisons passer le courant de la LED à 1 mA. Nous mesurons la tension V_1 avant le saut et la tension V_2 après le saut de courant. Enfin, nous calculons la température de jonction :

$$T_j = T_m + \frac{V_2 - V_1}{k_F} \quad \text{Eq. 21}$$

La troisième partie consiste au calcul de la résistance thermique R_{th} . Dans les mêmes conditions que pour les mesures de T_j , il faut connaître le flux lumineux $\Phi_{opt}(I_n)$ de la LED et la puissance électrique injectée afin d'en déterminer le flux de chaleur généré. Nous faisons l'hypothèse que le flux de chaleur s'évacue par conduction au travers de la résistance thermique entre la jonction et le PAD de la LED. Enfin, nous calculons la résistance thermique :

$$R_{TH}(I_n) = \frac{T_j(I_n) - T_M(I_n)}{V_1 \times I_n - F_{opt}(I_n)} = \frac{T_j(I_n) - T_M(I_n)}{P_{elec}(I_n) - \Phi_{opt}(I_n)} \quad \text{Eq. 22}$$

Nous avons fait ces mesures pour deux courants I_n 200 mA et 350 mA. La température de jonction calculée atteint 32 °C pour 200 mA et 38 °C pour 350 mA ; la résistance thermique est de 17 K/W pour 200 mA et 10 K/W pour 350 mA.

3.2 Mesure par thermographie infrarouge

Dans la partie 2 Cartographie d'émissivité, nous avons calculé l'émissivité de la surface d'une puce bleue. Dans le chapitre 2 - 2.1 Analyse au Microscope à Balayage Electronique de la puce, la jonction pour la puce se situe à la surface. Par conséquent en mesurant la température de surface d'une puce nue, nous avons accès à la température de jonction.

Nous obtenons une cartographie de la température T_j pour quatre valeurs du courant électrique (200 mA, 350 mA, 700 mA et 1 A) et pour trois températures de PAD T_{PAD} (25 °C, 55 °C et 85 °C) imposées grâce à un module Peltier. La mesure de T_{PAD} est faite en surface du circuit imprimé avec un thermocouple. Pour chaque cliché infrarouge, nous avons récupéré les données en Digital Level. Nous avons appliqué l'étalonnage de notre caméra avec l'objectif G1 + 30 mm de bagues-allonges. Ensuite nous avons transformé ces données en appliquant une émissivité globale.

Nous nous sommes servis des mesures faites en sphère (Chapitre 3 - 1 Mesure du flux global lumineux visible) pour calculer le flux optique et le rendement (puissance électrique/ flux optique). La valeur, pour $T_{PAD} = 85$ °C et $I = 1,5$ A, n'est pas accessible car la caméra arrive à saturation (la valeur est hors étalonnage). Les valeurs mesurées sont résumées dans le Tableau 13. La température de jonction indiquée correspond à la moyenne de la cartographie de la puce.

Tableau 13 - Mesure de la température de jonction d'une puce nue

Température PAD [°C]	Alimentation LED			Flux optique [W]	Rendement optique	Chaleur $\dot{Q}_b$ [W]	T_j [°C]	$T_j - T_{PAD}$
	Courant [A]	Tension [V]	Puissance [W]					
25,0	0,20	2,88	0,58	0,25	44%	0,32	30,0	5,0
25,3	0,35	2,99	1,05	0,42	40%	0,62	35,4	10,1
25,5	0,70	3,16	2,21	0,74	33%	1,47	49,8	24,3
25,4	1,00	3,25	3,25	0,96	30%	2,29	61,6	36,2
25,0	1,50	3,37	5,06	1,21	24%	3,84	84,8	59,8
55,3	0,20	2,78	0,56	0,24	43%	0,32	61,7	6,4
54,8	0,35	2,89	1,01	0,40	39%	0,62	66,7	11,9
54,9	0,70	3,05	2,14	0,68	32%	1,45	79,6	24,7
55,4	1,00	3,15	3,15	0,88	28%	2,27	92,3	36,9
55,4	1,50	3,28	4,92	1,10	22%	3,83	121,5	66,1
85,0	0,20	2,70	0,54	0,22	41%	0,32	93,6	8,6
85,2	0,35	2,80	0,98	0,36	37%	0,62	100,5	15,3
85,2	0,70	2,96	2,07	0,63	30%	1,45	115,5	30,3
85,2	1,00	3,06	3,06	0,80	26%	2,26	135,3	50,1
85,1	1,50	3,19	4,79	0,96	20%	3,83		

La température de jonction dépend fortement la puissance électrique, et dans la moindre mesure de la température imposée au PAD T_{PAD} .

Les températures de jonction obtenues par les deux méthodes, pour la même LED bleue alimentée à 350 mA, avec T_{PAD} , sont proches :

- Méthode de la différence de tension : $T_j = 38$ °C ;
- Méthode par thermographie infrarouge : $T_j = 35,4$ °C.

La différence des deux méthodes est inférieure à 3 °C, qui est inférieure à l'incertitude des deux méthodes.

4 Calcul de la résistance thermique entre la jonction et le PAD

La mesure de la température de jonction, effectué au paragraphe précédent, permet de calculer la résistance thermique entre la jonction et la PAD d'une puce nue.

4.1 Calcul de la valeur générale de la puce nue

Nous souhaitons calculer la résistance thermique entre la jonction et le PAD, grâce à un modèle 1D, pour différentes températures de PAD imposées pour une puce bleue.

En reprenant l'équation 13, la résistance thermique $R_{th\ j-PAD}$ peut s'exprimer en fonction de $(T_j - T_{pad})$ et du flux de chaleur $\dot{Q}_b$ par la relation suivante :

$$R_{th\ jb-PAD} = (T_{jb} - T_{PAD}) / \dot{Q}_b \quad \text{Eq. 23}$$

Le flux de chaleur $\dot{Q}_b$ est calculé à partir des mesures du flux optique de la partie Chapitre 31 Mesure du flux global lumineux visible.

Si nous considérons les températures de jonction mesurées par thermographie infrarouge, nous pouvons tracer la chaleur $\dot{Q}_b$ en fonction de $\Delta T = T_{jb} - T_{PAD}$. Le Tableau 14 représente les extrapolations linéaires des courbes $\dot{Q}_b(\Delta T)$ et le calcul de la résistance thermique $R_{th\ jb-PAD}$. Ces valeurs, comprises entre 15,50 K/W et 20,97 K/W, augmentent avec T_{PAD} . L'augmentation de la résistance thermique avec la température ambiante a été notée par d'autres chercheurs [62] [53]. Cette augmentation peut s'expliquer par un changement de propriété thermique, tel que la conductivité, de certains matériaux avec l'augmentation de la température.

Tableau 14 – Résultats de la régression linéaire, calcul des pertes thermiques et de la résistance thermique

T_{PAD}	Interpolation	$R_{th\ jb-PAD}$ [K/W]
25 °C	$y = 15,503x + 0,5688$ $R^2 = 0,9992$	15,50
55 °C	$y = 16,818x + 0,6589$ $R^2 = 0,9973$	16,82
85 °C	$y = 20,971x + 1,725$ $R^2 = 0,9957$	20,97

Les valeurs de résistances thermiques, calculées à partir de la température de jonction, sont égales à 17 K/W et 10 K/W pour la méthode de la différence de tension. Ce résultat est compatible avec la littérature, car la valeur de résistance de LEDs fabriquées autour de 2010 est comprise entre 5 K/W et 15 K/W [62] [3].

4.2 Cartographie de la résistance thermique

Les valeurs des résistances thermiques précédentes ont été calculées avec une valeur moyenne de la température de jonction de la puce nue (ici égale à la température de surface). Nous souhaitons calculer la résistance thermique pour chaque point de mesure de température. Ainsi nous obtenons une cartographie de la résistance thermique.

La résistance thermique est calculée avec l'équation :

$$R_{th\ jb-PAD} = (T_{jb} - T_{PAD}) / (\dot{Q}_b - \Phi_a) \quad \text{Eq. 24}$$

où :

- les pertes thermiques dues à l'environnement Φ_a sont calculées en fonction de la température T_{jb} : $\Phi_a = S[h(T_{jb} - T_\infty) + \sigma \varepsilon_b(T_{jb}^4 - T_\infty^4)]$, S est égale à la surface du pixel.

Nous calculons la résistance thermique $R_{th\ j-PAD}$ avec $\dot{Q}_b$ fixe pour toute la puce. Ci-dessous, les images illustrent des cartographies de $R_{th\ j-PAD}$ pour différents T_{PAD} et P_{elec} . La moyenne de la résistance thermique a été calculée pour ces différents cas. Les valeurs pour chaque T_{PAD} ont été comparées à celles obtenues précédemment :

- $T_{PAD} = 25\text{ °C}$, $R_{th\text{ }jb-PAD\text{ }moyen} = 16,82\text{ K/W}$;
- $T_{PAD} = 55\text{ °C}$, $R_{th\text{ }jb-PAD\text{ }moyen} = 18,53\text{ K/W}$;
- $T_{PAD} = 85\text{ °C}$, $R_{th\text{ }jb-PAD\text{ }moyen} = 24,64\text{ K/W}$.

La différence entre les deux valeurs est inférieure à 10 %.

Nous remarquons une hétérogénéité des cartographies des résistances thermiques qui pourrait s'expliquer par une variation locale de flux optique bleue $\phi_{opt\text{ }b}$, donc de la chaleur $\dot{Q}_b$.

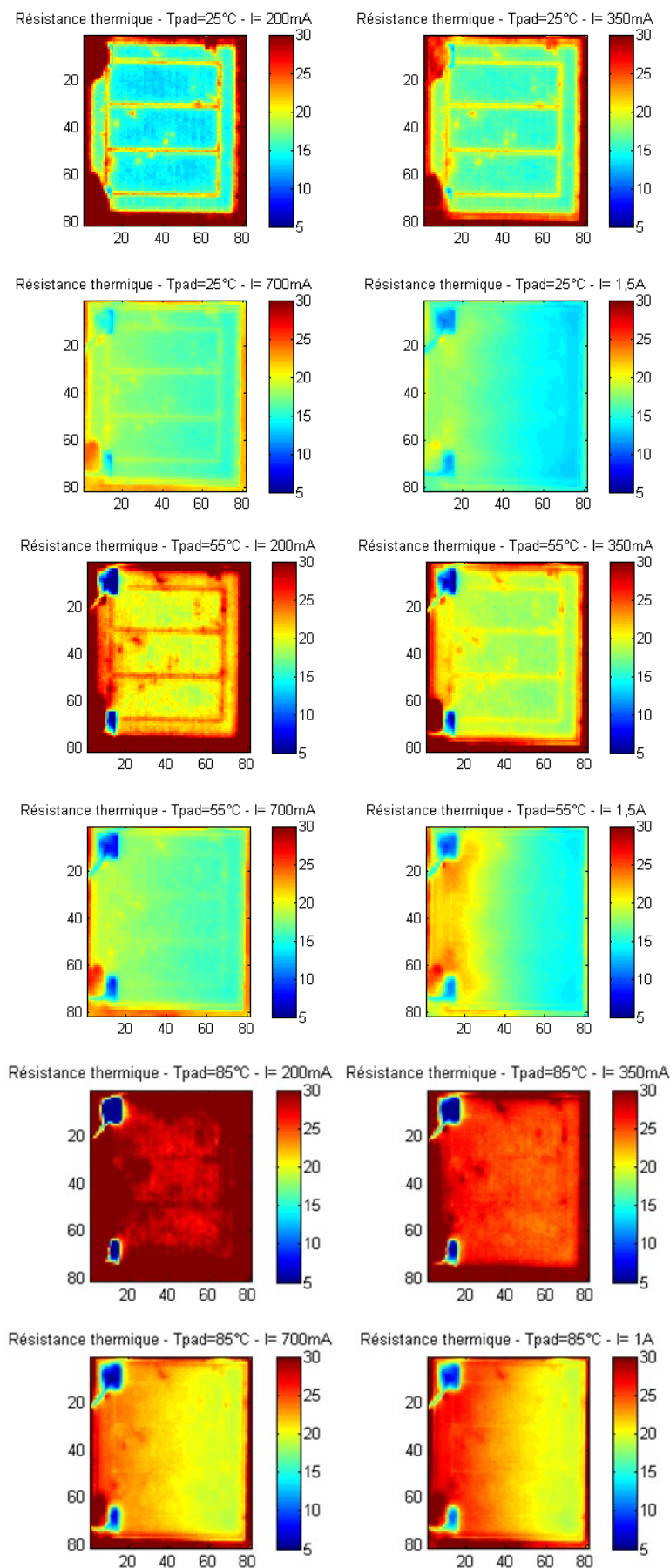


Figure 74 - Cartographie de la résistance thermique $R_{th\ j\text{-}pad}$ [K/W]

5 Influence de T_j - T_{pad}

Nous avons mené des expériences thermo-régulées pour mesurer la température de jonction d'une puce nue à cinq courants électriques (200 mA, 350 mA, 700 mA, 1 A et 1,5 A) et trois températures de PAD imposées (25 °C, 55 °C et 85 °C).

La Figure 75 illustre l'évolution du rendement par rapport à $T_j - T_{PAD}$, pour chaque T_{PAD} . Le rendement ($\eta_{power} = \phi_{opt b} / P_{elec}$) de la puce nue n'est pas dépendant que de la température de jonction, mais de la différence de température entre la jonction et le PAD. De plus, la fonction qui relie le rendement à $(T_j - T_{PAD})$ semble dépendre faiblement de T_{PAD} . Cette observation est aussi faite avec le Tableau 13. Cette relation donne un nouveau point de vue dans le milieu des LEDs où le rendement ou le flux lumineux sont toujours reliés à la température de jonction T_j . Nous montrons ici que le rendement semble dépendre beaucoup plus de la différence $T_j - T_{PAD}$ que de la température de jonction T_j .

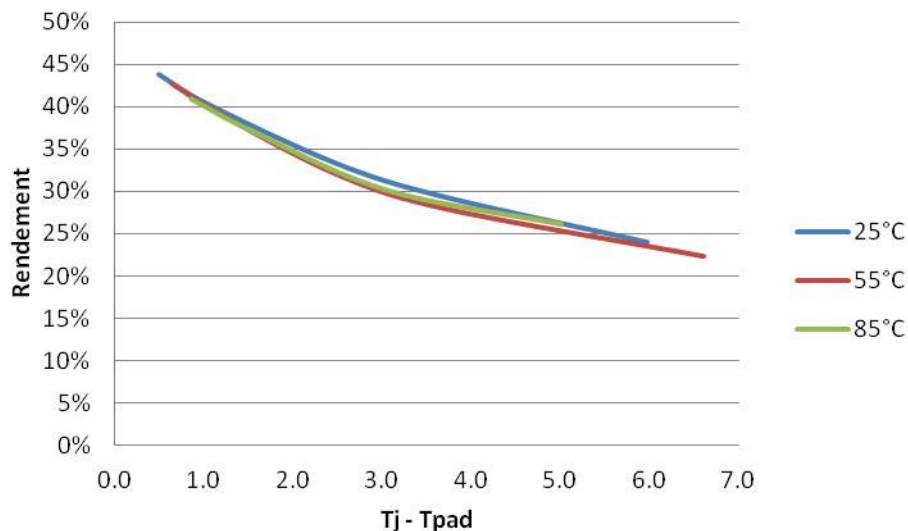


Figure 75 - Rendement de la puce bleue en fonction $T_j - T_{PAD}$

6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté des méthodes pour le calcul de la température de jonction : méthode de thermographie infrarouge et la méthode de la différence de tension. Pour la méthode de thermographie infrarouge, la mesure de la température de surface passe par une estimation de l'émissivité. Puis, le calcul de la température de jonction permet de déduire la résistance de thermique entre la jonction et la PAD. Nous montrons enfin que la chute de rendement dépend de la différence de température jonction-PAD.

La mise en place de banc permettant la cartographie, que ce soit de luminance énergétique spectrale (Chapitre 3) ou de température de surface, a été capitale pour apporter des corrélations par la suite.

Chapitre 5 – Modèle thermo-optique de puces nues et avec luminophore

La première partie de ce chapitre est dédiée au modèle électrique du maillage de fils conducteurs implanté sur la surface de la puce. Cette étude, qui est composée de trois niveaux progressifs de modélisation, permet de comprendre la répartition du courant électrique qui traverse la jonction, et ainsi d'appréhender la répartition du flux lumineux et de la température au niveau de la surface de la puce.

Ensuite, un modèle thermo-optique décrit les phénomènes présents au niveau de la jonction d'une puce nue : la conversion de la puissance électrique en lumière bleue et en chaleur, et les transferts de chaleur. Le rendement du flux optique par rapport à la puissance électrique est calculé pour ce type de puce.

Puis, nous complétons ce premier modèle pour obtenir un modèle d'une puce avec le luminophore. Ce dernier modèle prend en compte la photo-conversion au sein du luminophore avec le calcul de flux lumineux à la sortie du luminophore et le calcul de la chaleur liée à la photo-conversion. La résolution de ce modèle nous permet d'obtenir la température de jonction d'une puce avec luminophore. La conservation d'énergie du modèle est aussi vérifiée.

Le modèle thermo-optique est ensuite couplé à une cartographie de température de surface afin d'obtenir une cartographie de la température de jonction. Ces cartographies sont regroupées avec les clichés de thermographie infrarouge et de luminance énergétique globale obtenus dans les chapitres précédents.

1 Modèle électrique du maillage au-dessus de la puce

La puce est alimentée par un courant électrique, qui doit traverser la puce dans son épaisseur de manière la plus uniforme que possible. Pour cela, il y a un maillage sur la surface de la puce, qui est un compromis entre l'uniformité de la densité du courant et du flux optique en sortie. Les fabricants de puce ont différentes stratégies afin d'y arriver : maillage rectangulaire, maillage circulaire ...

La puce que nous étudions a un maillage de type rectangulaire (Figure 76), composé d'or. Elle est alimentée par deux plots d'or au-dessus de la surface, et le courant part vers la jonction.

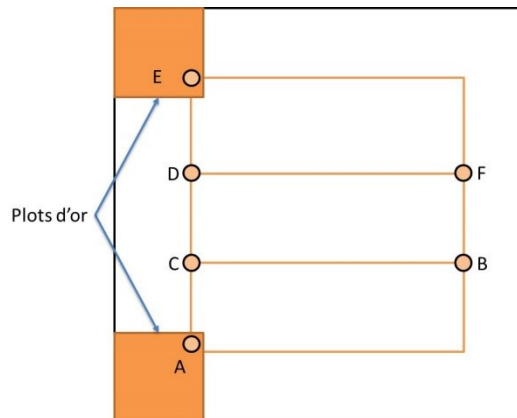


Figure 76 - Schéma de la puce avec la description du maillage

Nous avons fait trois niveaux progressifs de modélisation électrique :

- Le **niveau 1** : chaque branche est représentée par une résistance, la jonction est représentée par quatre résistances, puis quatre diodes (une à chaque nœud)
- Le **niveau 2** : une branche est représentée par une série de dix résistances. Entre chaque résistance nous représentons une diode qui symbolise une diode.
- Le **niveau 3** : un maillage entre chaque branche est rajouté au modèle du niveau 2. Ce maillage est composé de résistances, représentant la résistivité du semi-conducteur, et de diodes, représentant la jonction.

1.1 Modèle électrique niveau 1

Le maillage peut être modélisé par un circuit électrique. Le circuit est alimenté par un générateur de courant. On considère que chaque branche du maillage représente une résistance R , qui est calculée grâce à la relation $R = \rho \frac{L}{S}$, où ρ est la résistivité de l'or ($\rho = 2.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), L la longueur de la branche et S la surface du fil ($S = 9.4 \times 10^{-11} m^2$). Le maillage comporte trois longueurs de branche :

- groupe A : A-C, C-D, D-E où la résistance R_a est égale à 56 mΩ ;
- groupe B : C-B, D-F où $R_b = 170 m\Omega$;
- groupe C : A-B et E-F où $R_c = 230 m\Omega$.

Sur les nœuds (B, C, D et F), une résistance modélise le courant qui traverse la jonction. Ces dernières sont dépendantes de la tension et du courant appliqués à la totalité de la puce. Par exemple, la LED est alimentée par un courant de 1 A et d'une tension de 3,35 V. Nous

calculons la résistance équivalente avec la loi ohm : $R_{eq} = U/I = 3,35 \, \Omega$. La résistance en chaque nœud est égale à la résistance équivalente multipliée par le nombre de nœuds (ici $n=4$). La résistance R est similaire à chaque nœud, donc en reprenant l'exemple $R=13,4 \, \Omega$ (Equation 25). Ces résistances sont directement reliées à la masse.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{n=i} \frac{1}{R_i} = \frac{n}{R} \rightarrow R = n \times R_{eq} \quad \text{Eq. 25}$$

Le Tableau 15 résume la loi des nœuds¹⁷ aux six nœuds du système (de A à F) et la loi des mailles¹⁸ aux trois mailles du système (ABC, BCDF et DEF).

Tableau 15 - Description de la loi des nœuds et de la loi des mailles

Nœud	Maille
A $i_1 - i_2 = 0$	1 $U_{ac} + U_{cb} + U_{ba} = 0$
B $i_1 + i_3 - i_4 - i_{12} = 0$	2 $U_{bc} + U_{cd} - U_{bf} - U_{df} = 0$
C $i_2 - i_3 - i_6 - i_9 = 0$	3 $U_{de} + U_{fd} - U_{fe} = 0$
D $i_6 + i_5 - i_8 - i_{10} = 0$	
E $i_8 + i_7 - i_{11} = 0$	
F $i_4 - i_5 - i_7 - i_{11} = 0$	

La Figure 77 illustre le schéma électrique, représentant le maillage, avec le générateur de courant et les différentes résistances.

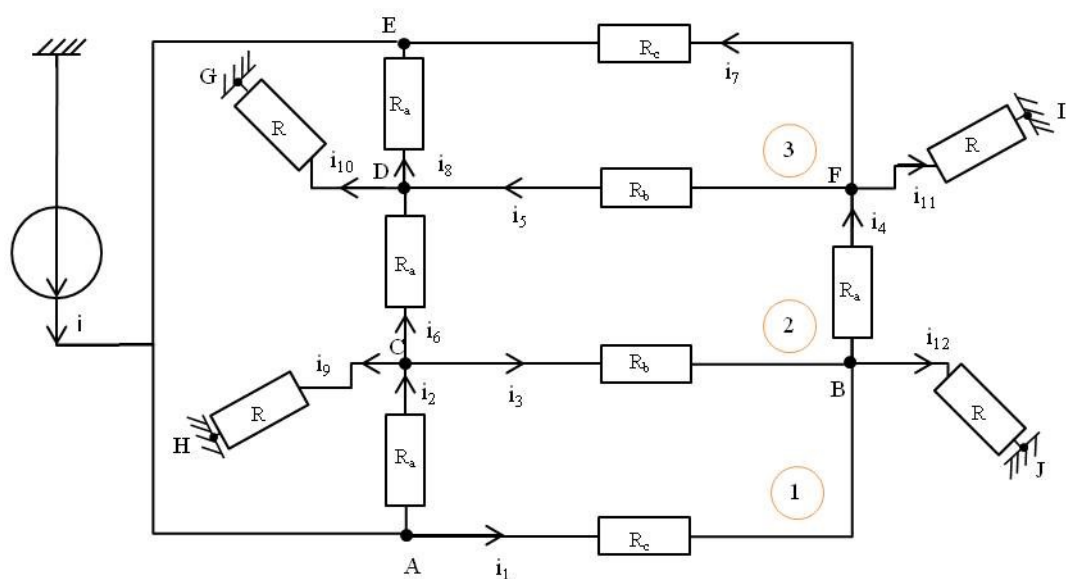


Figure 77 - Schéma électrique du maillage de la puce

Afin d'analyser la répartition du courant dans les branches, l'intensité du courant I est considérée égale à 1 A, et les résistances R sont égales à $13,4 \, \Omega$. Nous obtenons l'intensité

¹⁷ La loi des nœuds : la somme des intensités des courants qui entrent par un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui sortent du même nœud.

¹⁸ La loi des mailles – Définition simple: la somme des tensions dans une maille fermée est égale à 0.

du courant et la tension dans chaque branche grâce au logiciel gratuit LTspice IV¹⁹ (Tableau 16).

Tableau 16 - Résultats d'intensité du courant et de tension dans chaque branche

Intensité	i	i ₁	i ₂	i ₃	i ₄	i ₅	i ₆	i ₇	i ₈	i ₉	i ₁₀	i ₁₁	i ₁₂
[A]	1	0.154	0.345	0.095	0	0.095	0	0.154	0.345	0.25	0.25	0.249	0.249
Tension	U _{ac}	U _{ab}	U _{cb}	U _{cd}	U _{bf}	U _{fd}	U _{de}	U _{fe}	U _{dg}	U _{ch}	U _{fi}	U _{bj}	U
[V]	3.37	3.37	3.34	3.35	3.34	3.34	3.35	3.34	3.35	3.35	3.34	3.34	3.37

Nous avons une symétrie dans le schéma électrique, qui se retrouve dans le tableau des résultats. Le courant passe préférentiellement dans les branches près des plots d'or. L'intensité nulle des courants i_4 et i_6 méritent d'être approfondie avec un modèle plus complet.

En remplaçant les résistances qui symbolisent la jonction de la puce par des diodes, nous obtenons le même résultat pour les intensités de courant, mais des tensions différentes.

1.2 Modèle électrique niveau 2

Nous souhaitons approfondir la répartition du courant dans les branches. Une branche est modélisée par des résistances en série. Entre chaque résistance, une diode est placée pour symboliser la perte du courant vers la jonction. La Figure 78 représente une partie d'une branche :

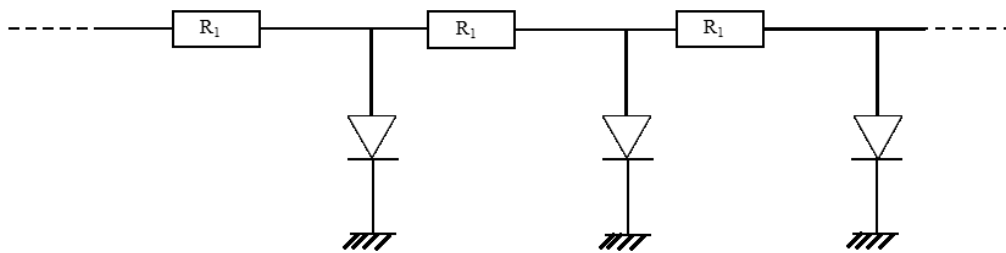


Figure 78 - Représentation d'une branche du schéma électrique du modèle 2

Les résistances sont égales à la résistance d'une branche divisée par le nombre de résistances. Les paramètres des diodes restent inchangés. Chaque résistance et diode sont numérotées entre 1 et 80. La répartition est similaire pour les diodes et les résistances, de la façon suivante (Figure 79):

¹⁹ LTspice IV est un logiciel de simulation professionnel et gratuit pour la création de circuits électroniques analogiques. Il a été développé par l'entreprise américaine Linear Technology.

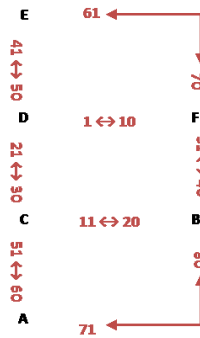


Figure 79 - Schéma de la répartition des diodes et des résistances

Les intensités des résistances évoluent entre 0,32 A et moins de 0,01 A. Les intensités des diodes sont comprises entre 0,015 A et 0,010 A. Les intensités les plus importantes se situent au niveau des deux plots d'or et sur les branches qui leur sont associées pour les diodes et les résistances. Les intensités les plus faibles sont situées sur la branche la plus éloignée des plots d'or.

Pour avoir un résultat plus visuel, nous choisissons de prendre les valeurs absolues des intensités de courants et de tracer le schéma des résistances (Figure 80) et des diodes (Figure 81). L'échelle pour les résistances est divisée en sept pas de 0,05 A, pour les diodes elle est divisée en six pas de 0,01 A.

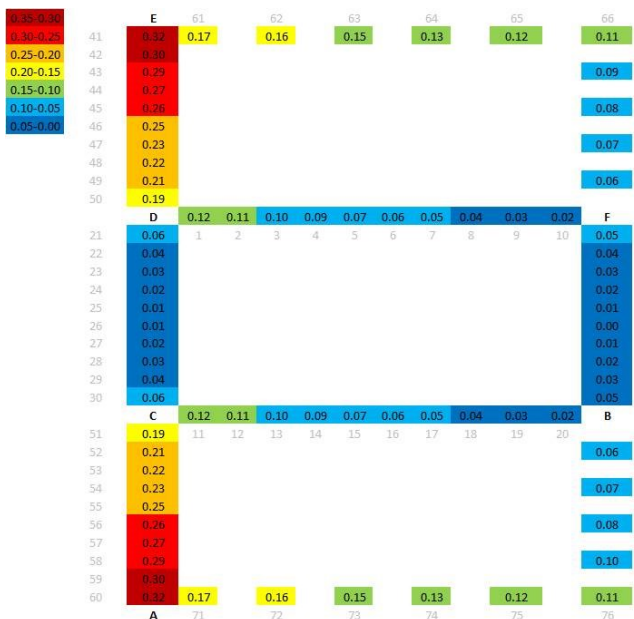


Figure 80 – Schéma de la répartition des intensités dans les résistances – Modèle niveau 2

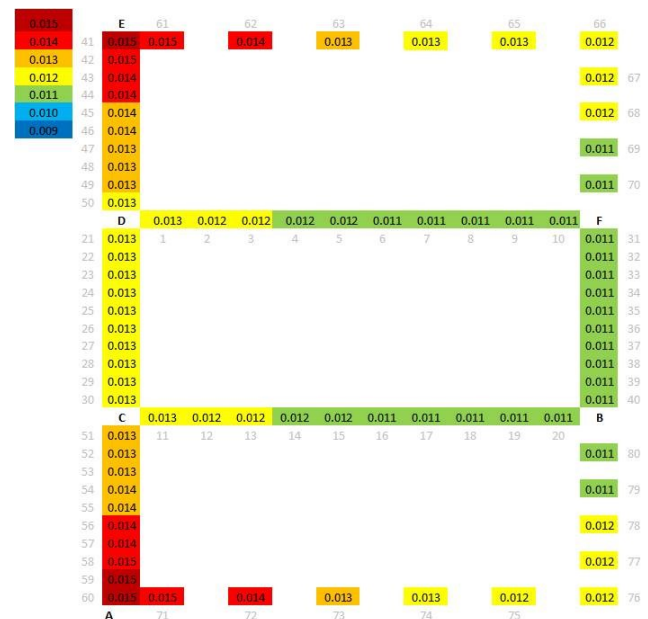


Figure 81 – Schéma de la répartition des intensités dans les diodes – Modèle niveau 2

La branche centrale située près des plots d'or, nommé branche C-D dans le modèle 1, connaît une baisse des intensités au niveau des résistances, ce qui n'est pas le cas pour les diodes. Cela signifie que le courant va vers la jonction de façon continue dans cette branche. Le courant vers la jonction est plus important vers les branches proches des plots d'or.

Les évolutions de l'intensité des résistances et des diodes, dans la branche verticale A-E sont illustrées par la Figure 82 : le premier cas représente l'intensité dans les résistances, le deuxième cas dans les diodes.

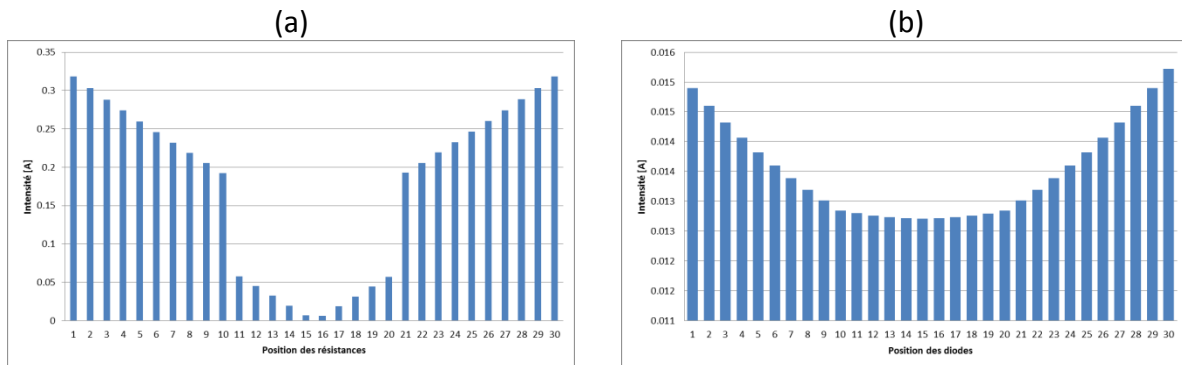


Figure 82 - Evolution de l'intensité dans la branche A-E, pour les résistances (a) et les diodes (b) –Modèle niveau 2

Pour améliorer le modèle de niveau 2, nous modélisons par branche 20 résistances et 20 diodes. L'évolution globale de l'intensité, dans les branches pour les résistances et les diodes, sont similaires au modèle 2. Nous retrouvons les mêmes tendances d'évolution de l'intensité au niveau des diodes et des résistances

1.3 Modèle électrique niveau 3

Le modèle électrique de niveau 3 correspond au modèle du niveau 2, plus un maillage entre chaque branche. Ce maillage est composé de résistances, représentant la résistivité du semi-conducteur, et de diodes, représentant la jonction. Ces diodes sont identiques aux diodes situées sur les branches modélisant les fils d'or. Afin de faciliter le maillage, nous avons divisé les branches AB et EF en deux branches chacune afin d'obtenir six branches avec une résistance global égale à R_a et quatre branches avec une résistance globale égale à R_b .

La Figure 83 montre un élément de maillage, ici situé au nœud E. La résistance R_1 est égale à la résistance R_b divisé par 10, et la résistance R_4 est égale à la résistance R_a divisé par 10. Les résistances R_2 et R_3 représentent la résistivité du semi-conducteur. Nous prenons comme hypothèse que la conductivité électrique du semi-conducteur égale à 1.10^5 S.m. La longueur et la surface sont calculées en fonction de leur position sur la puce. Les résistances R_2 et R_3 sont multipliés dix fois entre chaque branche.

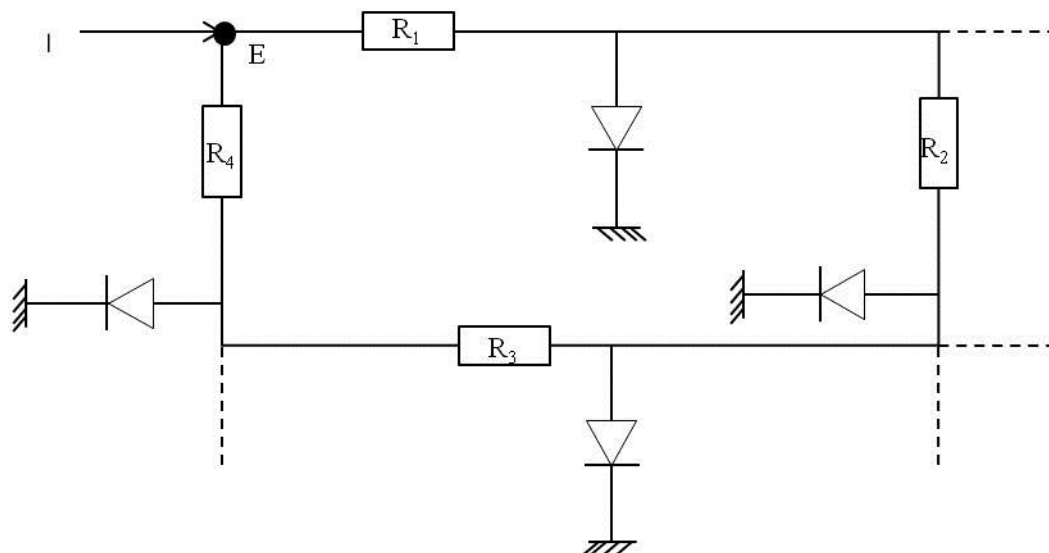


Figure 83 - Description du maillage électrique du niveau 3

Nous obtenons un maillage de l'intensité du courant pour chaque diode et résistance. Afin d'obtenir une « cartographie » de l'intensité, nous remplaçons les zones vides par la moyenne des intensités qui l'entourent (Figure 84).

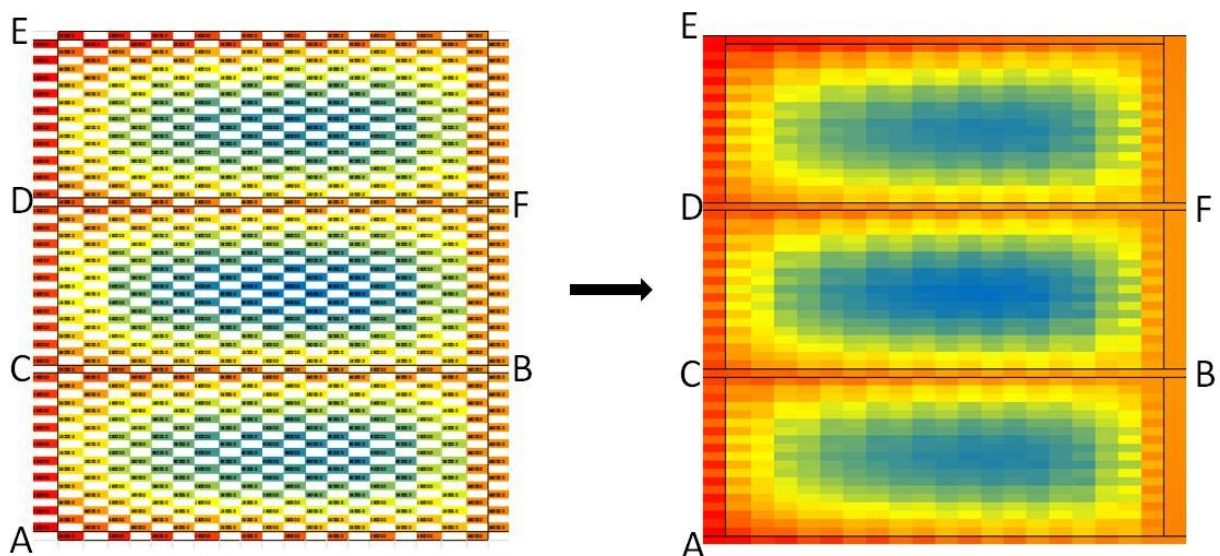


Figure 84 - Passage du maillage à la cartographie des intensités des diodes

Nous avons calculé une cartographie d'intensité pour quatre courants d'alimentation (200 mA, 350 mA, 700 mA et 1 A). Nous nous intéressons préférentiellement au courant qui part vers la jonction, symbolisé par les diodes. Nous calculons la densité de courant au niveau de chaque diode.

La densité de courant est plus important au niveau des fils d'or, quel que soit le courant d'alimentation. La Figure 85 illustre la densité de courant au centre de la puce, sur une ligne verticale pour différents courants d'alimentation : 200 mA, 350 mA, 700 mA et 1 A.

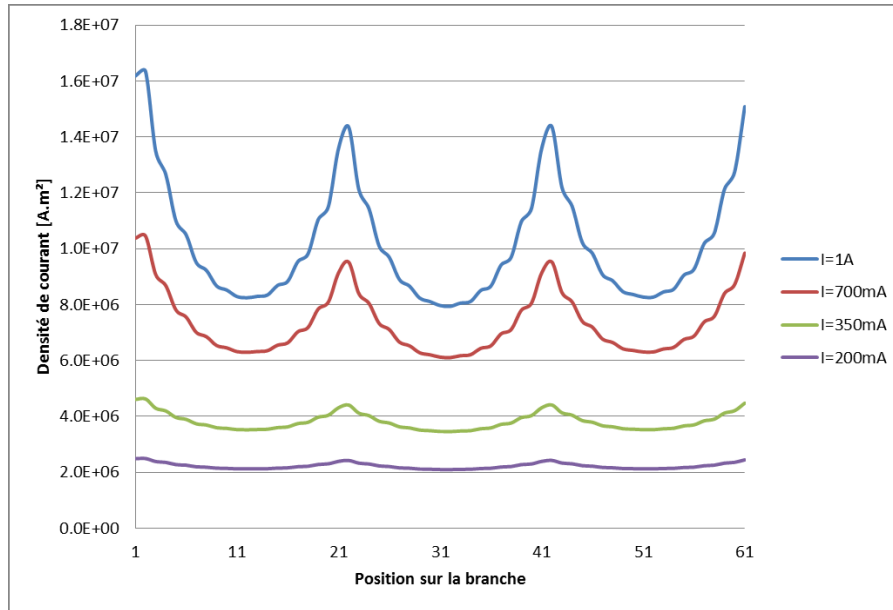


Figure 85 - Evolution de la densité de courant

La densité de courant est plus faible sur les surfaces éloignées du maillage. L'écart entre la densité la plus faible et la densité la plus élevée augmente avec le courant d'alimentation de la LED : 81 % pour 1 A, 34 % pour 350 mA et 19 % pour 200 mA.

Ce modèle électrique nous permet de mieux comprendre la répartition du courant sur la puce. Le courant passe préférentiellement dans les branches qui relient directement les deux plots d'or. Ce modèle est valable pour une LED nue et une LED avec luminophore.

2 LED émettant de la lumière bleue

Dans cette partie, un modèle thermique optique décrira les phénomènes présents au niveau de la jonction d'une puce bleue.

2.1 Modèle thermo-optique

La LED est alimentée la puissance électrique P_{elec} qui est le produit du courant I et de la tension V . La puissance électrique P_{elec} est transformée par la jonction de la puce en flux optique bleu $\Phi_{opt.b}$. Le rendement du flux optique par rapport à la puissance électrique est appelée, dans la bibliographie, *wall-plug efficiency* ou *power efficiency* η_{power} . Ce rendement est différent pour une puce avec luminophore et une puce nue. La puissance électrique, non convertie en lumière, est transformée en chaleur $\dot{Q}_b$.

$$\text{Puissance électrique } P_{elec} = \text{Flux Optique } \Phi_{opt.b} + \text{Chaleur } \dot{Q}_b \quad \text{Eq. 26}$$

$$\eta_{power} = \frac{\Phi_{opt.b}}{P_{elec}} \quad \text{Eq. 27}$$

Pour une puce nue, la jonction de la puce se situe à la surface de la LED. L'analogie électrique des phénomènes thermiques (Figure 86) et les équations ci-dessous décrivent le modèle thermique : la transformation de la puissance électrique en chaleur, ainsi que la dissipation de cette chaleur en conduction vers le PAD Φ_{pad} , et la dissipation vers l'environnement en

convection $\Phi_{convectif}$ et en rayonnement infrarouge Φ_{ray} . Les pertes dues à l'environnement sont rassemblées dans un flux appelé Φ_a .

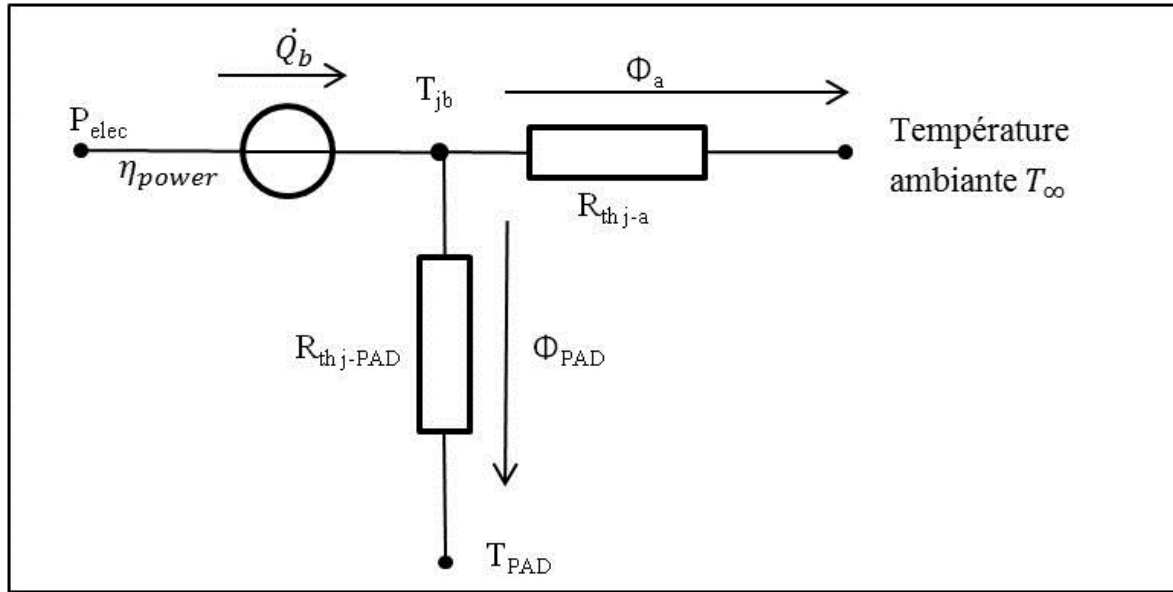


Figure 86 - Analogie électrique des phénomènes thermiques dans une puce bleue

$$\dot{Q}_b = \Phi_{pad} + \Phi_{ray} + \Phi_{convectif} = \Phi_{pad} + \Phi_a \quad \text{Eq. 28}$$

Les flux thermiques de dissipation de chaleur peuvent s'exprimer en fonction de la température de jonction T_{jb} , de la température du PAD T_{PAD} , de la température de l'environnement T_∞ et de la résistance thermique $R_{th j-PAD}$. La chaleur dégagée par la puce peut s'exprimer par l'équation suivante :

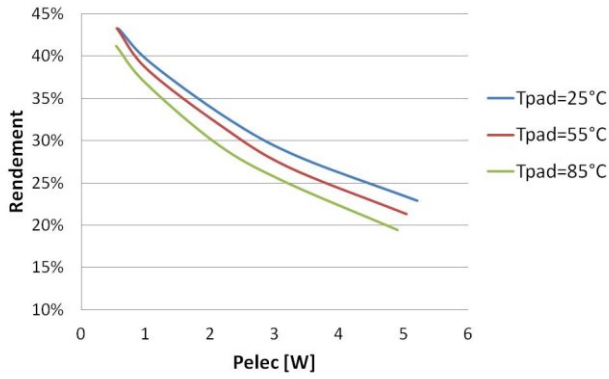
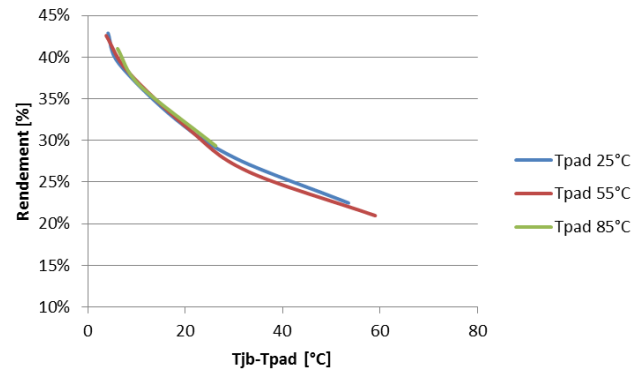
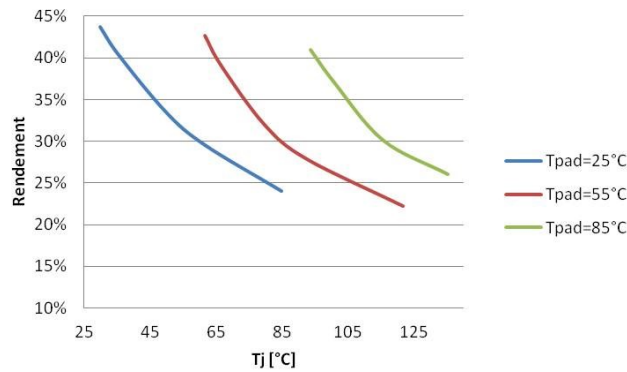
$$\dot{Q}_b = \frac{T_{jb} - T_{PAD}}{R_{th j-PAD}} + \varepsilon_b \sigma S (T_{jb}^4 - T_\infty^4) + hS (T_{jb} - T_\infty) \quad \text{Eq. 29}$$

où :

- ε_b est l'émissivité de la puce bleue ;
- σ la constante de Stefan-Boltzmann ;
- S l'aire de la surface de la puce ;
- h le coefficient de transfert thermique.

2.2 Calcul du rendement

Pour trois températures de PAD ($T_{PAD} = 25^\circ\text{C}$, 55°C et 85°C), nous avons mesuré le flux optique $\Phi_{opt,b}$ émis par une puce bleue pour différentes puissances d'alimentations P_{elec} de la puce. Ensuite nous avons mesuré la température T_{jb} pour ces mêmes P_{elec} et T_{PAD} . Nous avons ainsi calculé le rendement η_{power} et la différence entre T_{jb} et T_{PAD} , appelé ΔT , pour chaque P_{elec} et T_{PAD} . Le calcul du rendement nous donne un rendement différent pour chaque T_{PAD} . Ce rendement diminue progressivement entre 43 % aux faibles puissances jusqu'à 20 % aux puissances plus importantes (Figure 87).

Figure 87 – Rendement en fonction de P_{elec} Figure 88 - Rendement de la puce nue en fonction $T_j - T_{PAD}$ Figure 89 - Rendement de la puce nue en fonction T_j

Nous souhaitons savoir si le rendement de la puce dépend aussi de la température de jonction T_{jb} . Nous trouvons plus pertinent de mettre en évidence la relation entre le rendement et la différence de température ΔT . Nous reprenons la Figure 75 du Chapitre 2 qui nous montre l'évolution du rendement η_{power} en fonction de ΔT (Figure 88). L'évolution du rendement dépend de ΔT . Cela signifie que nous aurions le même rendement pour une puce avec un $T_{PAD} = 30^\circ\text{C}$ ou 70°C , si $T_{jb} = 50^\circ\text{C}$ ou 90°C . L'expression du rendement en fonction de la différence de température entre la jonction et le PAD est une manière novatrice de montrer le lien entre la chaleur et le rendement d'une LED.

Le rendement η_{power} peut s'exprimer en fonction de la chaleur dissipée dans la puce nue $\dot{Q}_b$: $\eta_{power} = 1 - \dot{Q}_b / P_{elec}$. Cela implique que le ratio entre la chaleur $\dot{Q}_b$ et la puissance électrique P_{elec} évolue avec ΔT de manière similaire quel que soit T_{PAD} , alors que les évolutions individuelles de $\dot{Q}_b$ et P_{elec} en fonction de ΔT sont différentes suivant T_{PAD} .

La Figure 90 illustre la chaleur $\dot{Q}_b$ en fonction de la puissance électrique P_{elec} . Nous remarquons que leur relation est linéaire et presque identique pour chaque T_{PAD} . Nous avons tracé sur le graphique les approximations du second ordre pour chaque T_{PAD} . Les relations polynomiales sont résumées dans le Tableau 17 pour chaque T_{PAD} . Cela nous permet de calculer la chaleur dissipée au niveau de la jonction pour chaque T_{PAD} imposée, et le flux optique bleu $\phi_{opt.b}$ sortant de la jonction.

Tableau 17 - Relations polynomiales entre $\dot{Q}_b$ et P_{elec}

	Relation polynomiale du second ordre entre $\dot{Q}_b$ et P_{elec}
$T_{PAD} = 25^\circ C$	$\dot{Q}_b = 0,0267 \times P_{elec}^2 + 0,6462 \times P_{elec} - 0,062$
$T_{PAD} = 55^\circ C$	$\dot{Q}_b = 0,028 \times P_{elec}^2 + 0,6603 \times P_{elec} - 0,0661$
$T_{PAD} = 85^\circ C$	$\dot{Q}_b = 0,0536 \times P_{elec}^2 + 0,6035 \times P_{elec} - 0,0235$

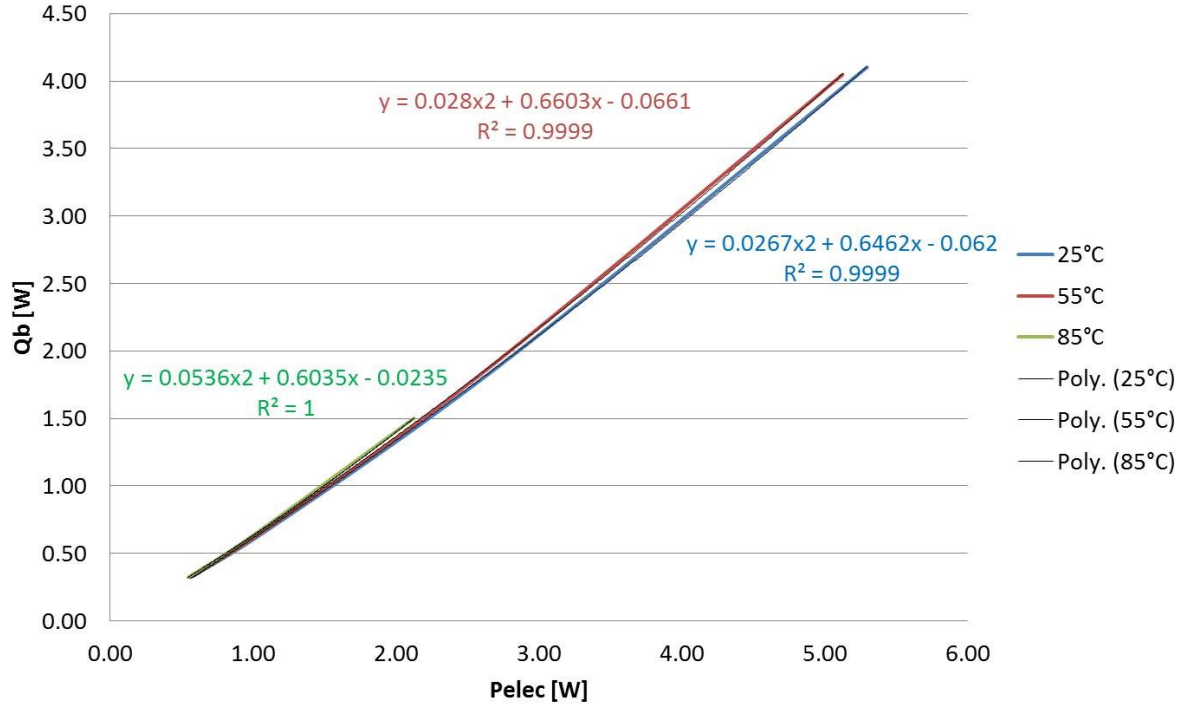


Figure 90 - Evolution de la chaleur dissipée dans la puce en fonction de la puissance électrique injectée

3 LED émettant de la lumière blanche

3.1 Modèle thermo-optique

Pour rappel, la LED est composée d'une puce émettant de la lumière bleue et d'une couche de luminophore de 35 μm déposée sur la puce. Le luminophore permet de transformer une partie de la lumière bleue $\phi_{otp.B}$ en jaune, ce qui donne de la lumière blanche $\phi_{opt.W}$. La conversion de la lumière par le luminophore crée de la chaleur $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ [63]. L'équation 30 relie ces trois grandeurs.

$$\phi_{opt.B} = \phi_{opt.W} + \dot{Q}_{b \rightarrow w} \quad \text{Eq. 30}$$

Nous prenons comme hypothèse que la résistance thermique $R_{th j-PAD}$ entre la jonction et le PAD est identique dans les configurations avec ou sans luminophore.

Pour la LED émettant de la lumière blanche, la jonction se situe sous la couche de luminophore. Le modèle ci-dessous reprend le principe du modèle de la puce bleue avec l'ajout des pertes thermiques $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ dues au luminophore. La chaleur générée $\dot{Q}_w$ est la

somme des pertes thermiques dues à la photo-conversion $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ et de la chaleur générée $\dot{Q}_b$ au niveau de la jonction (Equation 31). Cette chaleur s'évacue par conduction vers le PAD, par convection naturelle et rayonnement infrarouge vers l'environnement. La température de surface de la puce, notée T_w , est mesurée par thermographie infrarouge ; le processus est expliqué dans le chapitre précédent.

L'analogie électrique permet de résumer les phénomènes thermiques présents au niveau de la puce blanche (Figure 91, Figure 92).

$$P_{elec} = \Phi_{opt.w} + \dot{Q}_w \quad \text{Eq. 31}$$

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_{b \rightarrow w} + \dot{Q}_b = \Phi_{pad} + \Phi_{ray} + \Phi_{convectif} \quad \text{Eq. 32}$$

$$P_{elec} = \Phi_{opt.w} + \frac{T_{jw} - T_{PAD}}{R_{ther\ j-PAD}} + \varepsilon_w \sigma S (T_w^4 - T_\infty^4) + hS (T_w - T_\infty) \quad \text{Eq. 33}$$

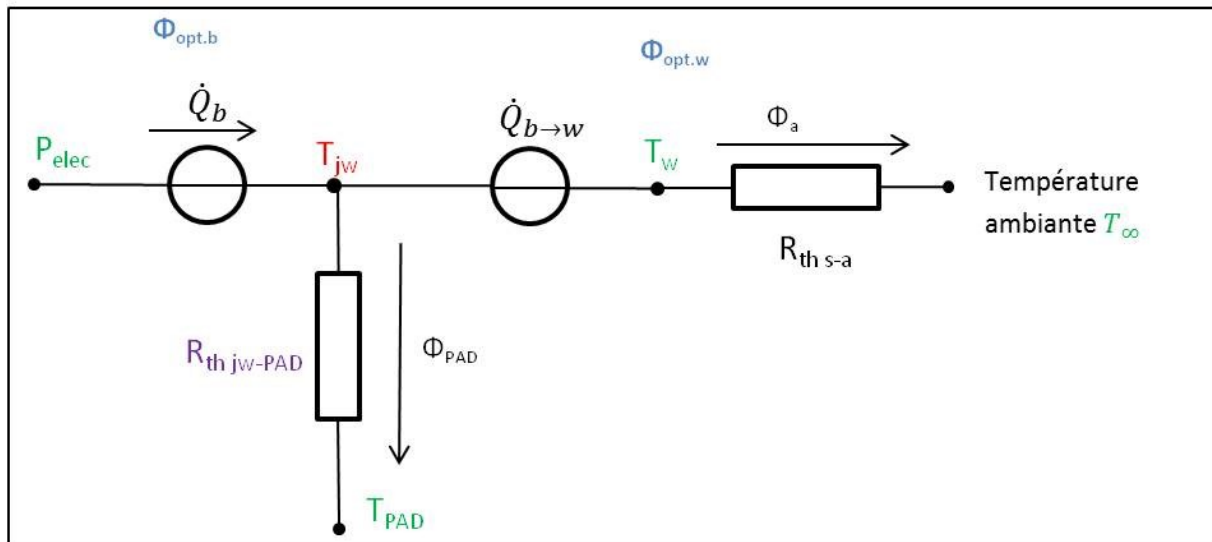


Figure 91 - Analogie électrique des phénomènes thermiques au niveau d'une puce avec luminophore

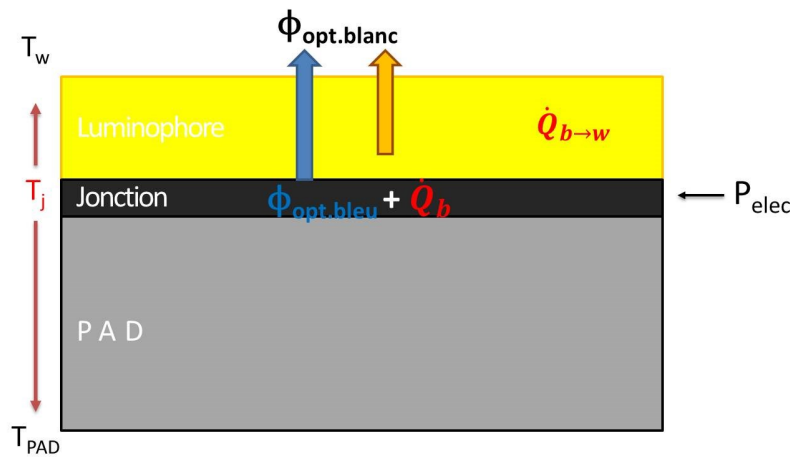


Figure 92 - Résumé des phénomènes thermiques et optiques au sein de la puce

Grâce aux expérimentations, nous connaissons les températures T_{PAD} et T_w , la puissance électrique P_{elec} et le flux optique $\Phi_{opt.w}$ (paramètres en vert), et nous avons calculé $R_{th\ j-PAD}$ dans le chapitre précédent. Nous pouvons exprimer T_{jw} en fonction de ces différents mesures et calculs (Equation 32).

Le but est d'obtenir la température de jonction au niveau local : nous allons premièrement déterminer les pertes thermiques $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ dues à la photo-conversion, ensuite nous allons calculer la température de jonction T_{jw} au niveau global et enfin nous verrons comment approcher T_{jw} au niveau local.

3.2 Calcul des pertes thermiques dans le luminophore

Pour le calcul des pertes thermiques $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$, de nouveaux paramètres sont introduits dans le tableau suivant.

Nomenclature		Valeur	
a	Coefficient d'absorption du luminophore [mm ⁻¹]	$a_y = \text{inf. à } 0.5 \text{ mm}^{-1}$ [64] ou 2 mm^{-1} [65]	$a_b = 3-8$ [64] ou 15 mm^{-1} [65] [64]
d	Epaisseur du luminophore [μm]	$d = 35 \mu\text{m}$	
s	Coefficient de diffusion du luminophore [mm ⁻¹]	$s_b = 15 \text{ mm}^{-1}$ [66]	$s_y = 5 \text{ mm}^{-1}$ [67]
z	Profondeur [μm]	Compris entre 0 et d	
α	$\alpha = 2\sqrt{a_b(a_b + 2s_b)}$		
β	$\beta = \sqrt{a_b/(a_b + 2s_b)}$		
γ	Coefficient de réflexion	$\gamma_b = 0,7$	$\gamma_y = 0,7$ [65] [68]
μ	$\mu = 2\sqrt{a_y(a_y + 2s_y)}$		
ν	$\nu = \sqrt{a_y/(a_y + 2s_y)}$		
η_{con}	Rendement de la conversion énergétique $\eta_{con} = \frac{\lambda_{absorbé}}{\lambda_{émis}} \eta_{QE}$	$\eta_{con} = 0,72$ [69]	
η_{QE}	Rendement quantique du luminophore	$\eta_{QE} = 0,90$ [69] [70]	
$\lambda_{absorbé}$	Longueur d'onde de la lumière absorbée par le luminophore [nm]	$\lambda_{absorbé} = 440 \text{ nm}$	
$\lambda_{émis}$	Longueur d'onde de la lumière émise par le luminophore [nm]	$\lambda_{émis} = 550 \text{ nm}$	

Le coefficient de réflexion de la lumière bleue n'est pas donné dans la bibliographie. Nous avons pris la même valeur que pour la lumière jaune.

Dans le papier de Luo et Hu [63], la théorie de Kubelka-Munk [71] a été modifiée pour exprimer le processus de la conversion de la lumière dans un luminophore. Dans la Figure 93, nous définissons pour une fine couche de luminophore, le flux optique de diffusion vers l'avant $E(z)$ et le flux optique diffusé vers l'arrière $F(z)$.

Ce modèle considère que le luminophore absorbe de la lumière que dans une longueur d'onde $\lambda_{absorbé}$ et réémet de la lumière que dans une seule longueur d'onde $\lambda_{émis}$. Ceci est approximation de la réalité.

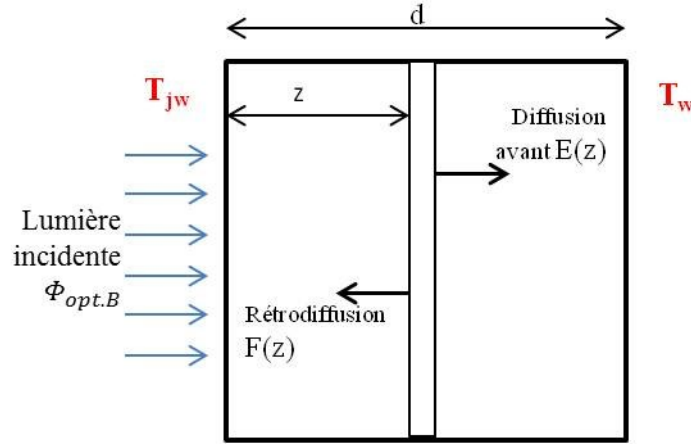


Figure 93 - Fonctions de diffusion suivant la profondeur z dans l'épaisseur du luminophore

La chaleur $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ correspond à la somme de la génération de chaleur sur l'épaisseur du luminophore due à la photo-conversion et de la perte de la lumière réfléchi.

$$\dot{Q}_{b \rightarrow w} = \int_0^d Q_{phos}(z) dz + Q_{ref} \quad \text{Eq. 34}$$

La fonction de la chaleur générée dans le luminophore due à la conversion de la lumière bleue à la lumière jaune Q_{phos} s'exprime en fonction des fonctions de diffusion $E(z)$ et de rétrodiffusion $F(z)$ pour la lumière bleu (indice b) et de la lumière jaune (indice y).

$$Q_{phos}(z) = (1 - \eta_{con})a_b[E_b(z) + F_b(z)] + a_y[E_y(z) + F_y(z)] \quad \text{Eq. 35}$$

$$Q_{phos}(z) = 2(1 - \eta_{con})a_b[Ae^{\alpha z} + Be^{-\alpha z}] + 2a_y \left[Ce^{\mu z} + De^{-\mu z} + \frac{2\eta_{con}a_b\mu}{v(\mu^2 - \alpha^2)} (Ae^{\alpha z} + Be^{-\alpha z}) \right]$$

La perte de la lumière due à la réflexion se formule de la manière suivante :

$$Q_{ref} = (1 - \gamma_b)F_b(0) + (1 - \gamma_y)F_y(0) \quad \text{Eq. 36}$$

Ces deux fonctions ($E(z)$ et $F(z)$) pour la lumière bleue et pour la lumière jaune peuvent s'exprimer de la manière suivante :

$$E_b(z) = A(1 - \beta)e^{\alpha z} + B(1 + \beta)e^{-\alpha z} \quad \text{Eq. 37}$$

$$F_b(z) = A(1 + \beta)e^{\alpha z} + B(1 - \beta)e^{-\alpha z} \quad \text{Eq. 38}$$

$$E_y(z) = C(1 - v)e^{\mu z} + D(1 + v)e^{-\mu z} + \frac{2\eta_{con}a_b}{v(\mu^2 - \alpha^2)} [A(\mu - v\alpha)e^{\alpha z} + B(\mu + v\alpha)e^{-\alpha z}] \quad \text{Eq. 39}$$

$$F_y(z) = C(1 + \nu)e^{\mu z} + D(1 - \nu)e^{-\mu z} + \frac{2\eta_{con}a_b}{\nu(\mu^2 - \alpha^2)} [A(\mu + \nu\alpha)e^{\alpha z} + B(\mu - \nu\alpha)e^{-\alpha z}]$$

Eq. 40

Les coefficients A, B, C et D ont été résolus grâce aux conditions limites. L'ordonnée $z = 0$ correspond à l'interface entre la puce (jonction) et le luminophore. Par conséquent, les lumières rétrodiffusées bleue et jaune, à l'interface ($z=0$), sont réfléchies vers le luminophore. Les conditions limites sont les suivantes :

$$E_b(0) = \Phi_{opt.B} + \gamma_b F_b(0)$$

Eq. 41

$$F_b(d) = 0$$

Eq. 42

$$E_y(0) = \gamma_y F_y(0)$$

Eq. 43

$$F_y(d) = 0$$

Eq. 44

Les coefficients d'absorption, de réflexion et de diffusion, le rendement de conversion et le flux bleu incident $\Phi_{opt.B}$ ou E_0 interviennent dans les coefficients A, B, C et D.

Nous ne connaissons pas la valeur de $\Phi_{opt.B}$ car celle-ci dépend de la température de jonction T_{jw} . Nous allons prendre comme hypothèse, dans un premier temps, que $\Phi_{opt.B} = 1$ W, pour évaluer la chaleur dégagée. Les variations des fonctions de diffusion $E(z)$ et de rétrodiffusion $F(z)$ pour la lumière bleue et de la lumière jaune suivant z ont été calculées. Nous avons tracé les fonctions normalisées par rapport à $\Phi_{opt.B}$ (Figure 94).

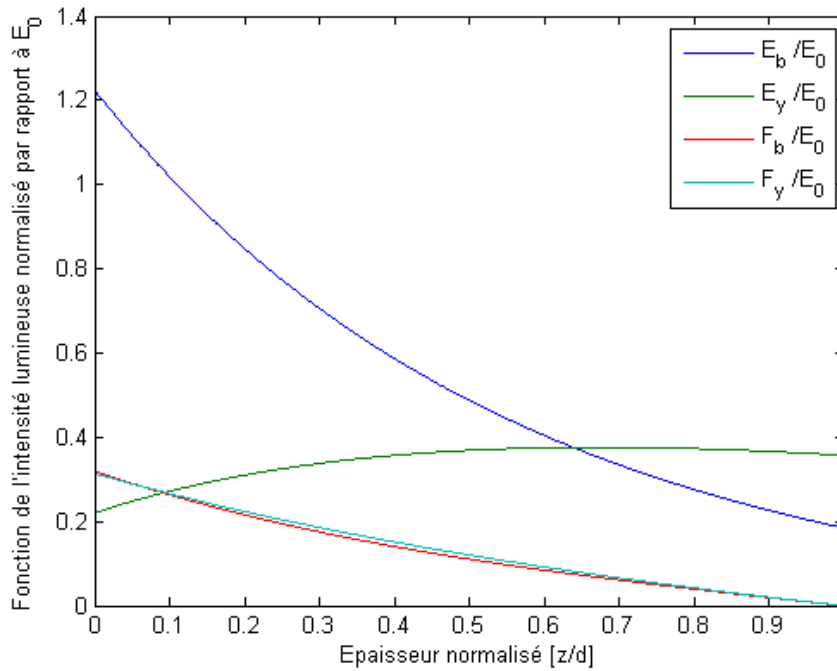


Figure 94 - Variation des intensités lumineuses normalisées bleues et blanches avec la profondeur z

Avec l'augmentation de z , $E_b(z)$ diminue considérablement car le flux est absorbé et diffusé dans l'épaisseur. $E_y(z)$ tend vers la hausse, puis chute à la fin : quand z augmente dans un premier temps, plus de lumière jaune est convertie et $E_y(z)$ augmente légèrement; quand z augmente encore, les effets de l'absorption de la lumière jaune et de diffusion l'emportent sur l'augmentation de l'intensité de la lumière jaune, donc $E_y(z)$ diminue. Les fonctions de rétrodiffusion de la lumière diminuent car avec l'augmentation de z , la lumière bleue et la lumière jaune sont rétrodiffusées par une couche de luminophore plus fine (épaisseur $d-z$).

Grâce à l'équation 34, nous calculons la fonction de la chaleur générée Q_{phos} et nous avons normalisé Q_{phos} par rapport à $\Phi_{opt.B}$ suivant la profondeur z (Figure 95). Il semble que la chaleur diminue avec l'augmentation de la profondeur, car plus la lumière est diffusée, plus les phénomènes d'absorption et de conversion se produisent près de la puce. Cela signifie que le luminophore, proche de la puce, génère plus de chaleur que la partie du luminophore éloignée de la puce.

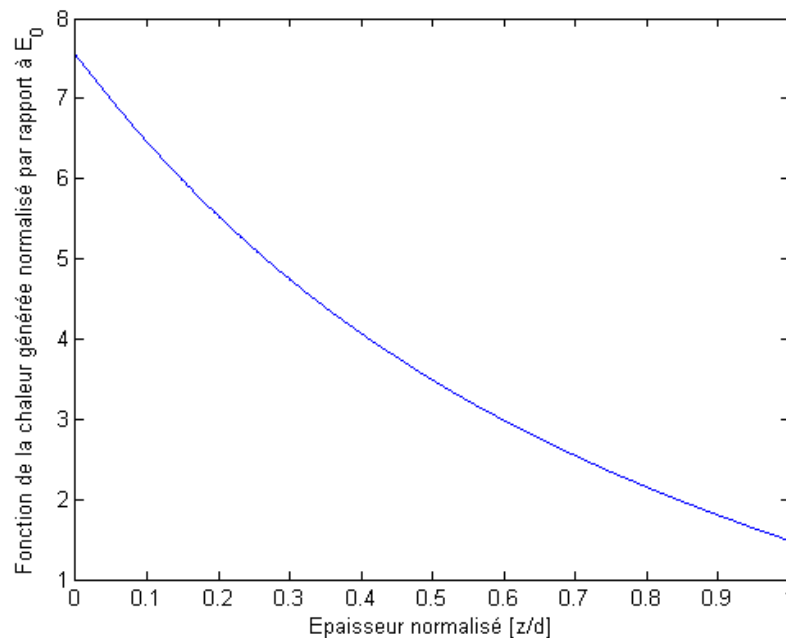


Figure 95 – Normalisation de la chaleur générée dans le luminophore

Finalement, nous calculons la chaleur $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ correspondant à la fonction de la génération de chaleur sur l'épaisseur du luminophore Q_{phos} et à la perte de la lumière réfléchie Q_{ref} . Pour un flux bleu incident $\Phi_{opt.B} = 1W$, la chaleur totale générée sur l'épaisseur du luminophore est égale à $\dot{Q}_{b \rightarrow w} = 0,324 W$ (Tableau 18).

Tableau 18 - Calcul de la chaleur totale générée, en watt, dans le luminophore

Q_{phos}	0,134
$+ Q_{ref}$	$+ 0,190$
$= \dot{Q}_{b \rightarrow w}$	$= 0,324$

Le flux optique en sortie du luminophore $E(d)$ est la somme du flux de diffusion de la lumière bleue $E_b(d)$ et de la lumière blanche $E_v(d)$. Nous pouvons assimiler le flux optique $E(d)$ au flux optique visible sortant de la puce blanche $\Phi_{opt.W}$. Pour un flux bleu incident $\Phi_{opt.B} = 1W$, le flux de la lumière blanche obtenu est de :

$$\Phi_{opt.W} = 0,542 W$$

3.3 Intégration du modèle optique dans le modèle thermique

3.3.1 Description du modèle

Dans un premier temps, nous considérons notre modèle thermique, entre la température de surface T_w et la température de jonction T_{jw} , en 1D et stationnaire. La Figure 96 rappelle l'analogie électrique des phénomènes thermiques au niveau de la puce blanche.

L'équation de la chaleur peut s'exprimer de la manière suivante :

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}_{b \rightarrow w}(z)}{V_{lum}} = 0 \quad \text{Eq. 45}$$

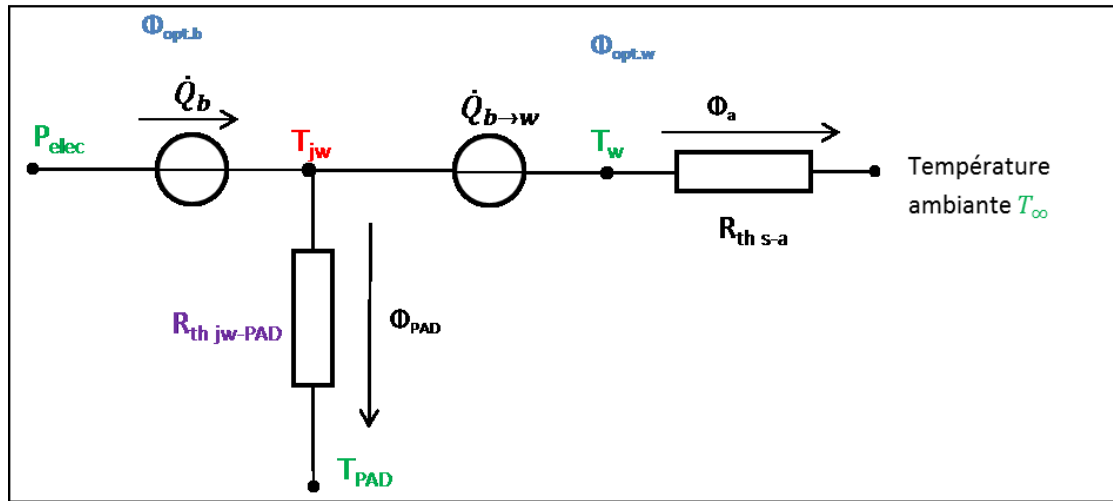


Figure 96 - Analogie électrique des phénomènes thermiques au niveau d'une puce avec luminophore

La conductivité thermique du luminophore est notée k . Voici les conditions aux limites pour résoudre cette équation différentielle :

- A la surface du luminophore :

$$k \frac{dT}{dz}(z = d) = -\Phi_a / S \quad \text{Eq. 46}$$

$$k \frac{dT}{dz}(z = d) = -(h \times (T_w - T_\infty) + \sigma \epsilon_w (T_w^4 - T_\infty^4))$$

- A la jonction :

$$k \frac{dT}{dz}(z = 0) = (\Phi_{PAD} - \dot{Q}_b) / S \quad \text{Eq. 47}$$

$$k \frac{dT}{dz}(z = 0) = \left(\frac{T_{jw} - T_{PAD}}{R_{PAD}} - \dot{Q}_b \right) / S$$

Nous avons mesuré $T(z=d)=T_w$, donc nous pouvons déduire les pertes thermiques Φ_a , vers l'environnement, convectives et radiatives. Nous cherchons à connaître $T(z=0) = T_{jw}$.

En substituant les résultats de l'équation 35 dans l'équation 45, nous obtenons :

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = - \frac{\dot{Q}_{b \rightarrow w}(z)}{V_{lum}} \quad \text{Eq. 48}$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = - \frac{\left[e^{\alpha z} \left[(1-\eta_{con})a_b A + \frac{4\eta_{con}a_b a_y \mu}{v(\mu^2-\alpha^2)} A \right] + e^{-\alpha z} \left[(1-\eta_{con})a_b B + \frac{4\eta_{con}a_b a_y \mu}{v(\mu^2-\alpha^2)} B \right] + e^{\mu z} (2a_y C) + e^{-\mu z} (2a_y D) + Q_{ref} \right]}{V_{lum}} \quad \text{Eq. 49}$$

$$\text{Simplification : } k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = - \frac{[e^{\alpha z}.AA + e^{-\alpha z}.BB + e^{\mu z}.CC + e^{-\mu z}.DD + Q_{ref}]}{V_{lum}} \quad \text{Eq. 50}$$

$$\text{Résolution : } \left[k \frac{dT}{dz} \right]_0^d = - \int_0^d \dot{Q}_{b \rightarrow w}(z) dz \quad \text{Eq. 51}$$

$$\Leftrightarrow k \frac{dT}{dz}(z=d) - k \frac{dT}{dz}(z=0) = (-\Phi_a - \Phi_{PAD} + \dot{Q}_b) \frac{1}{S}$$

$$\Leftrightarrow \Phi_a + \Phi_{PAD} = \dot{Q}_b + \int_0^d \dot{Q}_{b \rightarrow w}(z) dz$$

$$\Leftrightarrow S [h(T_w - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4)] + \frac{T_{jw} - T_{PAD}}{R_{th j-PAD}} = \dot{Q}_b + \int_0^d \dot{Q}_{b \rightarrow w}(z) dz$$

$$\text{Où } \int_0^d \dot{Q}_{b \rightarrow w}(z) dz = \int_0^d e^{\alpha z}.AA + e^{-\alpha z}.BB + e^{\mu z}.CC + e^{-\mu z}.DD + Q_{ref} dz \quad \text{Eq. 52}$$

$$\begin{aligned} \int_0^d \dot{Q}_{b \rightarrow w}(z) dz &= \frac{AA(e^{\alpha d} - 1) + BB(1 - e^{-\alpha d})}{\alpha} + \frac{CC(e^{\mu d} - 1) + DD(1 - e^{-\mu d})}{\mu} \\ &+ Q_{ref} \times d \end{aligned}$$

La température de jonction peut s'exprimer ainsi :

$$T_{jw} = \left(\dot{Q}_b + \int_0^d \dot{Q}_{b \rightarrow w}(z) dz - (h \times (T_w - T_\infty) + \sigma \varepsilon_w (T_w^4 - T_\infty^4)) \times S \right) \times R_{th j-PAD} + T_{PAD} \quad \text{Eq. 53}$$

La conductivité du luminophore n'intervient pas dans l'équation car nous sommes en régime stationnaire.

Pour résoudre T_{jw} , nous exprimons :

- $\dot{Q}_b$ grâce à la relation polynomiale qui le relie à P_{elec} (Tableau 17 p.101) ;
- $\Phi_{opt.B}$ comme la différence entre P_{elec} et $\dot{Q}_b$;

- $R_{th\ j-PAD}$ est défini pour chaque T_{PAD} en fonction des résultats obtenues précédemment ;
- $h = 10\text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$;
- $T_{\infty} = 296\text{ K}$.

Pour connaître T_{jw} , les données d'entrées sont la puissance électrique P_{elec} injectée dans la LED, la température du PAD T_{PAD} et la température de surface T_w .

3.3.2 Résolution du modèle

Avant de calculer la température de jonction T_{jw} pour différents cas, la sensibilité à T_{jw} a été étudiée afin d'identifier les paramètres qui ont le plus d'influence, et la conservation de l'énergie au niveau de la puce est vérifiée.

3.3.2.1 Calcul de sensibilité

L'analyse des sensibilités est une méthode qui permet d'observer la contribution des paramètres d'un modèle à la variation des grandeurs observées du modèle [72]. Elle permet d'obtenir une information, à la fois, qualitative et quantitative sur les paramètres influençant le plus la sortie du modèle, avec un faible nombre de simulations. Les coefficients de sensibilité de T_{jw} aux différents paramètres sont obtenus par une approximation linéaire centrée du premier ordre en faisant varier chaque paramètre au voisinage de sa valeur nominale:

$$S_i = \frac{T_{jw}(\beta_i + \delta\beta_i) - T_{jw}(\beta_i - \delta\beta_i)}{2\delta\beta_i} \quad \text{Eq. 54}$$

Les coefficients de sensibilité ont été calculés avec la même perturbation de 1 % :

- la résistance thermique du PAD $R_{th\ j-PAD}$;
- la chaleur dissipée au niveau de la jonction $\dot{Q}_b$;
- la chaleur créée dans le luminophore $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$;
- la température de surface T_w ;
- le rendement quantique du luminophore η_{QE} .

Nous avons calculé que, si nous faisons une erreur de 50 % soit sur le calcul de la résistance thermique $R_{th\ j-PAD}$, soit sur la chaleur $\dot{Q}_b$, l'écart entre les températures de jonction calculées normalement et calculées avec erreur est de 25 % dans le cas de $R_{th\ j-PAD}$, et 20 % dans le cas de $\dot{Q}_b$. Quant à la température de surface T_w , son influence est négligeable sur la température de jonction : une erreur de 50 % sur la mesure de la température de surface conduit à un écart de moins 0,1 % entre les températures de jonction.

Les coefficients de sensibilité réduits sont aussi calculés :

$$S_R = \beta_i \left(\frac{\partial T(\beta)}{\partial \beta_i} \right) \quad \text{Eq. 55}$$

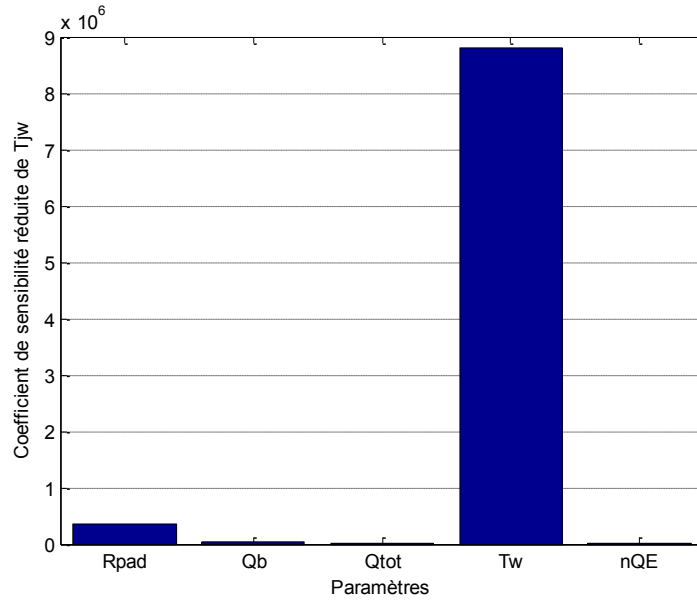


Figure 97 – Coefficients de sensibilité réduits de T_{jw} aux paramètres $R_{th j-PAD}$, $\dot{Q}_b$, $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$, T_w et η_{QE} .

Cette figure montre que parmi les différents paramètres, la température de surface T_w a une sensibilité réduite très supérieure aux autres.

3.3.2.2 Conservation de l'énergie

Pour vérifier la conservation de l'énergie, nous calculons les flux thermiques dissipés vers le PAD et vers l'environnement, la chaleur créée par la conversion photonique et le flux optique de lumière blanche grâce au modèle thermique-optique. La somme de ces calculs est comparée à la puissance électrique mesurée.

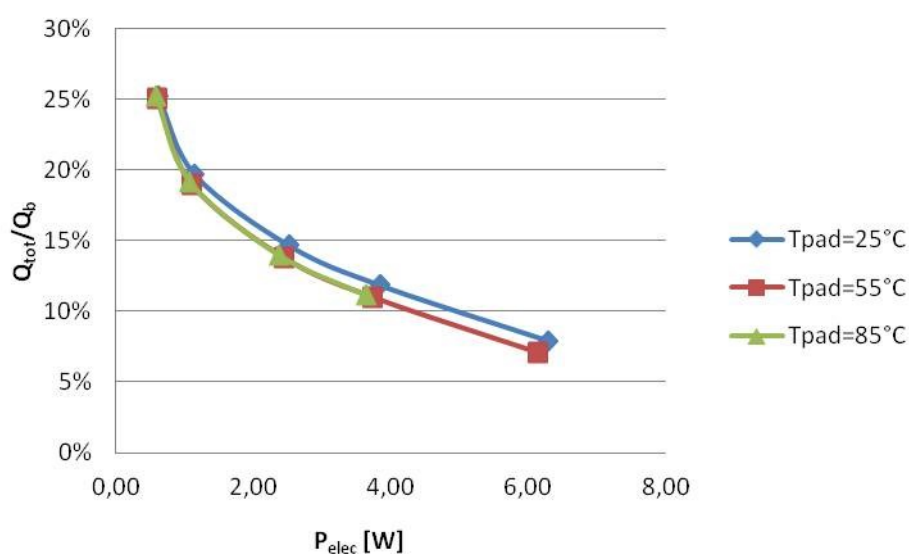
$$P_{elec} = \Phi_{opt.b} + \dot{Q}_b = \dot{Q}_{b \rightarrow w} + \Phi_a + \Phi_{PAD} + \Phi_{opt.w} \quad \text{Eq. 56}$$

La vérification de la conservation de l'énergie a été effectuée pour une puce avec luminophore alimentée à cinq courants différents (200 mA, 350 mA, 700 mA, 1 A et 1,5 A) et trois températures T_{PAD} (25 °C, 55 °C et 85 °C). Le Tableau 19 résume les valeurs mesurées et calculées. Il nous confirme que la conservation de l'énergie est bien respectée. Le léger écart de 0,01 W pour certains état peut s'expliquer par les approximations du modèle optique et le calcul de $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$.

Une grande partie de la chaleur créée dans le luminophore $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ part vers le PAD. Nous ne pouvons pas négliger la chaleur $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ car son poids représente entre 25 % et 7 % de celui de $\dot{Q}_b$ (Figure 98).

Tableau 19 - Vérification de la conservation de l'énergie

Mesures		Calcul				Conservation de l'énergie
T_{PAD}	P_{elec}	Φ_{PAD}	$Q_{b \rightarrow w}$	Q_a	$\Phi_{opt.w}$	$\Phi_{PAD} + Q_{b \rightarrow w} + \Phi_{opt.w} + Q_a - P_{elec}$
°C	W	W	W	W	W	W
24,9	0,62	0,39	0,09	1,5E-04	0,15	0,01
25,2	1,14	0,77	0,14	2,1E-04	0,23	0,00
25,4	2,52	1,85	0,25	3,8E-04	0,42	0,01
25,5	3,84	2,96	0,33	5,8E-04	0,56	0,01
25,5	6,29	5,23	0,40	9,6E-04	0,67	0,01
55,0	0,59	0,37	0,08	4,9E-04	0,14	0,00
55,2	1,10	0,75	0,13	5,9E-04	0,22	0,00
55,2	2,44	1,81	0,24	7,9E-04	0,39	0,01
55,3	3,73	2,92	0,31	1,0E-03	0,51	0,01
55,1	6,14	5,20	0,36	1,5E-03	0,59	0,01
85,2	0,58	0,36	0,08	9,5E-04	0,14	0,00
85,2	1,07	0,73	0,13	1,0E-03	0,22	0,00
85,0	2,37	1,76	0,23	1,3E-03	0,39	0,00
85,3	3,63	2,83	0,30	1,7E-03	0,50	0,01


Figure 98 - Evolution du poids de $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ en fonction de P_{elec}

La chaleur dissipée $\dot{Q}_w$ dans toute la puce varie de façon uniforme en fonction de la puissance électrique P_{elec} , indépendamment de T_{PAD} (Figure 99). La différence, entre la chaleur dissipée au niveau de la jonction $\dot{Q}_b$ et la chaleur dissipée dans toute la puce $\dot{Q}_w$, est la chaleur créée dans le luminophore $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$; cette chaleur dépend aussi de la puissance électrique P_{elec} mais est indépendante de la température T_{PAD} .

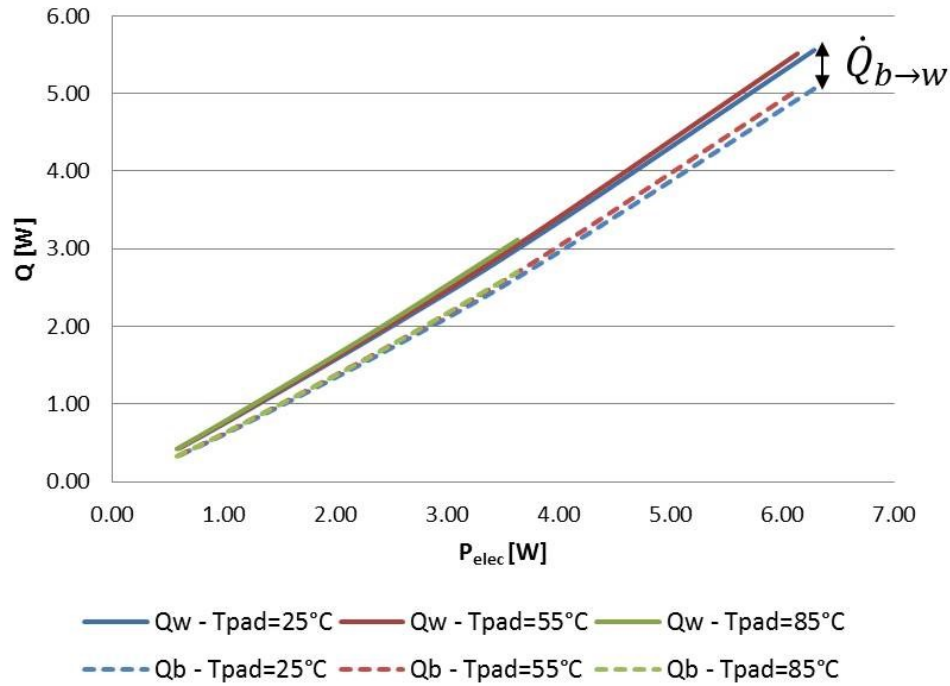


Figure 99 - Evolution des chaleurs Q_b et Q_w en fonction de P_{elec}

3.3.2.3 Calcul de la température de jonction T_{jw}

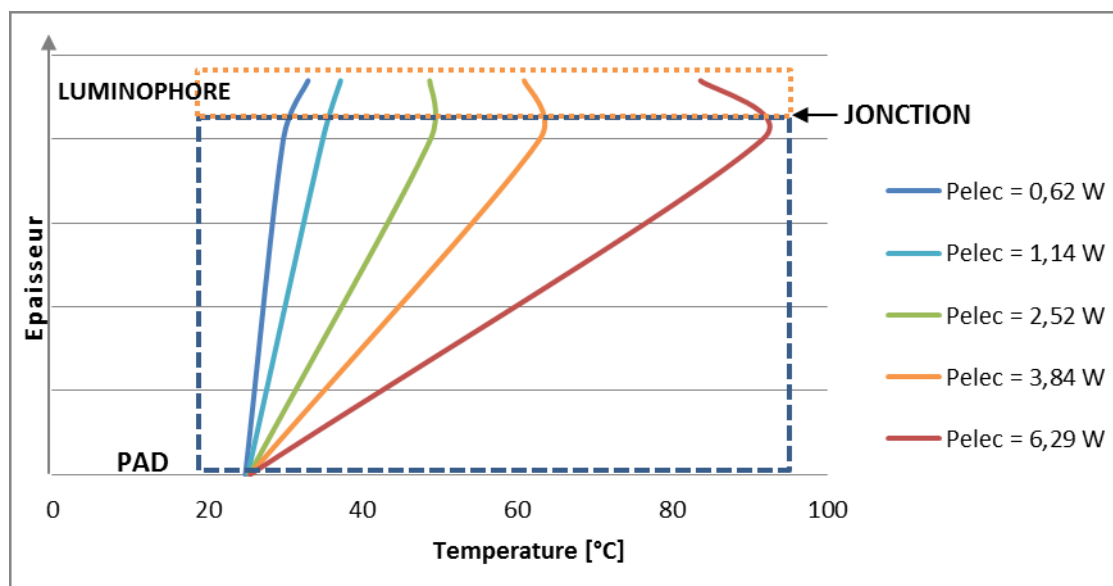
Pour chacun des cas décrits précédemment, nous calculons la température de jonction T_{jw} , ainsi que la chaleur créée au niveau de la jonction $\dot{Q}_b$, ce qui nous permet d'établir le rendement de la puce. Le rendement total de la puce avec le luminophore est comparé entre celui obtenu avec le flux optique mesuré $\phi_{opt.w-M}$ et avec celui calculé $\phi_{opt.w-C}$.

Le Tableau 20 montre les résultats de température, de flux de chaleur et de rendement. Les valeurs exactes de T_{PAD} sont identifiées dans le tableau. Pour $T_{PAD} = 25^\circ\text{C}$, la température de jonction T_{jw} est inférieure à la température de surface T_w pour les faibles courants électriques. Aux faibles puissances, avec la température T_{PAD} réglée à une température proche de la température ambiante, l'énergie créée au niveau de la puce est « pompée » par le module Peltier. Pour les autres courants et les autres T_{PAD} , la différence $T_{jw} - T_w$ est positive et augmente avec le courant, jusqu'à atteindre 17°C pour $T_{PAD} = 85^\circ\text{C}$ et $I = 1\text{ A}$.

Tableau 20 – Calcul de la température de jonction T_{jw}

Mesures					Calcul					
T_{pad}	P_{elec}	$\phi_{opt.w-M}$	Q_w	T_w	T_{jw}	Q_b	$\phi_{opt.w-C}$	Rendement puce	Rendement Total avec F_w mesuré	Rendement Total avec F_w calculé
°C	W	W	W	°C	°C	W	W			
24.9	0.62	0.18	0.44	33.0	29.8	0.35	0.15	43%	29%	24%
25.2	1.14	0.28	0.86	37.2	34.9	0.71	0.23	38%	25%	20%
25.4	2.52	0.50	2.02	48.7	48.8	1.74	0.42	31%	20%	17%
25.5	3.84	0.65	3.19	60.9	62.9	2.81	0.56	27%	17%	14%
25.5	6.29	0.73	5.56	83.7	91.7	5.06	0.67	20%	12%	11%
55.0	0.59	0.17	0.43	55.5	60.3	0.33	0.14	44%	28%	23%
55.2	1.10	0.26	0.84	61.3	65.9	0.69	0.22	37%	24%	20%
55.2	2.44	0.46	1.98	73.9	81.1	1.71	0.39	30%	19%	16%
55.3	3.73	0.58	3.15	87.1	97.0	2.79	0.51	25%	16%	14%
55.1	6.14	0.62	5.51	113.3	129.3	5.04	0.59	18%	10%	10%
85.2	0.58	0.16	0.42	82.1	91.7	0.33	0.14	44%	27%	24%
85.2	1.07	0.24	0.83	87.2	98.4	0.67	0.22	37%	23%	20%
85.0	2.37	0.41	1.96	101.4	116.8	1.66	0.39	30%	17%	16%
85.3	3.63	0.52	3.11	119.7	136.5	2.70	0.50	26%	14%	14%

La Figure 100 décrit la répartition de la chaleur pour le cas où $T_{PAD} = 25^\circ\text{C}$ et $I = 1,5\text{ A}$.

Figure 100 - Schéma de la répartition de la température dans une puce, $T_{PAD} = 25^\circ\text{C}$

Le flux optique blanc calculé $\phi_{opt.w-C}$ est inférieur au flux optique blanc mesuré $\phi_{opt.w-M}$. Cette différence explique l'écart que nous observons pour le rendement total de la puce.

Cette différence peut être expliquée par les incertitudes des mesures, des propriétés optiques ou les approximations du modèle optique.

L'incertitude sur les mesures optiques et les mesures électriques est estimé à 1 % car elles sont effectuées avec des appareils calibrés. Dans le cas de l'incertitude de la mesure de thermographie

infrarouge, même si la prise de mesure est correcte, la justesse finale est estimée de +/- 3 ou 4 °C en dessous de 100 °C, et de 3 à 4 % au-dessus de 100 °C.

Ensuite, les propriétés optiques du luminophore, qui ont été utilisées dans le calcul de la chaleur $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ due à la photo-conversion, ont été estimées grâce à la bibliographie. La précision sur des données est moins correcte que si elles avaient été mesurées.

Puis, le modèle thermo-optique a aussi ces approximations, comme le calcul de $\dot{Q}_{b \rightarrow w}$ et celui du flux optique blanc qui en découle. Ils sont estimés grâce à un modèle qui ne prend en compte qu'une seule longueur d'onde d'absorption et une seule longueur d'onde d'émission du luminophore alors que cela ne correspond pas à la réalité physique. D'autre part, dans le modèle, l'effet joule des pistes d'or, situées entre la jonction et le luminophore, a été négligé car, premièrement, l'or est un très bon conducteur électrique ($45 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$), et puis la longueur et la section des pistes sont très faibles. Il est possible que l'effet joule devienne non négligeable pour les plus forts courants.

Nous retrouvons la même influence de $T_{jw} - T_{PAD}$ sur le rendement total calculé avec $\phi_{opt.w-c}$ (Figure 101), comme dans la partie 2.2 Calcul du rendement p.99. Le rendement diminue avec l'augmentation de $T_{jw} - T_{PAD}$ et la température T_{PAD} a un peu d'influence sur ce comportement.

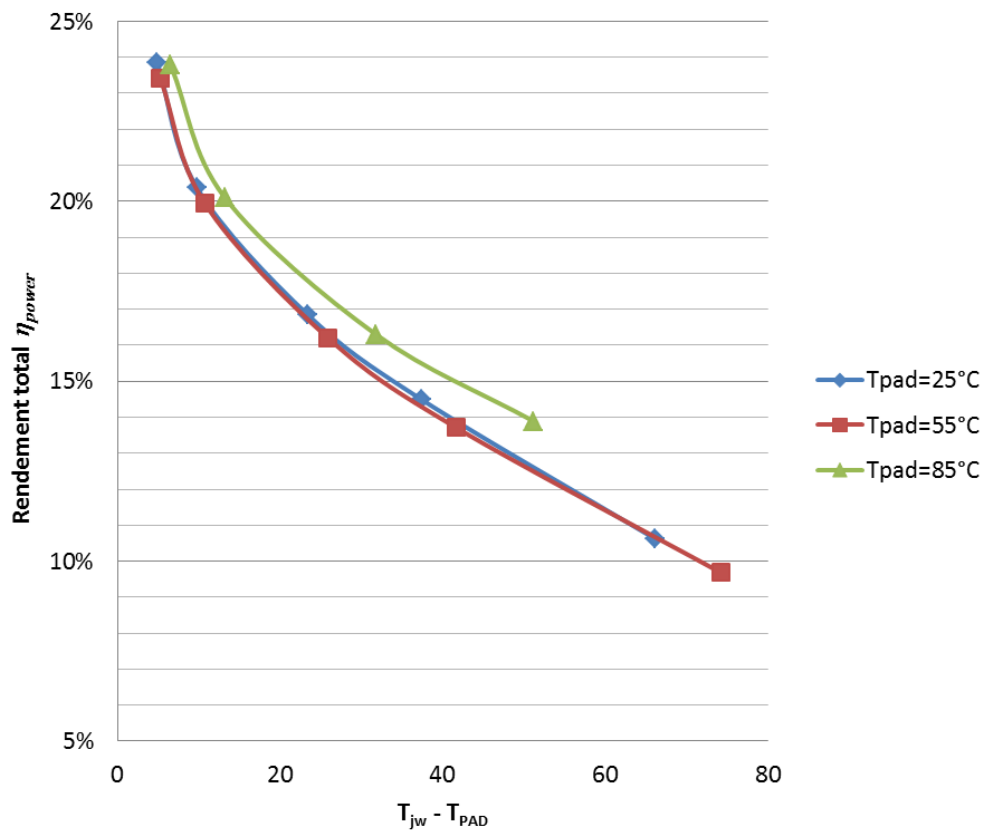


Figure 101 - Influence de $T_{jw} - T_{PAD}$ sur le rendement

4 Cartographie d'une puce émettant de la lumière blanche

4.1 Cartographie de la température de jonction T_{jw}

Nous souhaitons appliquer le modèle optique-thermique à une cartographie de température de surface. En appliquant ce modèle sans le modifier, plusieurs erreurs sont commises:

- Pour le modèle optique, on ne prend pas en compte la dispersion et l'absorption de la lumière dans toutes les directions.
- Pour le modèle thermique, la conduction dans le plan (x, y) est négligée.

Le résultat obtenu, grâce à ce modèle, avec comme données d'entrées $T_{PAD} = 25\text{ °C}$ et $P_{elec} = 3,84\text{ W}$, est une cartographie de la température de jonction (Figure 102(b)). La température de jonction est uniforme. La valeur correspond bien au résultat trouvé précédemment. L'hétérogénéité de la température de surface ne se retrouve pas sur la température de jonction : cela est dû au peu d'influence de la température de surface sur le calcul de la température de jonction (3.3.2.1 Calcul de sensibilité p.109). Ce résultat peut s'expliquer par les hypothèses que nous avons prises, et par le fait que la puissance électrique est appliquée de manière uniforme, ce qui est contraire au modèle électrique réalisé précédemment.

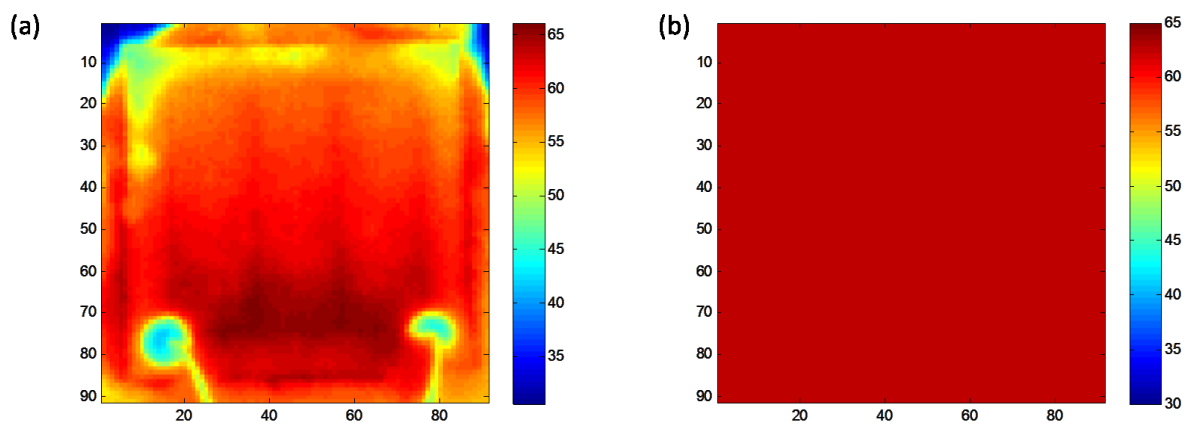


Figure 102 - Température d'une puce avec luminophore, $T_{PAD}=25\text{°C}$ et $P_{elec}=3,84\text{W}$:
Température de surface (a), Température de jonction (b)

La Figure 103 montre l'hétérogénéité des pertes thermiques Φ_a dues à l'environnement (convection naturelle et rayonnement thermique) dans les mêmes conditions que la cartographie de la température de jonction.

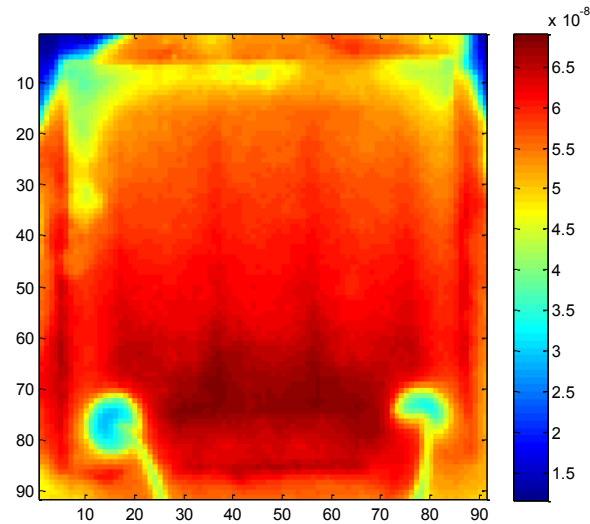


Figure 103 - Φ_a Flux [W] correspondant aux pertes thermiques dues à l'environnement

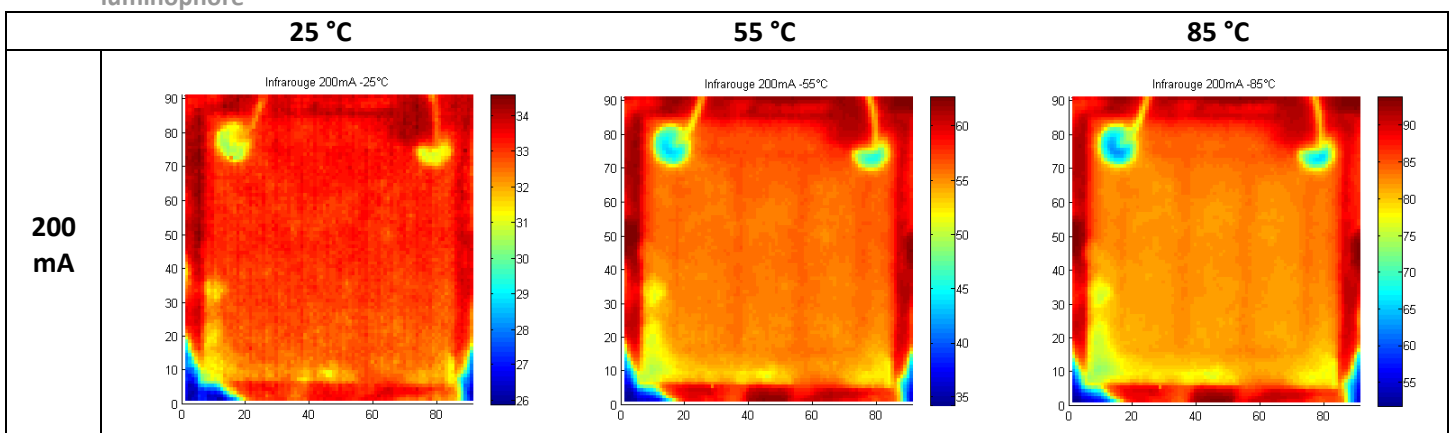
4.2 Lien entre la température et la luminance énergétique

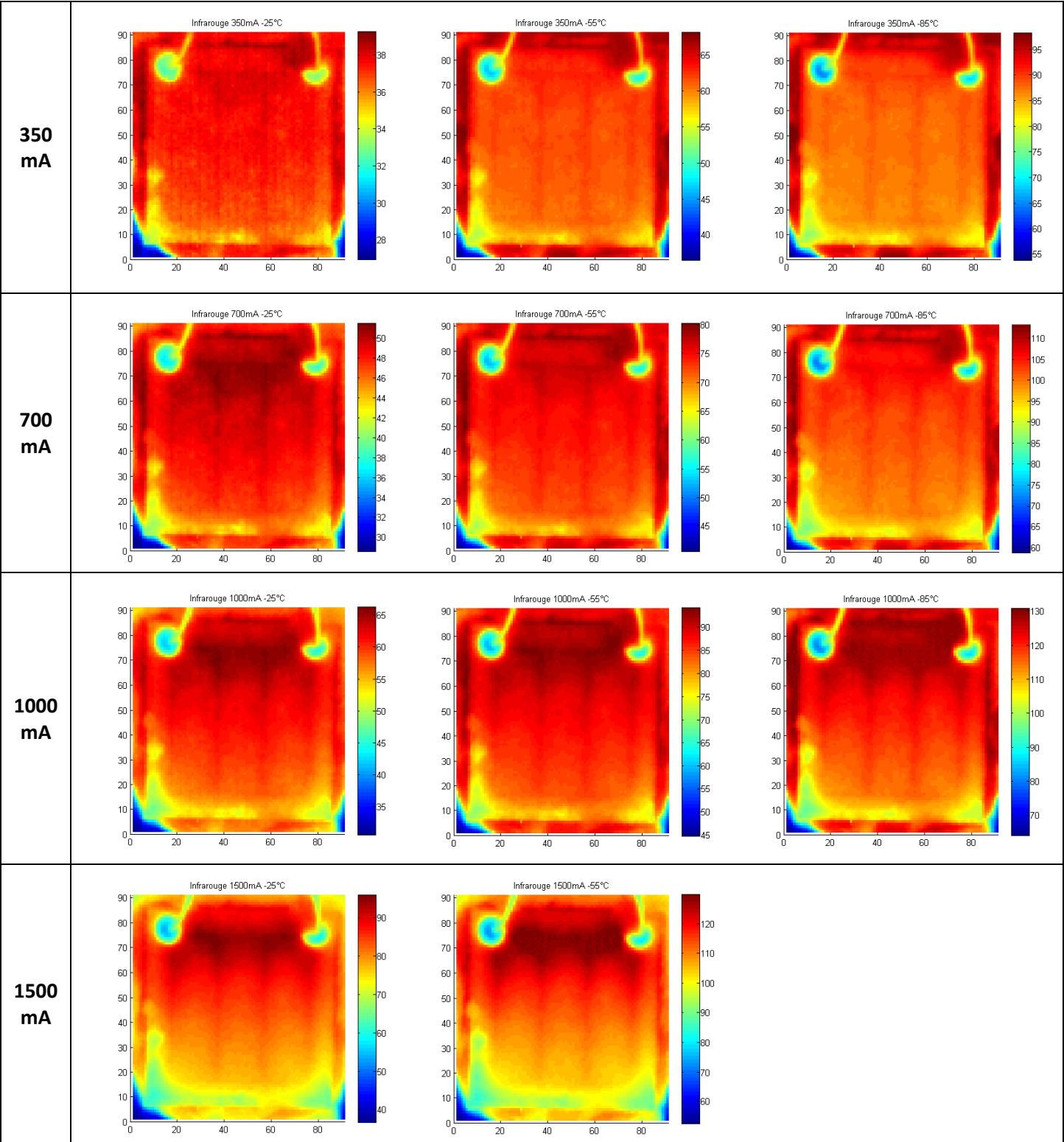
4.2.1 Regroupement avec les clichés de thermographie infrarouge et de luminance énergétique

Températures de surface et de jonction

Le Tableau 21 résume les clichés infrarouges pris dans les mêmes conditions de températures et d'alimentation de la LED que les cartographies spectrales. La différence de température de surface entre la zone proche des fils d'or et la zone éloignée est moins marquée. Elle semble moins sensible aux augmentations du courant d'alimentation et à la température du PAD, par rapport au flux lumineux.

Tableau 21- Résumé des thermographies infrarouges de la température de surface de la puce avec luminophore

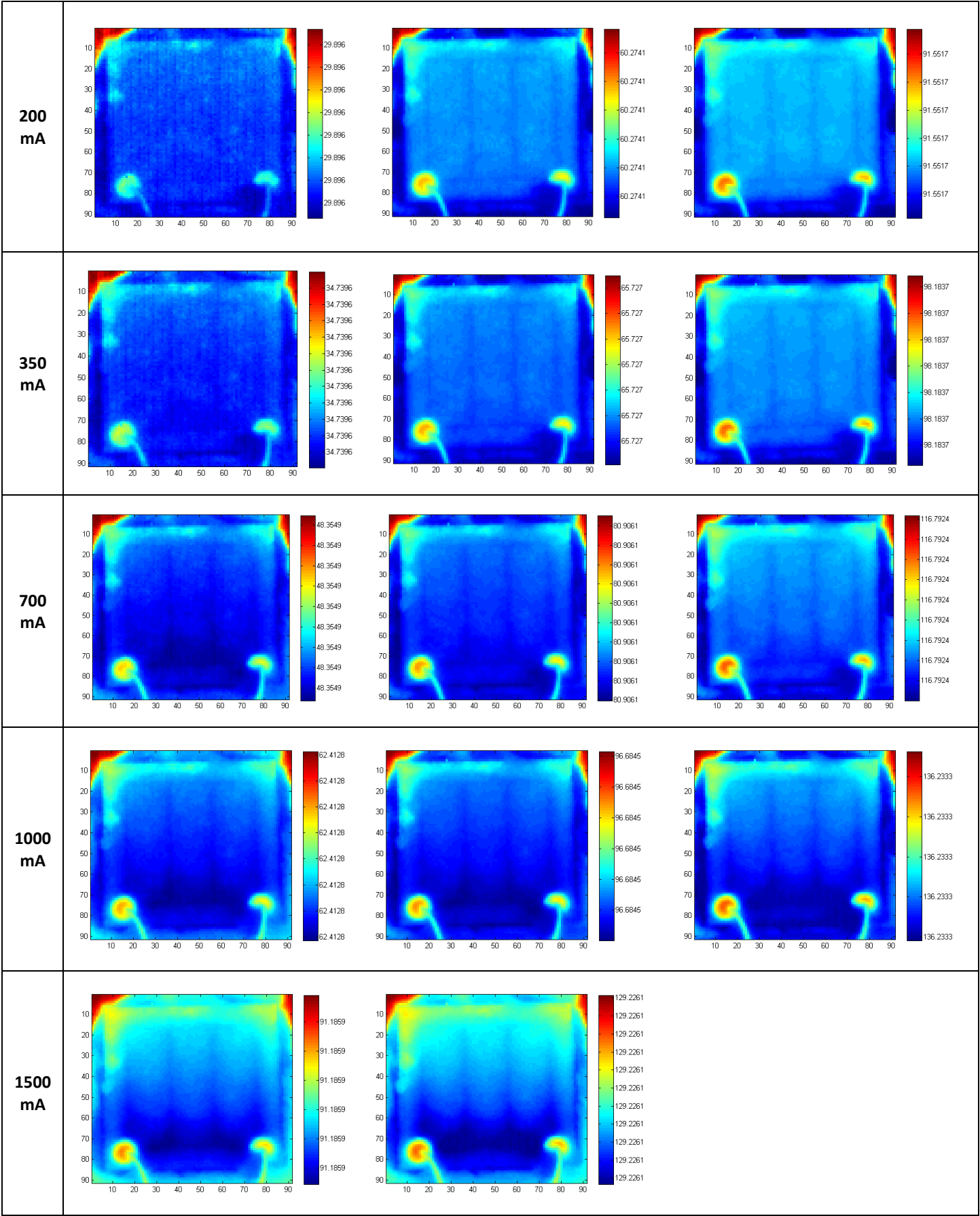




Le Tableau 22 résume les cartographies de température de jonction calculées à partir des mesures de thermographies infrarouges faites d’une puce avec luminophore ci-dessus. Ces cartographies sont uniformes car la température de jonction dépend très peu à la température de surface.

Tableau 22- Résumé des températures de jonction de la puce avec luminophore – Température uniforme

25 °C	55 °C	85 °C
-------	-------	-------



Calcul de sensibilité de la luminance énergétique à la température de surface

Nous souhaitons connaître l'influence de la température de surface T_w sur la luminance énergétique. Deux cartographies de luminance énergétique pour deux températures de surface proche ont été choisies, soient les cas où $T_{PAD} = 55\text{ °C}$ et $I = 200\text{ mA}$ ou 350 mA (Figure 106). Dans le premier cas, la température de surface est, en moyenne, égale à $55,5\text{ °C}$, et dans le second cas elle est égale à $61,3\text{ °C}$. Nous avons une différence de $5,8\text{ °C}$.

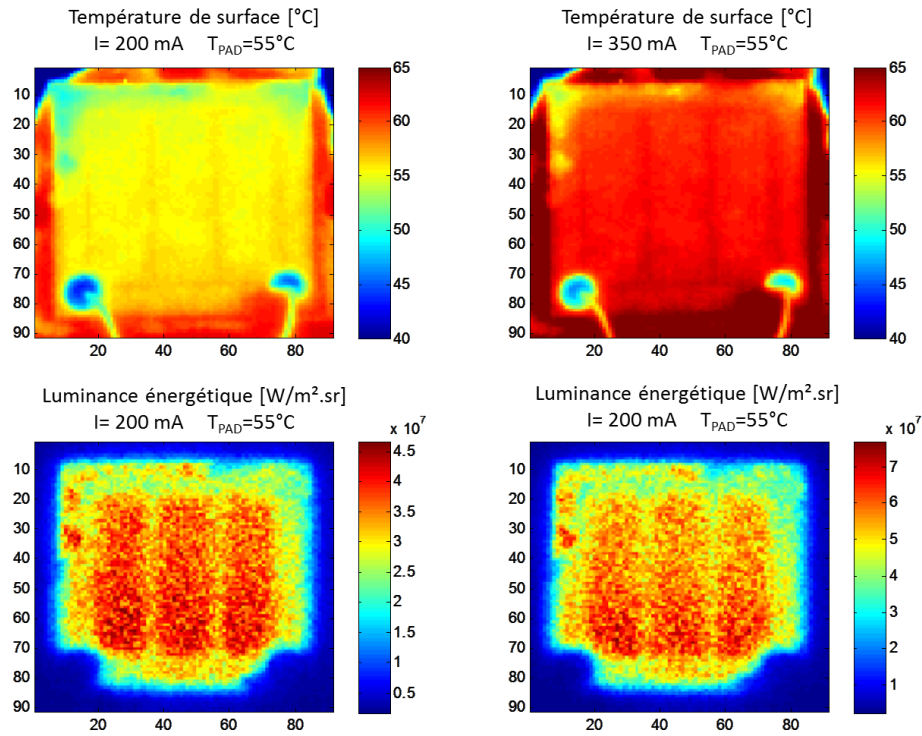


Figure 104 - Cartographies de température de surface et de luminance énergétique

La dérivée par différence finie de la luminance énergétique sur la température dL/dT est calculée pour chaque pixel (Figure 105). La moyenne obtenue de dL/dT est de $3,84.10^6$ au niveau de la partie centrale de la puce. La sensibilité de la luminance énergétique à la température de surface est très importante.

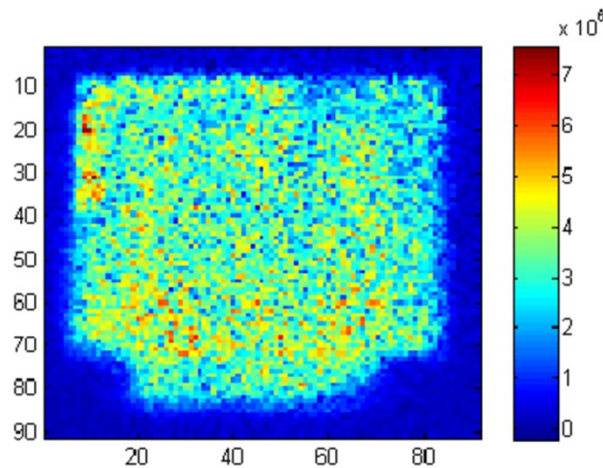
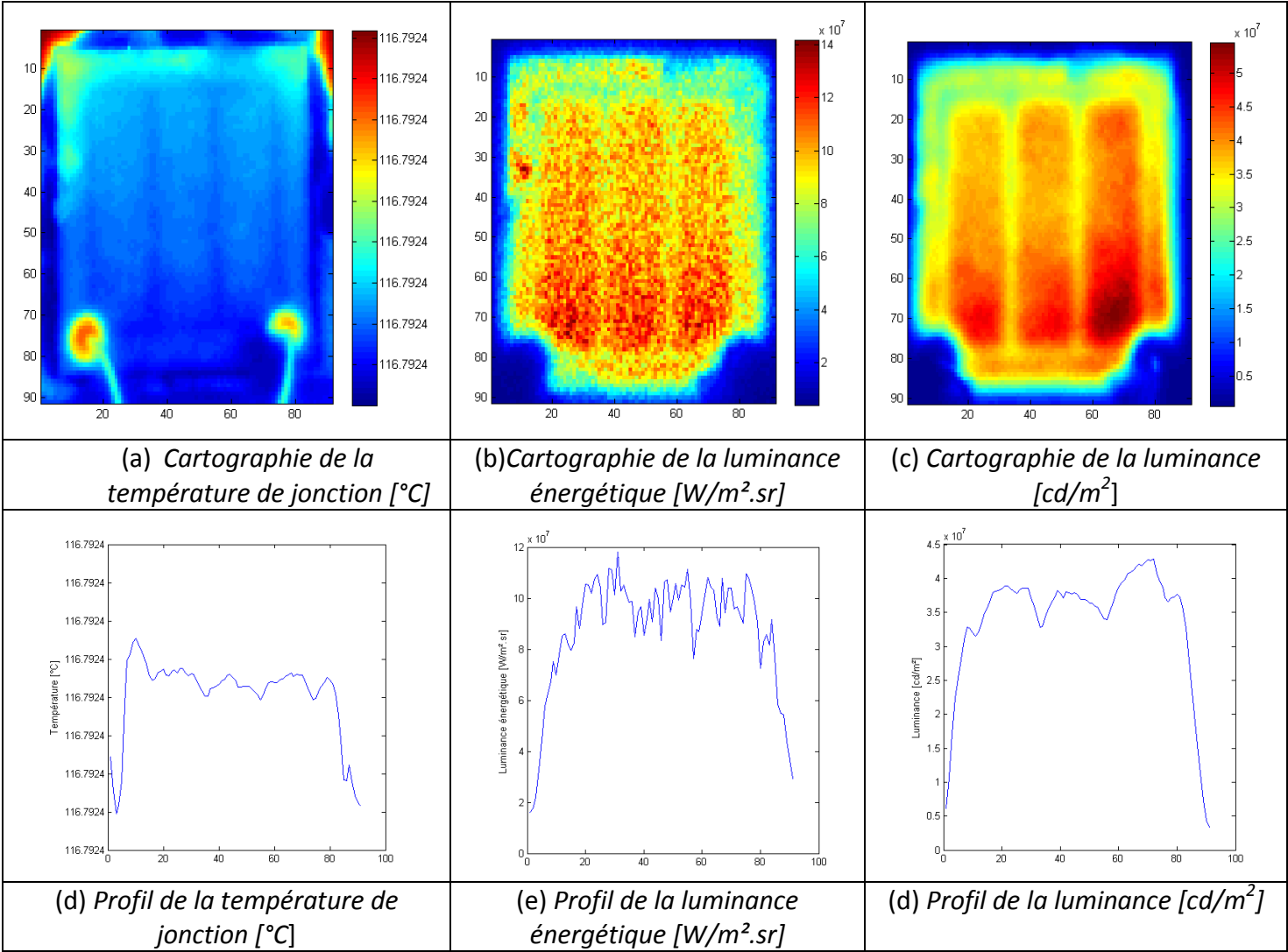


Figure 105 - Sensibilité de la luminance énergétique à la température de surface

Etude d'une LED alimentée à 700 mA et avec T_{PAD} à 85°C

L'étude porte sur une LED alimentée à 700 mA et avec la température T_{PAD} à 85°C. Pour ce cas, différentes cartographies sont comparées : température de jonction (°C), luminance énergétique ($W/m^2.sr$) et luminance (cd/m^2). Nous considérons une ligne qui passe au milieu de la puce (ligne 40). Le Tableau 23 montre les profils associés à chacune de ces cartographies. Les profils et les cartographies, associés aux modèles électriques, permettent de trouver des corrélations. Le courant électrique passe de façon préférentielle entre les deux plots d'or. Cela conduit à une luminance énergétique plus importante près des deux plots d'or.

Tableau 23 - Comparaison des cartographies et des profils de températures, de luminance énergétique et de luminance



4.2.2 Luminance énergétique en fonction de la température de surface

Comme la température de jonction est homogène, nous préférons chercher des corrélations entre la luminance énergétique et la température de surface.

Etude d'une puce entière

Nous exprimons la luminance énergétique en fonction de la température de surface T_w pour chaque pixel des deux cartographies d'une même puce avec luminophore. La puce est alimentée à 700 mA et avec $T_{PAD} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les cartographies ci-dessous représentent la température de surface et la luminance énergétique de la partie centrale de la puce.

L'étude a porté premièrement sur l'ensemble des pixels de la Figure 106, et ensuite sur les pixels de la zone B et de la zone C (carrés noirs).

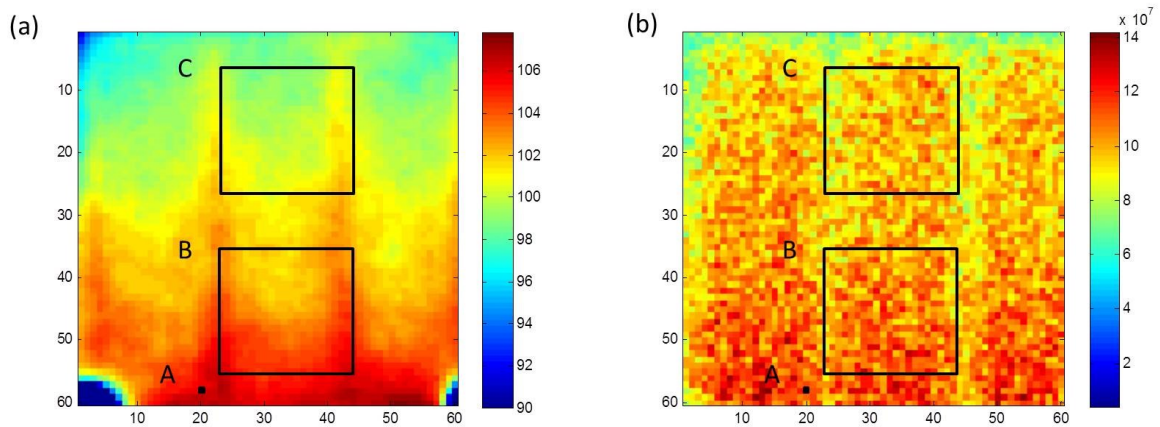
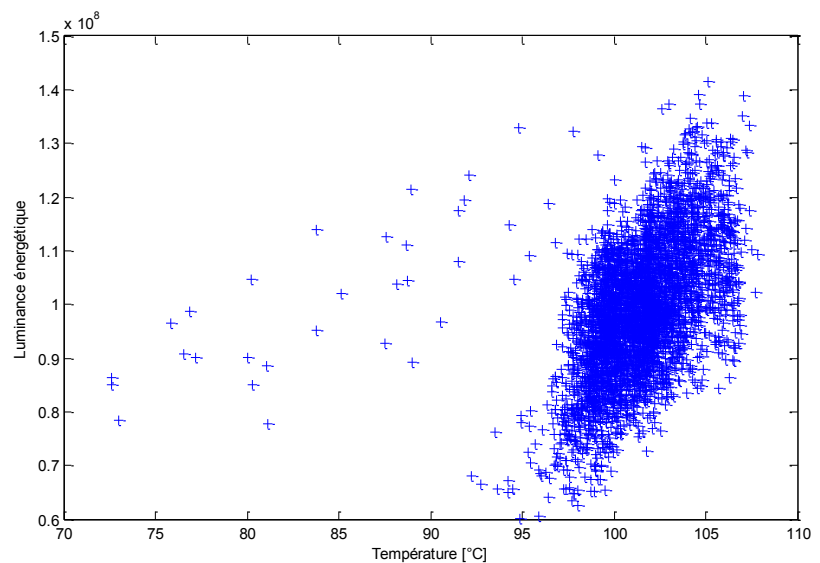


Figure 106 - Cartographie de la température de surface [$^{\circ}\text{C}$] (a) et cartographie de luminance énergétique [$\text{W}/\text{m}^2.\text{sr}$] (b)

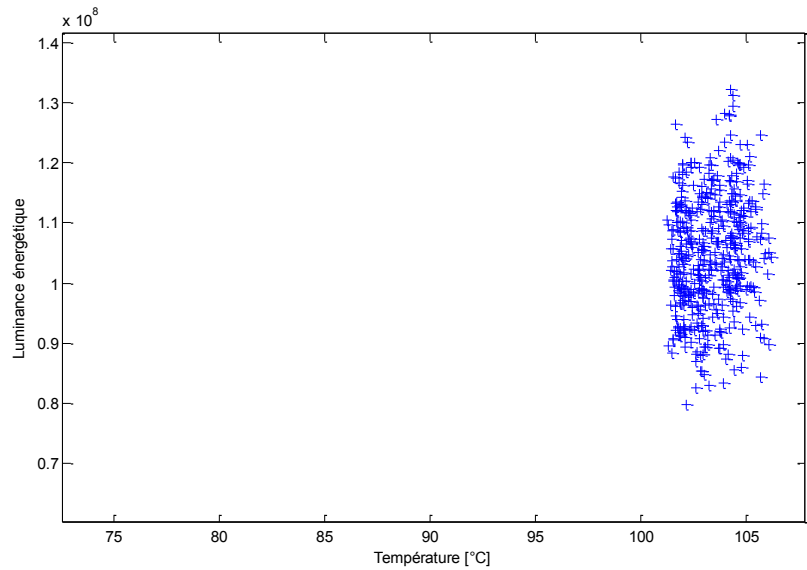
La Figure 107 illustre la luminance énergétique en fonction de la température de surface pour la partie centrale de la puce, la zone B et la zone C, illustrées à la Figure 106.

Les graphiques pour les différentes zones B et C permettent de décomposer le graphique obtenu pour la partie centrale de la puce. La zone B a une température supérieure à la zone C et la luminance énergétique moyenne de la zone B est légèrement supérieure à celle de la zone C.

(a) Puce



(b) Zone B



(c) Zone C

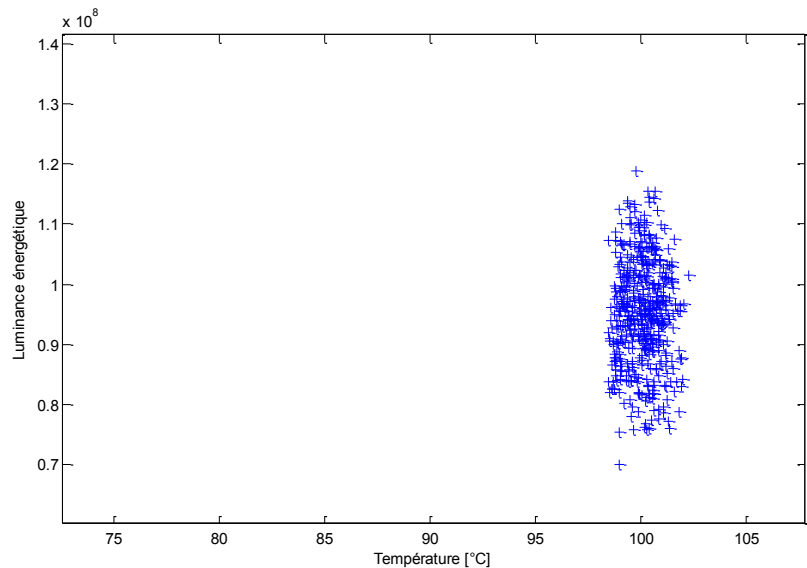


Figure 107 - Luminance énergétique en fonction de la température de surface pour la partie centrale de la puce (a), pour la zone B (b) et la zone C (c)

Dans la Figure 108, les courbes de la luminance énergétique en fonction de la température de surface sont tracées pour les différents courants d'alimentation, pour l'ensemble de la partie centrale de la puce. La gamme de la luminance énergétique augmente avec l'augmentation du courant. Les traits en pointillés représentent une vue de l'évolution de la luminance énergétique moyenne en fonction de la température pour chaque T_{PAD} .

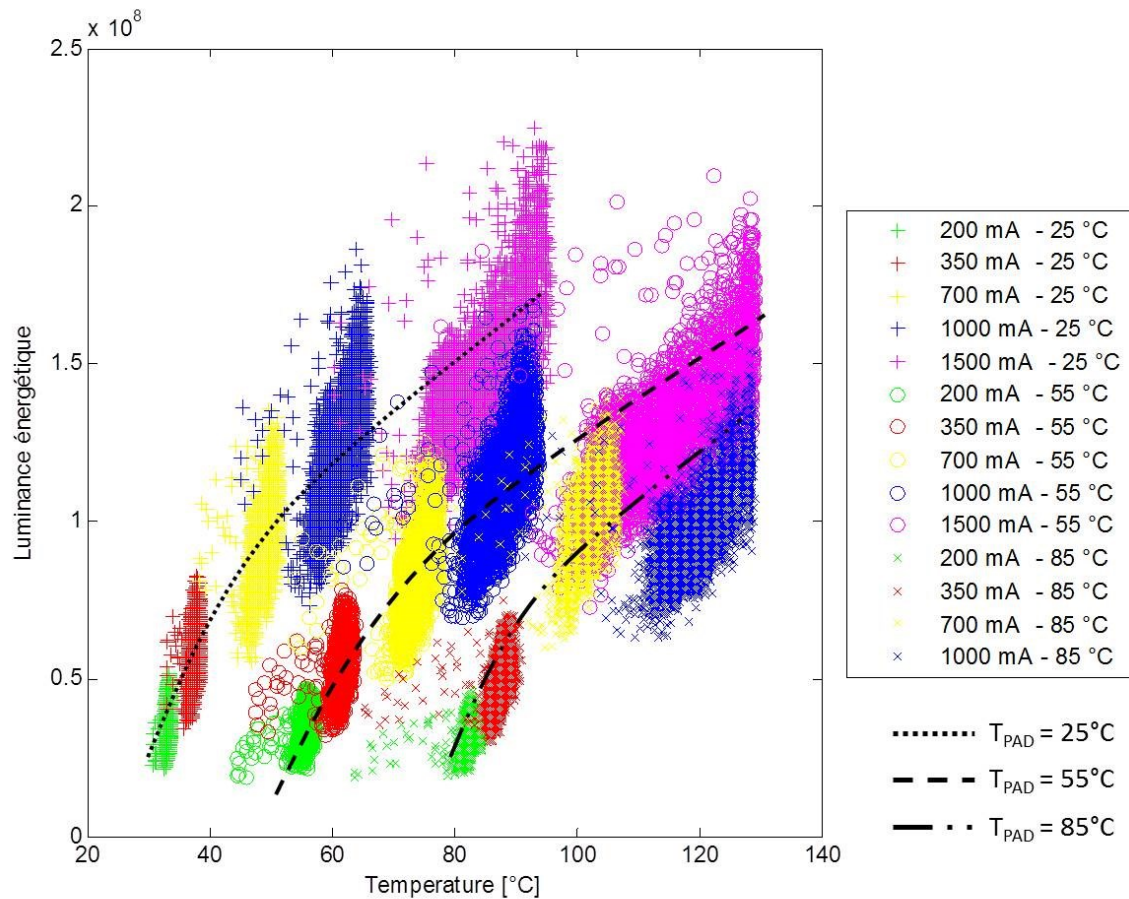
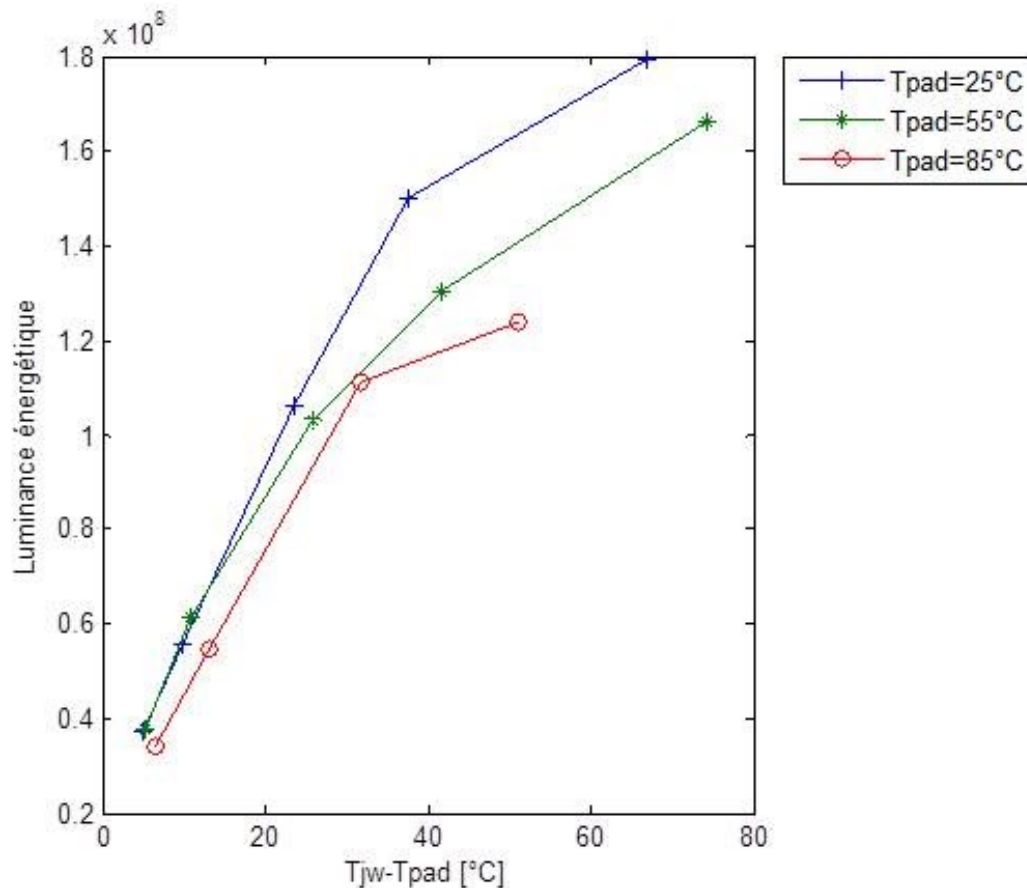


Figure 108 - Luminance énergétique en fonction de la température de surface à différents courants de la partie centrale d'une puce

Le lien entre la luminance énergétique et la température de surface semble dépendre plus de la température du PAD que du courant d'alimentation.

Etude d'un pixel dans les différents cas de T_{PAD} et de P_{elec}

Nous nous intéressons maintenant au cas du point A, représentée à la Figure 106, quand la puce est alimentée entre 200 mA et 1,5 A et avec les températures T_{PAD} (25 $^{\circ}\text{C}$, 55 $^{\circ}\text{C}$ et 85 $^{\circ}\text{C}$). La Figure 109 compare, pour différents T_{PAD} , l'influence de ΔT ($T_{\text{jw}} - T_{\text{PAD}}$) sur la luminance énergétique. Quand le courant d'alimentation augmente, la différence de température ΔT augmente ainsi que la luminance énergétique.

Figure 109 – Luminance énergétique en fonction de ΔT pour le point A

Ces courbes illustrent que la luminance énergétique est sensible à la différence $T_{jw} - T_{PAD}$, et non pas seulement à la température de jonction.

5 Conclusion du modèle thermo-optique

Le modèle électrique nous sert à confirmer que le courant électrique passe préférentiellement entre les deux plots d'or. L'hétérogénéité du courant à la surface de la puce augmente quand le courant devient plus important.

L'analogie électrique des phénomènes de transferts thermiques au niveau de la puce nous permet de créer un premier modèle thermo-optique de puces nues.

Pour le modèle des puces avec luminophore, une source de chaleur est rajoutée : elle correspond à la chaleur créée au niveau du luminophore due à la photo-conversion et aux pertes dues à la réflexion. Cette chaleur est calculée grâce à un modèle modifié de Kubelka-Munk, indépendant de la température. Cette source de chaleur n'est pas négligeable.

Notre modèle semble correcte : la conservation de l'énergie est vérifiée. La chaleur créée au niveau de la jonction et du luminophore part par conduction vers le PAD. Dans cette configuration très peu de chaleur part vers l'environnement (convection et rayonnement). La température de jonction est bien supérieure à la température de surface.

La différence entre la température de jonction et la température du PAD est de nouveau identifiée comme ayant une influence sur le rendement de la puce, et non la température de jonction seule.

La cartographie de la température de jonction n'est pas concluante car elle est homogène. L'hétérogénéité de la température de surface n'est pas retrouvée, cela est dû au peu d'influence de la température de surface sur notre modèle thermo-optique.

En comparant les cartographies de luminance énergétique et de température de surface, plus en prenant en compte le modèle électrique, nous pouvons conclure que le courant circule de manière préférentielle entre les deux plots d'or. Cela conduit à une conversion de l'électricité vers la lumière plus importante dans cette zone, d'où aussi un dégagement de chaleur plus conséquent. Ainsi l'hétérogénéité de la température de surface reflète ce dégagement de chaleur.

Afin de trouver des zones corrélées entre la température de jonction et la luminance énergétique, la fusion d'images a été utilisée dans l'Annexe A.

Bilan et Perspectives

Ce chapitre clôture la présentation de ces travaux en dressant un bilan de l'ensemble des recherches menées ainsi que la liste des perspectives. La première voies envisagée est l'amélioration du modèle thermo-optique avec la prise en compte des effets thermiques sur les performances du luminophore.

1 Synthèse

En introduction de ce manuscrit, nous nous étions posés la question suivante : quelle est l'influence de la température de jonction sur les performances optiques d'une LED au niveau local ?

Dans le chapitre 1, nous avons identifié les problématiques thermiques des diodes électroluminescentes de puissance, émettant de la lumière blanche. Ensuite dans le chapitre 2, après avoir choisi notre objet d'étude, nous avons cherché à caractériser les matériaux constituant notre LED, surtout la puce et la couche de luminophore. Dans les chapitres 3 et 4, afin de trouver l'influence locale de la thermique sur les performances optiques de la LED, nous avons développé des bancs spécifiques pour la mesure de la température de surface et de la luminance énergétique. Ces bancs ont plusieurs intérêts : premièrement nos mesures peuvent se faire sous différentes conditions électriques et thermiques, ensuite les bancs sont modulables pour d'autres objets d'études. D'autre part les mesures optiques et les calculs de rendement ont été nécessaires pour les mesures des températures de jonction et le calcul de résistances thermiques entre la jonction et le PAD. Nous avons ensuite développé, dans le chapitre 5, le modèle thermo-optique de puces avec luminophore. Ce modèle décrit la répartition de la chaleur au sein des puces et la génération de la lumière blanche. Les performances optiques sont influencées, non pas par la température de jonction seule, mais par la différence entre la température de jonction et la température du PAD.

2 Perspectives

2.1 Visualisation de phénomènes thermiques rapides

Lors de l'allumage de la LED, le régime permanent se met en place rapidement de l'ordre de la nanoseconde. Les phénomènes thermiques sont rapides et important. Cependant la visualisation des températures de surface est difficile car les caméras infrarouges fonctionnent autour de 100 Hz. L'hétérodynage pourrait être une méthode envisagée pour visualiser les phénomènes rapide de répartition de chaleur en surface de la puce. Cette méthode consiste à suivre des phénomènes périodiques. La fréquence d'allumage de la LED et la fréquence d'acquisition de la caméra sont synchronisées, mais en léger déphasage linéaire l'un par rapport à l'autre [73].

2.2 Microscopie thermique²⁰ de puces

L'étude thermique de puces de diodes électroluminescentes a été menée jusqu'à présent à l'aide d'une caméra infrarouge, d'une résolution spatiale de 15 μm . Les dimensions des puces du marché sont aux alentours du millimètre. La microscopie thermique permet d'avoir une précision qu'une caméra infrarouge ne permet pas d'obtenir. En plus de la microscopie thermique, des mesures de topologie doivent être effectuées afin d'obtenir des indications sur la rugosité des puces.

²⁰ « Microscopie thermique » est traduit en anglais par « Scanning Thermal Microscopy » (SThM).

2.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe du fonctionnement est basé sur un microscope à force atomique (AFM) et une pointe-sonde thermique. La mesure avec un AFM est basée sur la détection des forces interatomiques s'exerçant entre une pointe associée à un microlevier (appelé aussi cantilever) de constante de raideur fixée, et la surface d'un échantillon. Les mouvements verticaux du microlevier provoqués par l'interaction pointe-échantillon sont détectés optiquement. Le dispositif de détection est constitué d'une diode laser, d'un miroir, et d'un photodétecteur à quatre quadrants. Le faisceau laser est focalisé sur le dessus du microlevier. Ce dernier le réfléchit vers le miroir qui à son tour le réfléchit vers le photodétecteur. Les variations d'intensité reçue par le photodétecteur traduisent les déplacements en Z du microlevier qui peuvent être mesurées, après étalonnage de la réponse du système de détection, en fonction de la déflexion du microlevier. L'élément clé de toute microscopie thermique est la sonde microthermique. Elle est constituée d'un bras de levier ayant en son extrémité une sonde constituée d'un élément thermorésistif.

Comme tout capteur thermorésistif, la sonde thermique peut être utilisée dans deux modes de fonctionnement : mode passif et mode actif. Les balayages de la surface d'un échantillon peuvent ainsi être réalisés dans le mode "contraste de température" et dans le mode "température constante" (également appelé mode de "contraste de conductivité thermique"), permettant alors d'obtenir soit la cartographie de la température, soit l'image du contraste de conductivité thermique de la surface d'un échantillon.

Dans un environnement ambiant, lorsque l'échantillon est chauffé, l'eau formée entre la pointe et l'échantillon est éliminée, donc le contact de la pointe est amélioré ; c'est pourquoi il y a un grand intérêt à travailler sous vide.

2.2.2 Inconvénients dus aux LEDS

Le premier problème est que la pointe est sensible aux courants électriques. Il n'est pas possible de faire des mesures de puces émettant de la lumière bleue en charge, car des courants électriques existent en surface de la puce. Cela est moins le cas avec une puce recouverte de luminophore.

Ensuite, quel que soit le type de LED, lorsqu'elle est alimentée, la lumière émise sature les photodiodes. Il ne semble pas possible de faire des cartographies de LED en charge, que soit de la température ou du contraste de la conductivité thermique.

Enfin, la rugosité de l'échantillon a aussi une grande influence sur le contact entre la pointe et l'échantillon. Il semblerait que la rugosité en surface pour les deux types de LEDs soit assez importante par rapport à la taille de la pointe.

2.3 Amélioration du modèle thermo-optique

2.3.1 Puissance électrique hétérogène au niveau de la jonction

Un des améliorations du modèle thermo-optique est de prendre en compte l'hétérogénéité de la puissance électrique au niveau de la jonction, dans les données d'entrée. En effet dans le chapitre précédent, le modèle électrique a montré que la densité de courant semble plus importante près des pistes et des fils d'or. Cela conduit à une hétérogénéité de la puissance électrique.

2.3.2 Calcul du flux de lumière blanche et de la chaleur générée au niveau du luminophore

Une autre partie de l'amélioration du modèle thermo-optique d'une puce avec luminophore vient du calcul du flux de lumière blanche et de la chaleur générée au niveau du luminophore.

Le premier point serait de considérer plusieurs longueurs d'onde d'excitation et plusieurs longueurs d'onde d'émission dans le modèle de Kubelka-Munk, et non pas qu'une seule longueur d'onde d'excitation et une longueur d'onde d'émission. Dans le cadre de notre LED, cela correspondrait à utiliser tout le spectre bleu comme longueur d'onde d'excitation et la gamme spectrale, du vert au rouge, réémise par le luminophore comme longueur d'émission. Cette modification permettrait de mieux prévoir le flux lumineux à la sortie de la puce et d'avoir un calcul plus juste de la chaleur générée.

Le deuxième point est discuté dans la partie suivante. Il s'agit de prendre en compte l'effet de la température sur l'efficacité et l'émission du luminophore.

3 Amélioration du modèle thermo-optique : effets thermiques sur le luminophore

Dans la littérature, il a été observé que l'émission et son efficacité du luminophore YAG : Ce diminue aux hautes températures. La dépendance de la luminescence à la température est complexe car cela dépend de la concentration de cérium et de la longueur d'onde d'excitation. [74]

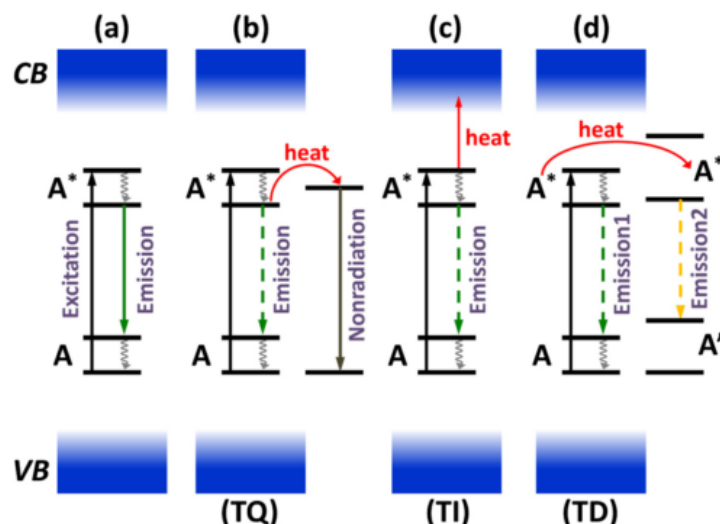


Figure 110 - Mécanismes de luminescence par rapport aux effets thermiques, décrits par Chun Che Lin et Ru-Shi Liu : (a) Normal, (b) extinction thermique, (c) ionisation thermique, (d) dégradation thermique [75]

3.1 Thermal quenching (TQ) ou extinction thermique

La chaleur est généralement préjudiciable, et diminue l'efficacité du luminophore à cause de la relaxation non radiative quand la température de la LED augmente. Ce phénomène s'appelle le « thermal quenching » (extinction thermique). Le pic d'émission va se déplacer

de longueur d'ondes. Les électrons excités vont se relaxer vers l'état de base par un processus radiatif ou non-radiatif.

L'intensité lumineuse diminue avec l'augmentation de la température dans un environnement normal à cause de l'extinction thermique.

A basse température, il y a très peu de changement dans la luminosité avec la température, mais à des températures élevées, le rendement de luminescence diminue rapidement. Les vibrations thermiques deviennent suffisamment intenses pour augmenter le système au point où l'état de l'énergie de vibration excité croise celui de l'état initial, à partir de laquelle le système peut tomber à l'état fondamental en émettant une petite quantité de chaleur, ou rayonnement infrarouge. Il ne donne pas de luminescence. Ceci est connu comme une extinction thermique. [76]

Une des conséquences, dans le milieu des LEDs, est d'utiliser que des luminophores avec une extinction faible aux températures de fonctionnement d'une LED. Les LEDs bleues avec le luminophore de type YAG : Ce ont une extinction thermique assez faible par rapport aux LEDs avec des luminophores à base de sulfites (comme CaS :Eu ou SrS :Eu). [76] La température d'extinction intrinsèque au Ce^{3+} est proche de 680 K. Il est apparu des températures d'extinction plus faible pour des luminophores YAG :Ce commerciaux : la concentration de dopant Ce^{3+} est plus élevée. [74]

3.2 Ionisation thermique (TI)

L'ionisation thermique (ou thermal ionization TI) excite les électrons à la bande de conduction par la chaleur. Tout d'abord, l'auto-ionisation se produit spontanément et la non-émission 5d-4f est observée lorsque le plus bas état 5d est au-dessus du bas de la bande de conduction. Ensuite, les états 5d des activateurs sont inférieurs à la bande de conduction de l'hôte dans la plupart des situations d'émission 5d-4f. Les électrons 5d sont ionisés de la bande de conduction à cause de l'ionisation thermique, qui dépend de l'énergie entre l'état 5d de l'activateur et le bas de la bande de conduction.

3.3 Dégradation thermique (TD)

La dégradation thermique peut conduire à d'autres émissions en raison de la chaleur. La dégradation thermique est irréversible (déformation plastique de l'intensité lumineuse) alors que l'extinction thermique est un processus réversible qui réfère à la déformation élastique de l'intensité lumineuse.

3.4 Expansion thermique – dilatation des particules

Si on considère le luminophore YAG:Ce, la dilatation des particules à cause de la chaleur conduit un décalage vers le rouge, en excitation et en émission du luminophore. Ce décalage n'est pas toujours des longueurs d'onde supérieures, cela dépend du luminophore.

Bibliographie

- [1] E. F. SCHUBERT, *Light-Emitting Diodes Second Edition*, New York: Cambridge University Press, 2006.
- [2] Association française de l'éclairage, «Dossier de presse 2014,» AFE, Paris, 2014.
- [3] S. Liu et X. Luo, *LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing and Testing*, Singapore: John Wiley & Sons, 2011.
- [4] ADEME, «L'éclairage à diodes électroluminescentes,» *Les avis de l'ADEME*, 2014.
- [5] G. Zissis et X. De Logiviere, «Diodes électroluminescentes LED pour l' éclairage - Panorama et tendances technologiques,» *Technique de l'ingénieur*, vol. 33, 2011.
- [6] B. T., W. F., J. A., S. T., B. G., G. N. et H. J., «Lighting the way: Perspectives on the global lighting market,» McKinsey & Company, 2012.
- [7] ADEME, «Bien choisir son éclairage sans gaspillage,» 2013.
- [8] Direction de l'information légale et administrative, «Extinction définitive des ampoules à filament,» 31 12 2012. [En ligne]. Available: <http://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/actualites/00401.html?xtor=RSS-2>. [Accès le 17 12 2014].
- [9] LesEchos.fr, «La fin de l'halogène, nouveau casse-tête pour les fabricants d'ampoules,» 20 07 2014. [En ligne]. Available: http://www.lesechos.fr/20/07/2014/lesechos.fr/0203651947234_la-fin-de-l-halogene--nouveau-casse-tete-pour-les-fabricants-d-ampoules.htm. [Accès le 17 12 2014].
- [10] D. Steigerwald, J. Bhat, D. Collins, R. Fletcher, M. Holcomb, M. Ludowise, P. Martin et S. Rudaz, «Illumination with solid state lighting technology,» *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, n° 12, pp. 310-320, 2002.
- [11] A. Faujas, «« Les terres rares sont le pétrole du XXIe siècle »,» 16 06 2014. [En ligne]. Available: http://www.lemonde.fr/economie/article/2014/06/16/c-est-le-moment-d-investir-dans-les-terres-rares_4438932_3234.html. [Accès le 17 12 2014].
- [12] ALEDIA, «Avec Aledia, la révolution LED est en marche,» 27 03 2013. [En ligne]. Available: <http://www.aledia.com/en/news/avec-aledia-la-revolution-led-est-en-marche-2/>. [Accès le 17 12 2014].
- [13] ANSES, «Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes,» 09 10 2014. [En ligne]. Available: <https://www.anses.fr/fr/content/led-diodes-%C3%A9lectroluminescentes>. [Accès le 26 11 2014].
- [14] A. DUSSAIGNE, *Diodes électroluminescentes blanches monolithiques*, UNIVERSITE de Nice-Sophia Antipolis, 2005.
- [15] R. Baillot, *METHODOLOGIE D'ANALYSE DE DEFAILLANCE POUR L'EVALUATION DE LA FIABILITE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES GaN*, Université de Bordeaux , 2011.
- [16] L. MASSOL, *Les LEDs pour l'éclairage*, Paris: Dunod, 2012.
- [17] Z. L. S. W. K. & L. X. Liu, « Measurement and numerical studies of optical properties of YAG:Ce phosphor for white light-emitting diode packaging,» *Applied Optics*, vol. 49,

- n° 12, p. 247–57, 2010.
- [18] L. Chen, C.-I. Chu et R.-S. Liu, «Improvement of emission efficiency and color rendering of high-power LED by controlling size of phosphor particles and utilization of different phosphors,» *Microelectronics Reliability*, vol. 52, n° 15, pp. 900-904, 2012.
 - [19] P. Nicolas, «CARACTERISATION DU RENDU DES COULEURS DES NOUVELLES SOURCES : Les diodes électroluminescentes,» Conservatoire national des arts et métiers, 2009.
 - [20] D. CURIE et J. MATTLER, «LUMINESCENCE,» [En ligne]. Available: <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/luminescence>. [Accès le 30 10 2014].
 - [21] R.-J. Xie, H. Naoto et T. Takeda, «Highly Reliable White LEDs Using Nitride Phosphors Rong-Jun,» *Journal of the Korean Ceramic Society*, vol. 49, n° 14, pp. 375-379, 2012.
 - [22] M. V. Bachmann, «Studies on Luminescence and Quenching Mechanisms in Phosphors for Light Emitting Diodes,» Universiteit Utrecht, 2007.
 - [23] R.-J. Xie et N. Hirosaki, «Silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs,» *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 8, n° 17-8, pp. 588-600, 2007.
 - [24] H. Zheng, J. Ma et X. Luo, «Conformal Phosphor Distribution for White Lighting Emitting Diode Packaging by conventional dispensing coating method with structure control,» *TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, vol. 3, n° 13, pp. 417-421, 2013.
 - [25] H. Luo, J. K. Kim, E. F. Schubert, J. Cho, C. Sone et Y. Park, «Analysis of high-power packages for phosphor-based white-light-emitting diodes,» *Applied Physics Letters*, vol. 86, pp. 243505-3, 2005.
 - [26] Y. Tsung-Hsun, C. Cheng-Chien, C. Ching-Yi, C. Yu-Yu et S. Ching-Cherng, «Essential Factor for Determining Optical Output of Phosphor-Converted LEDs,» *Photonics Journal*, vol. 6, n° 12, pp. 1-9, 2014.
 - [27] T. N. T., Y. J. P. et S. F. G., « Effect of Phosphor Particle Size on Luminous Efficacy of Phosphor-Converted White LED,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 27, n° 12, p. 5145–5150, 2009.
 - [28] D. Han, J. Shim et D. Shin, «Relationship between thermal and luminance distributions in high-power lateral GaN/InGaN light-emitting diodes,» *Electronics Letters*, vol. 46, n° 16, p. 437, 2010.
 - [29] C.-P. Wang, T.-T. Chen, H.-K. Fu, T.-L. Chang, P.-T. Chou et M.-T. Chu, «Analysis of thermal characteristics and mechanism of degradation of flip-chip high power LEDs,» *Microelectronics Reliability*, vol. 52, n° 14, pp. 698-703, 2012.
 - [30] P. Mashkov, T. Pencheva et B. Gyoch, «LEDs' Thermal Management Aided by Infrared Thermography,» *International symposium on advanced packaging materials: microtech*, pp. 68-73, 2010.
 - [31] W. J. Hwang, T. H. Lee, L. Kim et M. W. Shin, «Determination of junction temperature and thermal resistance in the GaN-based LEDs using direct temperature measurement,» *physica status solidi (c)*, vol. 1, n° 110, p. 2429–2432, 2004.
 - [32] Baur, Sabathil et Linder, «Design of light emitting diodes (LED),» chez *OMSOL Users Conference*, Genoble, 2007.
 - [33] Chatterjee, Senawiratne, Li, Detchprohm, Shu, Xia, Zhao, Plawsky et Wetzel, «Junction Temperature Simulation of Gallium Nitride Green Light Emitting Diodes Using COMSOL,» chez *COMSOL conference*, Boston, 2007.

- [34] B. Yan, N. T. Tran, J.-P. You et F. G. Shi, «Can Junction Temperature Alone Characterize Thermal Performance of White LED Emitters ?», *PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 23, n° 19, pp. 555-557, 2011.
- [35] Y. C. Hsu, C. C. Tsai, M. H. Chen, Y. T. Lo, C. W. Lee et W. H. Cheng, «Decay Mechanisms of Lumen and Chromaticity for High-Power Phosphor-Based White-Light-Emitting Diodes in Thermal Aging», *Electronic Components and Technology Conference*, pp. 779-782, 2008.
- [36] CREE, «Cree® EZ1000™ Gen II LEDs Data Sheet», CREE, Inc, Durham, 2011.
- [37] M. PERRIN, «MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE ET MICROANALYSE», C.M.E.B.A, [En ligne]. Available: http://www.cmeba.univ-rennes1.fr/Principe_MEB.html. [Accès le 02 12 2014].
- [38] C.Reyraud, «Le microscope électronique à balayage (MEB)», 05 2008. [En ligne]. Available: <http://www.cea.fr/technologies/les-microscopes/le-microscope-electronique-a-balayage-meb>. [Accès le 03 12 2014].
- [39] CREE, «Power Chip Evolution», 2014.
- [40] M. Lahaye, «Microsonde à spectrométrie X», PLACAMAT : PLateforme Aquitaine de Caractérisation des MATériaux, [En ligne]. Available: <http://www.placamat.cnrs.fr/spip.php?article76>. [Accès le 8 Janvier 2014].
- [41] S. Gustafsson, «Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials», *Review of Scientific Instruments*, vol. 62, pp. 797-804, 1991.
- [42] M. Gustavsson, E. Karawacki et S. Gustafsson, «Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat of thin samples from transient measurements with hot-disk sensors», *Review of Scientific Instruments*, vol. 65, pp. 3856-3859, 1994.
- [43] THERMO CONCEPT, «Catalogue des Produits et Services», 2012.
- [44] B. LADEVIE, *MISE AU POINT DE DISPOSITIFS DE CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DE MATERIAUX ISOLANTS SOLIDES OU PATEUX.*, Bordeaux: Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 1998.
- [45] U. F. Finn Krogstad, «CODING THE METROPOLIS-HASTINGS ALGORITHM», 1999.
- [46] J. Iveland, L. Martinelli, J. Peretti, J. S. Speck et C. Weisbuch, «Direct measurement of Auger electrons emitted from a semiconductor light emitting diode under electrical injection : identification of the dominant mechanism for efficiency droop», *Physical Review Letters*, vol. 110, n° 117, p. 177406, 25 avril 2013.
- [47] CNRS, «Pourquoi les DELs perdent leur efficacité lumineuse lorsque l'intensité du courant augmente», Presse CNRS, 25 Avril 2013. [En ligne]. Available: <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/3067.htm>. [Accès le 16 Mars 2015].
- [48] Y. Gu, N. Narendran et J. P. Freyssinier, «White LED performance», chez *Fourth International Conference on Solid State Lighting*, Bellingham, WA, 2004.
- [49] N. Narendran et Y. Gu, «Life of LED-based white light sources Nadarajah», *Journal of Display Technology*, vol. 1, n° 11, pp. 167-171, 2005.
- [50] C. Boué et D. Fournier, «Cost-effective infrared thermography protocol for 40µm spatial resolution quantitative microelectronic imaging», *Infrared Physics & Technology*, vol. 48, n° 12, pp. 122-129, 2006.
- [51] T. Walach, «Emissivity measurements on electronic microcircuits», *Measurement*, vol.

- 41, n° 15, pp. 503-515, 2008.
- [52] M. H. Kook, S. Y. Ryu, S. C. Yang et G. H. Kim, «Quantitative infrared micro-thermography of light emitting diodes,» *11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*, 2012.
- [53] L. Jayasinghe, Y. Gu et N. Narendran, «Characterization of Thermal Resistance Coefficient of High-power LEDs,» *Sixth International Conference on Solid State Lighting*, 2006.
- [54] ELECTRONIC INDUSTRIES ASSOCIATION, «Integrated Circuits Thermal Measurement Method - Electrical Test Method (Single Semiconductor Device),» Arlington, 1995.
- [55] VEKTRIX, «In-Situ LED Junction Temperature and Thermal Resistance Measurement,» 2008.
- [56] Y.-J. Lee, C.-J. Lee et C.-H. Chen, «Estimating the Junction Temperature of InGaN and AlGaInP Light-Emitting Diodes,» *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 50, pp. 04DG18 1-5, 2011.
- [57] E. Hong et N. Narendran, «A method for projecting useful life of LED lighting systems,» chez *Third International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE*, 2004.
- [58] N. Narendran, Y. Gu et R. Hosseinzadeh, «Estimating junction temperature of high-flux white LEDs,» chez *Light-emitting diodes: Research, manufacturing, and applications VIII, Proceedings of SPIE 5*, Bellingham, 2004.
- [59] J. SENAWIRATNE, Y. LI, M. ZHU, Y. XIA, W. ZHAO, T.DETCHPROHM, A.CHATTERJEE, J.L.PLAWSKY et C.WETZEL, «Junction Temperature Measurements and Thermal Modeling of GaInN/GaN Quantum Well Light-Emitting Diodes,» *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, vol. 37, n° 15, pp. 607-610, 2008.
- [60] Y. Xi et E. F. Schubert, «Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method,» *Applied Physics Letters*, vol. 85, n° 112, pp. 2163-2165, 2004.
- [61] Y.-w. Liu, T. R. Klein et N. Narendran, «A Measurement Method for Estimating the Average Junction Temperature of AC LEDs,» chez *The Second International Conference on White LEDs and Solid State Lighting*, Taipei, 2009.
- [62] L. Jayasinghe, T. Dong et N. Narendran, «Is the Thermal Resistance Coefficient of High-power LEDs Constant ?,» *Seventh International Conference on Solid State Lighting*, p. 6, 2007.
- [63] L. Xiaobing et H. Run, «Calculation of the phosphor heat generation in phosphor-converted light-emitting diodes,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 75, pp. 213-217, 2014.
- [64] Z. Liu, S. Liu, K. Wang et X. Luo, «Measurement and numerical studies of optical properties of YAG:Ce phosphor for white light-emitting diode packaging,» *Applied optics*, vol. 49, n° 12, pp. 247-57, 2010.
- [65] D.-Y. Kang, E. Wu et D.-M. Wang, «Modeling white light-emitting diodes with phosphor layers,» *Applied Physics Letters*, vol. 89, n° 123, p. 231102, 2006.
- [66] S. FUJITA, Y. Umayahara et S. TANABE, «Influence of light scattering on luminous efficacy in Ce:YAG glass-ceramic phosphor,» *Journal of the Ceramic Society of Japan*, vol. 118, n° 11374, pp. 128-131, 2010.
- [67] H. K. Park, J. H. Oh et Y. R. Do, «Toward scatter-free phosphors in white phosphor-

- converted light-emitting diodes,» *Optics express*, vol. 20, n° 19, pp. 10218-10228, 2012.
- [68] M. Huang et L. Yang, «Heat Generation by the Phosphor Layer of High-power white LED emitters,» *Photonics Technology Letters*, vol. 25, n° 14, pp. 1317-1320, 2013.
- [69] L. Chen, C.-I. Chu et R.-S. Liu, «Improvement of emission efficiency and color rendering of high-power LED by controlling size of phosphor particles and utilization of different phosphors,» *Microelectronics Reliability*, vol. 52, n° 15, pp. 900-904, 2012.
- [70] S. Ye, F. Xiao, Y. Pan, Y. Ma et Q. Zhang, «Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties,» *Materials Science and Engineering*, vol. 71, n° 11, pp. 1-34, 2010.
- [71] K. Narita, «Optical properties of powder layer,» chez *Phosphor handbook*, Second Edition éd., C. Press, Éd., New york, 2007, p. 1051.
- [72] C. SPITZ, L. MORA, A. JAY et E. WURTZ, «Analyse de sensibilité et d'incertitude du comportement thermique d'un logement,» *Congrès SFT*, 2011.
- [73] L. CLERJAUD, *METHODE D'HETERODYNAGE POUR LA CARACTERISATION DE PROPRIETES THERMOPHYSIQUES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE DANS UNE LARGE GAMME SPATIALE ET TEMPORELLE*, Bordeaux: UNIVERSITÉ DE BORDEAUX 1, 2010.
- [74] V. M. Bachmann, «Studies on Luminescence and Quenching Mechanisms in Phosphors for Light Emitting Diodes,» Datawyse B.V. , 2007.
- [75] C. C. Lin et R.-S. Liu, «Thermal effects in (oxy)nitride phosphors,» *Journal of Solid State Lighting*, vol. 1, n° 11, p. 16, 2014.
- [76] A. Lakshmanan, R. S. Kumar, V. Sivakumar, P. C. Thomas et M. T. Jose, «Synthesis , photoluminescence and thermal quenching of YAG : Ce phosphor for white light emitting diodes,» *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, vol. 49, n° 1May, pp. 303-307, 2011.
- [77] T. W. F. J. A. S. T. B. G. G. N. H. J. Baumgartner, «Lighting the way: Perspectives on the global lighting market,» McKinsey & Company, 2012.
- [78] G. Saint-Girons, «L'épitaxie - Tutoriel,» 17 03 2014. [En ligne]. Available: http://edeea.ec-lyon.fr/IMG/pdf/TutoEEA2014_EpitaxieCourt.pdf. [Accès le 19 02 2015].

Annexes

Annexe A - Fusion d'image entre la température de jonction et la luminance énergétique

Nous souhaitons mettre en valeur des zones à fortes corrélations entre la cartographie de la température de jonction et la cartographie de la luminance énergétique. L'utilisation de la fusion d'image grâce à la fonction *imfuse* du logiciel Matlab peut aider à y parvenir.

Pour la fusion d'image, nous utilisons les fonctions *imresize* et *imfuse* du logiciel MATLAB. Nous reprenons le cas de notre puce avec luminophore alimentée à 700 mA et avec $T_{PAD} = 85$ °C.

La fonction *imresize* permet de redimensionner une image en l'agrandissant ou en la réduisant. Cette fonction est utilisée dans le but de réduire les cartographies à la taille de la cartographie la plus petite, c'est-à-dire celle de la température de surface faite par thermographie infrarouge. La méthode utilisée, par défaut, est l'interpolation et l'anticrénelage (aussi appelé anti-aliasing²¹).

Le but de la fonction *imfuse* est de créer une image composite C à partir de deux images A et B. Dans notre cas, les images A et B ont la même taille. L'algorithme pour combiner des images peut être spécifié :

- La méthode *blend* permet un mélange des images sans mise à l'échelle supplémentaire.
- La méthode *diff* crée une différence entre l'image A et l'image B.
- La méthode *montage* met l'image A et l'image B côte à côte dans la même image.

L'option *independent* permet d'adapter les valeurs d'intensité de A et de B indépendamment alors que l'option *joint* considère les valeurs d'intensité des images conjointement.

Le résultat de la fonction *imfuse* est une image de type *uint8*. Les valeurs varient sur une échelle de 0 à 255.

L'image A est la cartographie de la température de jonction. L'image B est la cartographie de la luminance énergétique. Les deux images mises sur la même échelle sont représentées à la figure suivante.

²¹ L'anti-aliasing est une technique pour améliorer la netteté de l'image, en créant des dégradés de couleurs pour éviter l'effet escalier des contours.

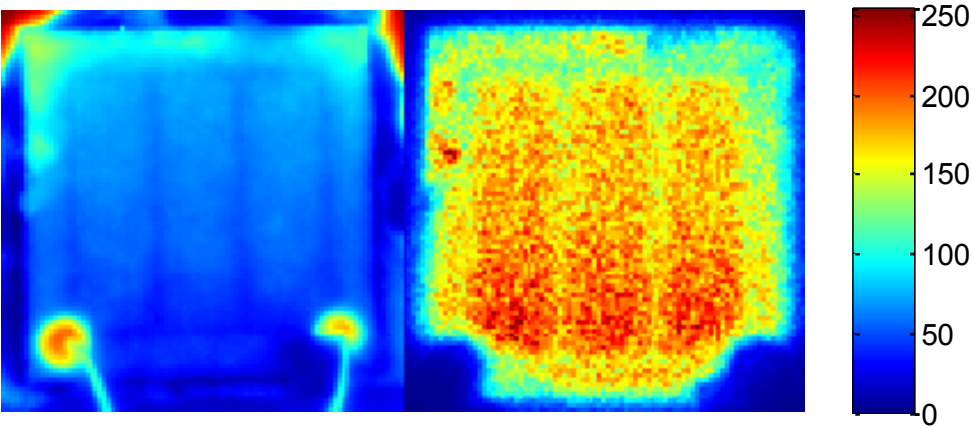
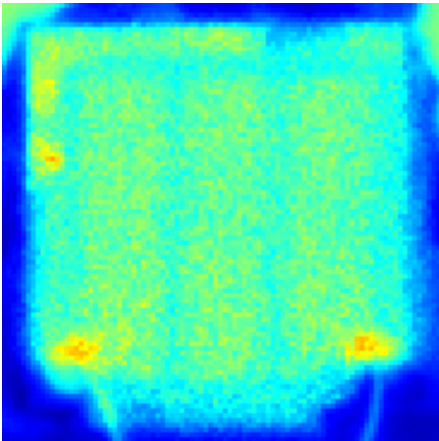
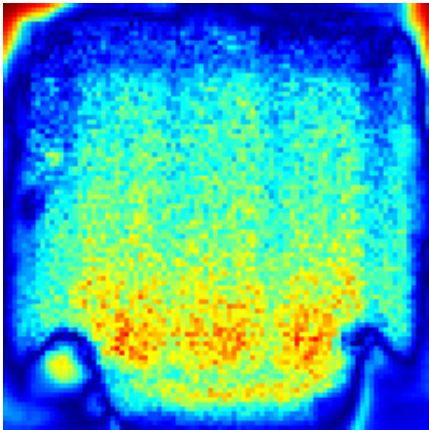
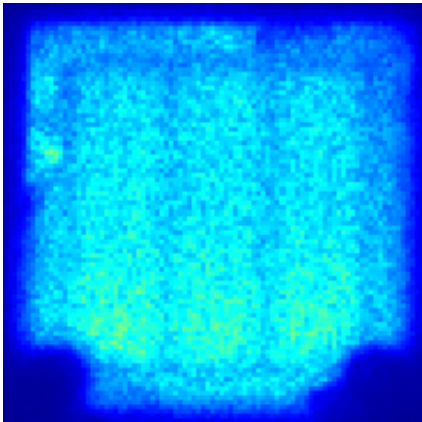
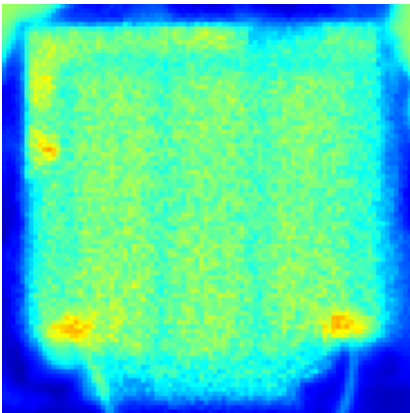
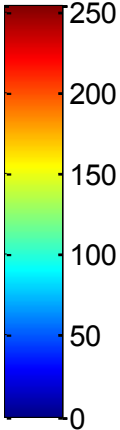


Figure 111 - Images résultant de la fonction *imfuse* avec la méthode *montage*

Le tableau suivant décrit les différentes méthodes utilisées et les résultats. L'échelle utilisée est la même pour les images suivantes.

Tableau 24 - Différentes méthodes de la fonction *imfuse*

<i>imfuse</i> (<i>A</i> , <i>B</i> , ' <i>blend</i> ') 	<i>imfuse</i> (<i>A</i> , <i>B</i> , ' <i>diff</i> ') 
<i>imfuse</i> (<i>A</i> , <i>B</i> , ' <i>blend</i> ', ' <i>Scaling</i> ', ' <i>joint</i> ') 	<i>imfuse</i> (<i>A</i> , <i>B</i> , ' <i>blend</i> ', ' <i>Scaling</i> ', ' <i>independent</i> ')  

Caractérisation thermique et lumineuse de diodes électroluminescentes en charge par méthodes locales non intrusives : influence du luminophore

Résumé

Le marché des diodes électroluminescentes (LEDs) de puissance est en perpétuelle croissance depuis une vingtaine d'années. Le marché de l'éclairage évolue car les besoins ont changé : nous souhaitons, par exemple, aujourd'hui réduire la consommation électrique, ou avoir des éclairages plus flexibles (couleur, cycle d'allumage, encombrement, ...). Les LEDs de puissance permettent d'apporter des solutions où les autres éclairages font défauts. Une étude comparative est menée entre les LEDs et les autres sources d'éclairages.

Une LED de puissance émettant une lumière blanche est constituée d'une puce semi-conductrice, d'un substrat, d'un PAD et d'une optique primaire. Différentes méthodes permettent d'obtenir de la lumière blanche avec des LEDs : plusieurs puces, une puce avec un ou des luminophores, ou la méthode PRS-LED. Le luminophore a un rôle optique important et un rôle thermique non négligeable. Après avoir été excité par la lumière émise de la puce, il réémet de la lumière dans une longueur d'onde supérieure. L'efficacité de ce processus dépend de nombreux paramètres, comme la mise en œuvre du luminophore ou le type de luminophore utilisé.

L'étude et la caractérisation des propriétés optiques et thermiques sont faites pour des LEDs commerciales, composées d'une même puce émettant de la lumière bleue, avec et sans luminophore jaune. Afin de maîtriser le maximum de facteurs, nous avons mené une étude et un dimensionnement du circuit imprimé (PCB) sur lequel va être implanté nos LEDs.

Dans le but d'évaluer les matériaux constituant les LEDs, des analyses au microscope à balayage électronique et par microsonde ont été menées. Ces travaux ont permis de révéler, notamment, la position de la jonction p-n dans la puce et la composition de la couche de luminophore par deux types différents. De plus, afin d'améliorer notre compréhension, une étude comparative a été menée sur trois luminophores jaunes.

Ensuite, les deux types de LEDs, puce nue et puce avec luminophore, ont été testés dans le but d'obtenir le flux lumineux et le rendement des LEDs. La caractérisation optique nous a amené à créer un banc pour obtenir la luminance énergétique spectrale sur une partie minime de la puce.

D'autre part, nous nous intéressons à la température de jonction de la puce nue, que nous mesurons par différentes méthodes, dont la thermographie infrarouge. Pour cela, l'émissivité a été estimée pour la puce nue et la puce avec luminophore. Puis nous comparons aussi ces différentes méthodes pour le calcul de la résistance thermique $R_{th\ j-PAD}$ entre la jonction et le PAD.

Le maillage de fils conducteurs implanté sur la surface de la puce est modélisé électriquement. Cette étude, qui est composée de niveaux progressifs de modélisation, permet de comprendre la répartition du courant électrique qui traverse la jonction, et ainsi d'appréhender la répartition du flux lumineux et de la température au niveau de la surface de la puce.

Après, un modèle thermo-optique décrit les phénomènes présents au niveau de la jonction d'une puce nue : la conversion de la puissance électrique en lumière bleue et en chaleur, et les transferts de chaleur. Nous complétons ce premier modèle pour obtenir un modèle d'une puce avec le luminophore. Ce dernier modèle prend en compte la photo-conversion du luminophore avec le calcul de flux lumineux à la sortie du luminophore et le calcul de la chaleur due à la photo-conversion. La résolution de ce modèle nous permet d'obtenir la température de jonction d'une puce avec luminophore. La conservation d'énergie du modèle est aussi vérifiée.

Le modèle thermo-optique est appliqué à une cartographie de température de surface afin d'obtenir une cartographie de la température de jonction. Ces cartographies sont regroupées avec les clichés de thermographie infrarouge et de luminance énergétique.

Mots clés : Diode électroluminescente, Luminophore, Mesure de luminance énergétique spectrale, Température de jonction, Modèle thermique, Thermographie infrarouge