

# Vers un modèle thermo-optique des LEDs utilisées dans les systèmes d'éclairage automobile.

## Towards opto-thermal model of LEDs involved in automotive lighting systems.

Clément RONGIER<sup>1</sup>, Rémi GILBLAS<sup>1</sup>, Fabrice SCHMIDT<sup>1</sup>, Yannick LE-MAOULT<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IMT Mines Albi Carmaux, Institut Clément Ader  
Campus Jarlard – 81013 Albi Cedex 09.

\*(auteur correspondant : [clement.rongier@mines-albi.fr](mailto:clement.rongier@mines-albi.fr))

**Résumé** – L'éclairage automobile évolue vers des faisceaux de haute définition, pouvant présenter jusqu'à plusieurs centaines de sources de lumière par millimètre carré. Pour atteindre de telles performances, les systèmes conventionnels sont remplacés par des matrices LED (*Light Emitting Diode*) haute puissance issues des dernières technologies optoélectroniques. L'énergie optique émise est telle que, pour éviter la dégradation du système d'éclairage, il est nécessaire de contrôler et/ou dissiper le surplus de chaleur. De plus, une fois le composant intégré au sein de son système optique, la concentration de lumière génère un auto-échauffement de ce dernier. Pour cette raison, des modèles précis et robustes de simulation doivent être développés. Dans cette étude, le modèle thermo-optique d'une LED haute luminance est développé et validé à l'aide de mesures réalisées par thermographie infrarouge. Ainsi, les résultats de simulation sont en accord avec l'expérience et le modèle d'émission nous donne une précision acceptable, dont l'erreur est inférieure à 10%.

**Mots-clés** : LED haute luminance ; Simulations thermo-optiques ; Thermographie infrarouge ; Caractérisation optique ; Eclairage automobile.

**Abstract** – Automotive lighting is evolving towards high definition beams, with up to several hundred light sources per square millimetre. To achieve such performance, conventional systems are being replaced by high-power LED arrays based on the latest optoelectronic technologies. The optical energy emitted is such that, to avoid degradation of the lighting system, it is necessary to control and/or dissipate excess heat. In addition, once the component is integrated into its optical system, the concentration of light generates self-heating of the optical system. For this reason, accurate and robust simulation models must be developed. In this study, the thermo-optical model of a high luminance LED is developed and validated using infrared thermography measurements. The simulation results are in agreement with experiments. The emission model gives us an acceptable accuracy with an error of less than 10%.

**Keywords** : High luminance LED; Opto-thermal simulations; Infrared thermography; Optical characterization; Automotive front lighting.

## 1. Introduction

Depuis le milieu des années 2000, les systèmes d'éclairage automobile utilisent des diodes électroluminescentes (LED). Pour répondre aux évolutions sécuritaires et aux nouvelles exigences du marché, des systèmes d'éclairage à haute définition font intervenir de nouvelles fonctionnalités : anti-éblouissement et de marquage lumineux au sol [1]. Pour cette raison et pour permettre d'assurer des faisceaux à haute résolution, des systèmes d'éclairage sont développés sur la base de technologies de LED haute luminance [2]. L'énergie lumineuse émise par ces nouvelles sources induit de fortes densités de puissance qui doivent être thermiquement contrôlées.

En outre, les performances optiques ainsi que la fiabilité du composant sont directement liées à la température [3]. Aussi, une fois la LED intégrée au sein de son système optique, l'énergie lumineuse émise par le composant induit une concentration énergétique à l'intérieur de ce système qui subit alors un auto-échauffement. Il est alors crucial de prédire comment cette énergie lumineuse émise par la LED interagit avec son environnement. Dans ce contexte, des modèles de simulation précis et robustes doivent être développés afin de prédire l'interaction lumière-matière et son couplage avec les autres modes de transferts (conduction, convection et rayonnement).

Dauphin *et al.* [4] ont proposé une méthode de simulation thermique dans laquelle le rayonnement est calculé de manière découplée et est appliqué en condition aux limites dans le calcul CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Mackie *et al.* [5] ont également repris cette approche dans laquelle les transferts radiatifs sont calculés par la méthode des radiosités et appliqués en condition aux limites dans l'outil de calcul. Plus récemment, Barreto *et al.* [6] ont proposé une démarche visant à résoudre les différents modes de transferts dans un milieu poreux de manière couplée. Pour cela, l'écoulement et les transferts se produisant dans le poreux ont été modélisés suivant les équations de conservation et résolution à l'aide du logiciel CFD OpenFoam. Un algorithme de lancers de rayons par Monte Carlo a été développé et couplé au logiciel CFD.

Dans cette étude, nous avons fait le choix de résoudre les différents modes de transfert de manière couplée, en prenant également en compte l'interaction rayonnement-matière. Cette résolution est réalisée au travers du logiciel commercial FloEFD™. La démarche adoptée débute par une validation du logiciel de calcul à l'aide d'une solution analytique de référence. Ensuite, une caractérisation optique complète du composant a été réalisée en vue de déterminer les paramètres physiques permettant de tenir compte de l'émission de lumière. Ces paramètres nous permettront, *in fine*, de développer le modèle d'émission de la LED, directement intégré au dans l'outil de calcul CFD. Enfin, les résultats seront confrontés à des mesures réalisées par thermographie infrarouge.

## 2. Validation du logiciel de calcul

Dans cette première partie de l'étude, la démarche adoptée consiste à étudier le couplage des différents modes de transferts (conduction, convection et rayonnement) et de l'interaction rayonnement-matière. Le logiciel commercial FloEFD™ a été utilisé pour résoudre les phénomènes de conduction et de convection. La résolution des transferts radiatifs est réalisée par une méthode de lancer de rayons par Monte Carlo directement implantée dans le logiciel. Une solution analytique élaborée par Leuenberger et Person [7] a été utilisée pour valider le code de simulation, mais ne sera pas présentée ici. Elle est illustrée par la figure 1.

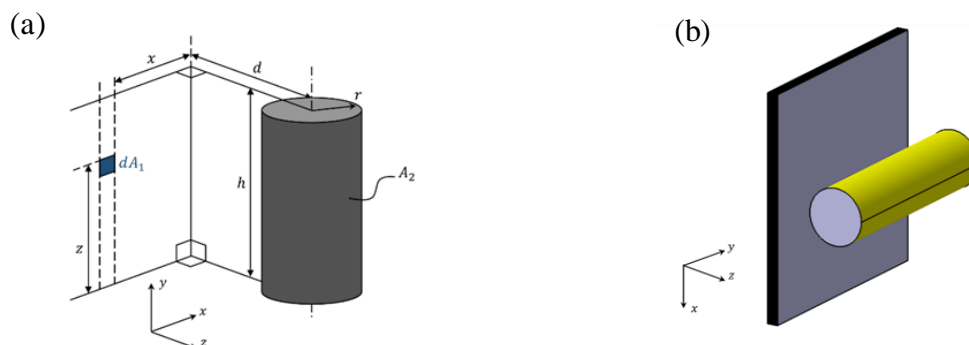


Figure 1 : Configuration du cas analytique (a) et géométrie 3D utilisée pour la simulation (b).

Cette solution consiste à calculer le facteur de forme entre une source de rayonnement cylindrique et un élément de surface d'une plaque (figure 1-a). En faisant varier la position de l'élément de surface, on obtient le champ d'éclairement total reçu sur la plaque. Une géométrie identique a été reproduite dans le logiciel de calcul (figure 1-b). Les paramètres de la configuration sont regroupés dans le tableau 1. Enfin, un nombre de rayons de 500 millions a été considéré pour la méthode de lancers de rayons.

Hauteur du cylindre	Rayon du cylindre	Dimension de la plaque	Distance source plaque	Puissance émise	Emissivité plaque
18mm	2.5mm	18x18mm <sup>2</sup>	5mm	10W	1

Tableau 1 : Configuration de la solution analytique.

Les champs d'éclairement reçus par la plaque font l'objet de la première comparaison de la solution analytique avec la simulation, comme illustré par la figure 2. La figure 3 propose la visualisation des profils d'éclairement centraux selon x (horizontaux) et y (verticaux).

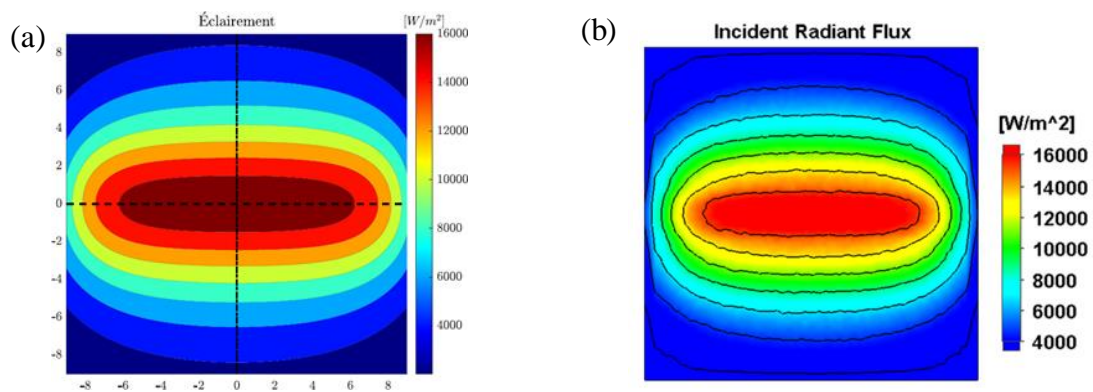


Figure 2 : Comparaison des champs d'éclairement : solution analytique (a) et simulation (b).

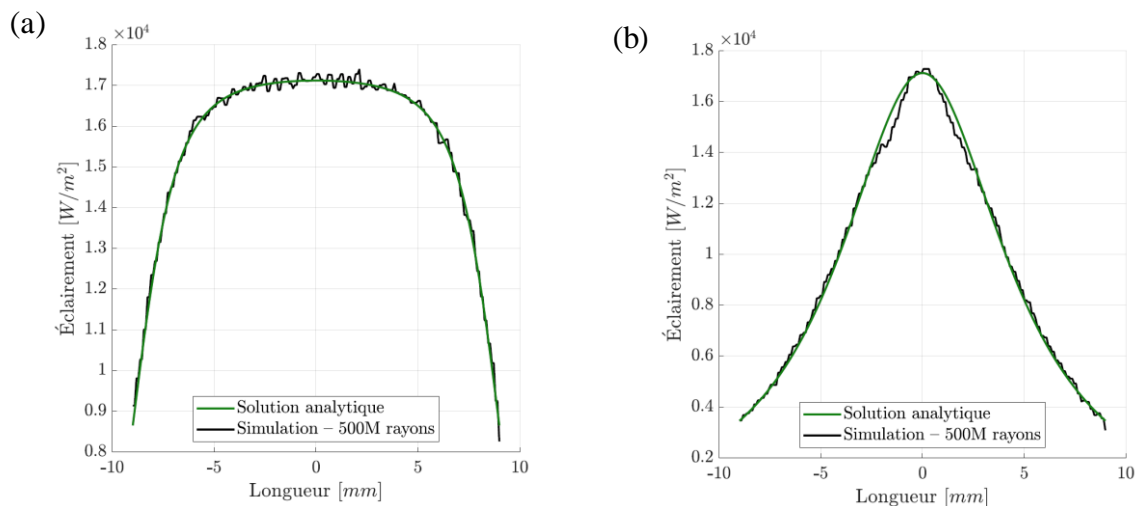


Figure 3 : Comparaison des profils d'éclairement : horizontaux (a) et verticaux (b).

La solution analytique met en évidence la présence d'un gradient d'éclairement du centre de la plaque vers son bord, également reproduit par la simulation. De plus, les iso-contours présentent une bonne concordance spatiale entre la solution analytique et la simulation. Les profils horizontaux mettent en évidence la présence de fluctuation autour d'une valeur moyenne. En ce qui concerne les profils verticaux, nous pouvons noter que les écarts sont plus

importants. Ainsi, les écarts relatifs entre solution analytique et numérique ont été calculés sur chacun des profils, comme illustré sur la figure 4.

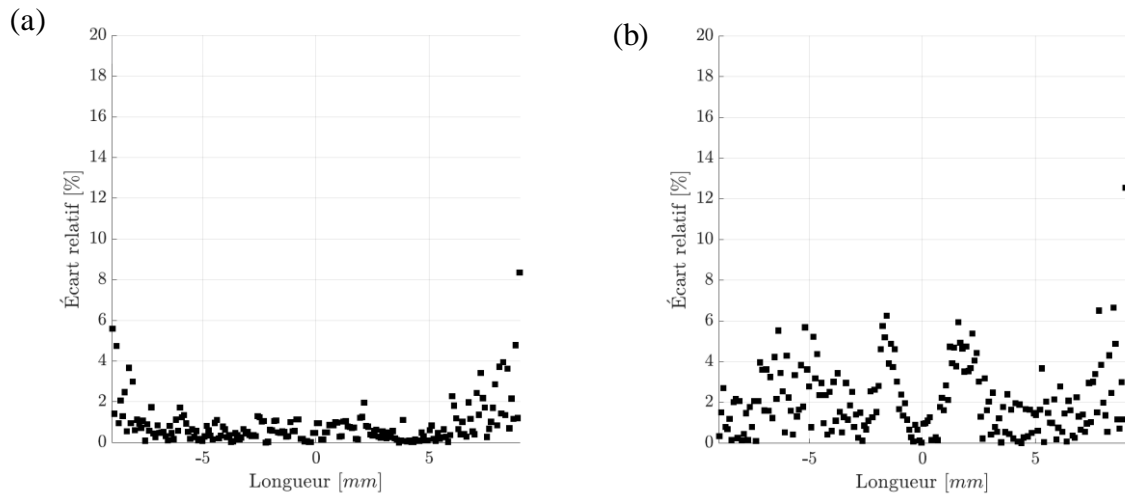


Figure 4 : *Écarts relatifs sur les profils d'éclairement : horizontaux (a) et verticaux (b).*

Nous noterons que les écarts relatifs obtenus sur le profil horizontal restent globalement inférieurs à 2%, excepté au niveau des bords de la plaque. Concernant le profil vertical, nous noterons des écarts globalement inférieurs à 6%, avec un écart sur le maximum d'éclairement de 1%. Sur le profil vertical, les écarts sont plus importants en raison du fort gradient d'éclairement. Ces résultats ont été obtenus pour un nombre de rayons de 500 millions. Néanmoins, en vue d'une application industrielle, il est intéressant d'étudier la sensibilité de ce paramètre en vue de trouver un bon compromis précision – temps de calcul.

Pour ce faire, une étude paramétrique a été réalisée et consiste à faire varier le nombre de rayons entre 1 et 500 millions. Suite à cette étude, la somme des écarts quadratiques entre les cartes d'éclairement obtenues a été calculée, comme illustré sur la figure 5. Pour un nombre de rayons de 500 millions, nous obtenons une erreur de 1%. Néanmoins, dans le cas d'une géométrie complexe, un nombre de rayons élevé induirait des temps de calculs accrus. Ainsi, compte tenu de l'évolution de l'erreur obtenue, nous pouvons considérer que notre code de calcul est validé. Enfin, en vue d'optimiser les temps de calcul, le nombre de rayons retenu est 300 millions, ce qui induit une erreur inférieure à 2% par rapport à la solution analytique.

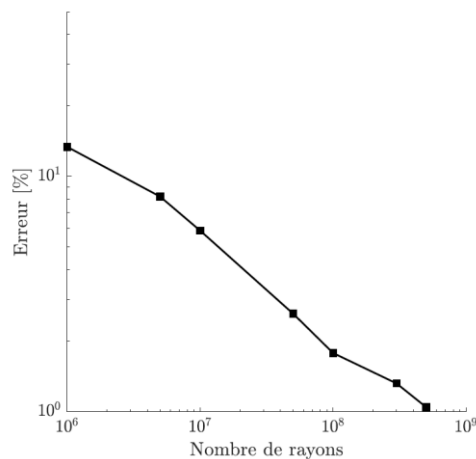


Figure 5 : *Evolution de l'erreur quadratique avec le nombre de rayons.*

### 3. Caractérisation optique et modèle d'émission des LEDs

Afin de construire le modèle d'émission de la LED haute luminance (LED qui par ailleurs comporte trois puces), il est important d'identifier les paramètres physiques représentatifs de l'émission lumineuse. Ainsi, la caractérisation optique complète du composant a été réalisée. La figure 6 propose la visualisation du profil d'émission de la LED. La figure 7 présente le spectre d'émission de la LED.

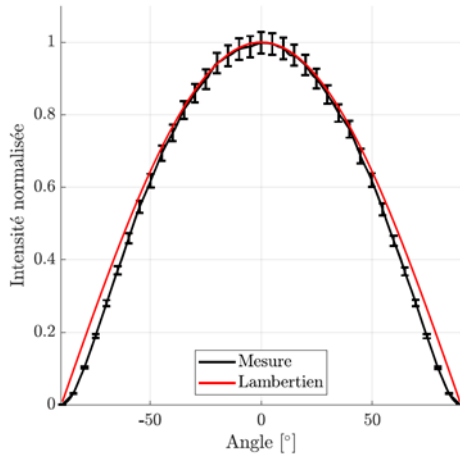


Figure 6 : Profil d'émission de la LED

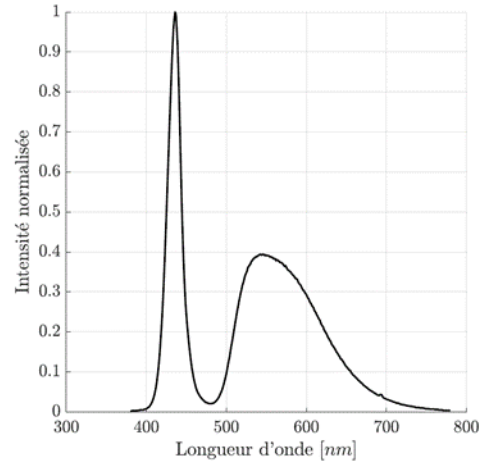


Figure 7 : Spectre d'émission de la LED

La polaire d'émission de la source lumineuse correspond à la variation de l'intensité lumineuse en fonction de l'angle de détection. Une telle mesure a été réalisée au moyen d'un goniomètre équipé d'une photodiode. Comme le montre la figure 6, le profil d'émission de la LED est quasi-identique au comportement d'une source lambertienne. Ensuite, le spectre d'émission de la LED a été mesuré à l'aide d'un spectromètre LABSPHERE CDS 610, dont la gamme spectrale s'étend de 300 nm à 1 000 nm. Le spectre de la LED se compose de deux pics, obtenus respectivement aux longueurs d'onde de 450 nm et 555 nm. Le premier pic correspond à l'énergie lumineuse émise par les puces (émission dans le bleu). Le second pic correspond à l'émission de l'énergie jaune issue du processus de conversion se produisant au sein du luminophore. *In fine*, la couleur de la LED est blanche. À partir du spectre, il est possible de déterminer l'efficacité lumineuse de la LED, définie par la relation suivante :

$$K = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda) K_m V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

où  $S(\lambda)$  désigne le spectre d'émission de la LED et  $K_m V(\lambda)$  est l'efficacité lumineuse spectrale ( $K_m = 683 \text{ lm/W}$  pour le domaine photopique [8]). L'efficacité lumineuse de la LED permet de convertir le flux lumineux [lm] en puissance optique [W].

Le flux lumineux émis par chacune des trois puces a été mesuré, à l'aide d'une approche similaire à l'étude de Tyukhova *et al.* [9]. Des mesures de luminance ont été réalisées au moyen d'une caméra LMK 5, équipée d'un détecteur CCD (résolution de 1380x1030 pixels). Connaissant ensuite la luminance de chaque puce et en raison du fait que la LED a un comportement lambertien, le flux lumineux est déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$\Phi_{opt} = \pi L S \quad (3)$$

où  $L$  représente la luminance totale et  $S$  la surface d'une puce.

Enfin, connaissant les flux lumineux par puces ainsi que l'efficacité lumineuse de la LED, nous pouvons déterminer les puissances optiques correspondantes, comme illustré sur la figure 8.

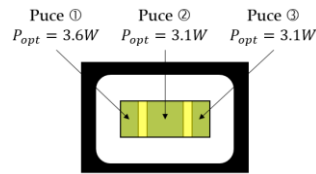


Figure 8 : Répartition des puissances émises par chacune des puces.

Nous avons présenté les différentes étapes permettant de caractériser les paramètres optiques de la LED. Ces paramètres vont nous permettre de mettre en donnée le modèle thermo-optique du composant. Le prochain paragraphe a pour objectif de confronter les résultats de la simulation thermo-optique avec la mesure par thermographie infrarouge.

## 4. Validation du modèle d'émission par thermographie infrarouge

### 4.1. Banc expérimental

Pour valider le modèle d'émission de la LED, un dispositif expérimental a été mis en place, comme illustré sur la figure 9. Le principe de cette expérimentation reprend l'idée générale présentée dans des travaux antérieurs [4] [5]. Une plaque opaque ( $\varepsilon = 0.9$ ) est positionnée devant la LED montée sur son système de refroidissement (constitué d'un radiateur à ailette et d'une ventilateur). Une fois la source mise sous tension, l'énergie lumineuse est absorbée par la plaque, ce qui contribue à son échauffement. Pour mesurer le champ de température en face arrière de la plaque, nous utilisons une caméra infrarouge FLIR SC325 dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau 1.

Résolution	Bande spectrale	Focale	Taille pixel détecteur
0.05°C	7.5µm – 14µm	18mm	25µm

Tableau 2 : Paramètres de la caméra FLIR SC325.

Taille de la plaque	Distance LED - plaque	Distance plaque - caméra
400x400mm <sup>2</sup>	35mm	50mm

Tableau 3 : Paramètres de l'expérimentation.

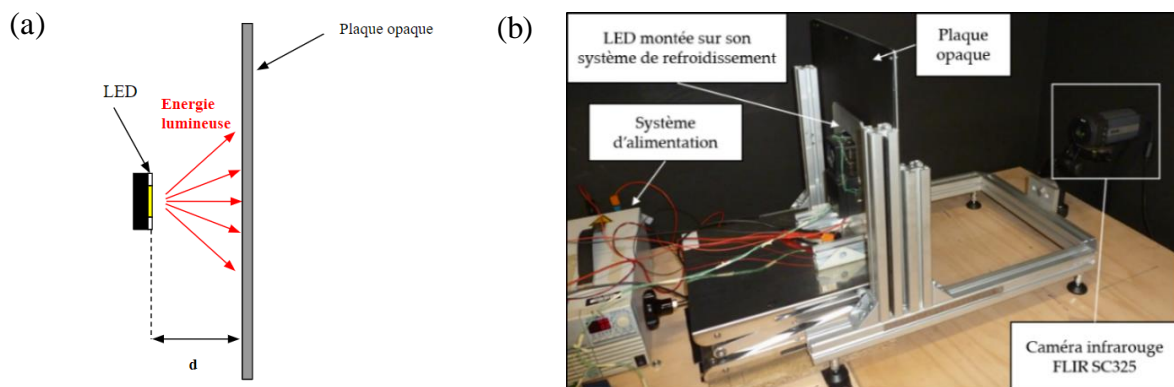


Figure 9 : Dispositif expérimental : principe (a) et mise en place du banc (b).

Comme le calcul du rayonnement a été implanté dans notre logiciel commercial CFD, la résolution des transferts conducto-convectivo-radiatif couplé à l'interaction rayonnement-matière est possible. Les résultats de simulations sont comparés aux mesures réalisées par thermographie infrarouge, dans la même configuration d'irradiation.

## 4.2. Analyse des résultats

Les figures 10 (a) et (b) présentent les champs de température obtenus par thermographie IR et par simulation sur la face arrière de la plaque. Le thermogramme met en évidence une dissymétrie sur le champ de température expérimental, dissymétrie qui est également prédite par simulation. Cette dissymétrie provient du fait que l'énergie lumineuse émise par chacune des puces composant la LED n'est pas uniforme. Cela induit ainsi une absorption non uniforme au niveau du centre de la plaque. En second lieu, nous pouvons noter la présence de trois panaches convectifs : deux panaches horizontaux et un vertical. Les deux panaches horizontaux sont induits par la spécificité du système de refroidissement de la LED (convection forcée). Le panache vertical est induit par la convection naturelle se mettant en place sur la face arrière de la plaque. Il est à noter que les phénomènes convectifs sont calculés au travers des champs de vitesse et de pression se produisant au sein de l'écoulement fluide. Nous noterons également que la simulation thermo-optique reproduit les mêmes phénomènes physiques que ceux détectés par la mesure.

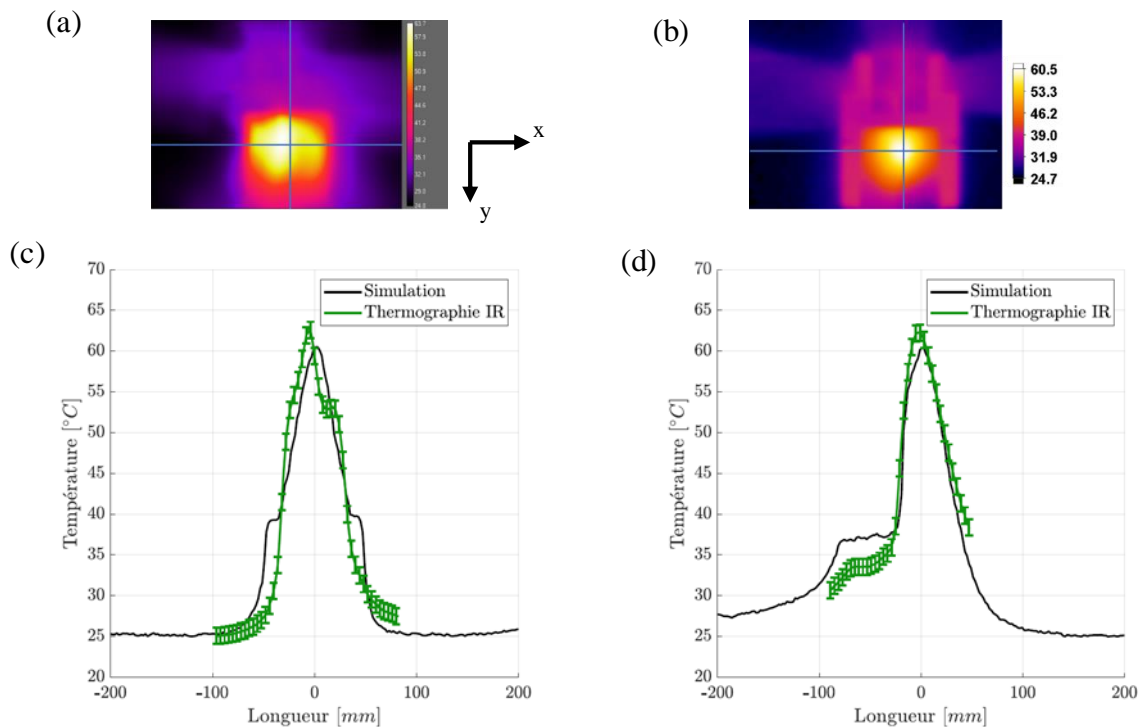


Figure 10 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques : champ de température mesuré par thermographie (a), champ de température obtenu par simulation (b) et profils de température de la plaque : horizontaux (a) et verticaux (b).

Enfin, les profils de température horizontaux et verticaux situés au centre de la plaque ont été tracés, comme le montre les figures 10 (c) et (d). En premier lieu, la simulation met en évidence la présence de deux discontinuités du profil horizontal situées en  $L = \pm 35 \text{ mm}$ . Ces discontinuités sont induites par les parties chaudes du système de refroidissement qui émettent un rayonnement secondaire. Cependant, le thermogramme ne les met pas en évidence, en raison du lissage du champ de température induit par la convection. Nous noterons également que le profil obtenu est symétrique, phénomène qui n'est pas reproduit par la mesure. Le profil

expérimental met en évidence une dissymétrie et un maximum de température décentré de 5mm. La position de ce maximum peut s'expliquer par le fait qu'une des puces de la LED émet une quantité d'énergie supérieure et éventuellement un fonctionnement non optimal de la source lumineuse. Concernant les profils verticaux, nous noterons un bon accord entre simulation et thermographie. Nous pouvons observer un saut de température obtenu en  $L=-25\text{mm}$ , qui induit par le phénomène de convection naturelle se mettant en place au niveau de la paroi de la plaque. Quand bien même des écarts sont présents entre simulation et mesure, les maxima de température obtenus par simulation et par l'expérience sont respectivement de  $60.5^{\circ}\text{C}$  et  $62.8^{\circ}\text{C}$ , ce qui génère des écarts relatifs inférieurs à 4%.

## 5. Conclusion et perspectives

Dans cet article, une première approche de prédiction des performances thermiques de LEDs de haute luminance utilisées dans l'automobile a été présentée. Pour cela, un code de calcul CFD utilisé conjointement avec un code de lancer de rayons de type Monte Carlo pour prendre en compte l'interaction rayonnement-matière, a permis de simuler la thermique globale du système. La validation de ce code « couplé » a été réalisée à partir de la comparaison à un cas de référence (modèle cylindre/plaque), disposant d'une solution analytique. Ensuite, l'intégration du modèle d'émission de la LED haute luminance dans l'outil de simulation numérique a conduit à un bon accord entre la simulation thermo-optique et la mesure par thermographie infrarouge. Les calculs génèrent des écarts inférieurs à 4% en ce qui concerne les maxima de température obtenus au centre de la plaque et de 9% au niveau du panache convectif. En outre, les profils obtenus par simulation et par l'expérience suivent des tendances similaires. Il serait intéressant d'approfondir davantage l'origine de la dissymétrie de l'écoulement, qui induit une dissymétrie sur le profil de température horizontal. Elle provient très certainement d'un fonctionnement non-optimal de la source. Il serait judicieux d'approfondir cette piste en vue d'en comprendre l'origine. Néanmoins, cela peut s'avérer fastidieux de par le fait que ce type de LED est toujours en développement (et donc soumise à des variations de conception et/ou procédé d'assemblage). Une seconde perspective serait d'étudier l'impact que peut avoir le nombre de rayons sur la résolution des échanges conducto-convecto-radiatifs et de leur couplage avec l'interaction de la matière.

## Références

- [1] X. Morel, S. Sommerschuh, H. El Idrissi, B. Reiss, « From discrete glare free to full HD lighting », *Congrès Vision* (Paris, 13<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> October, 2016).
- [2] M. Courcier, B. Reiss, V. Sanchez, « New front lighting possibilities through high definition digital lighting », *11<sup>th</sup> International Symposium of Automotive Lighting* (Darmstadt, 29<sup>th</sup>-30<sup>th</sup> September 2015), 211-220.
- [3] C. Lasance, A. Poppe, « Thermal management of LED application », New York, Springer, 2014
- [4] M. Dauphin, S. Albin, C. Roucoules, Y. Le Maout, F. Schmidt, M. El Hafi, « Modélisation des échanges radiatifs dans un système d'éclairage automobile par la méthode de Monte Carlo », *Proceeding of SFT 2013*, (2013).
- [5] J. Mackie, O. De Almeida, F. Schmidt, K. Labastie, « Modeling of IR lamps with coated reflector used in the slurry powder impregnation process of composite tapes », *AIP Conference Proceedings* (2019).
- [6] G. Barreto, P. Canhoto, M. Collares-Pereira, « Three-dimensional CFD modelling and thermal performance analysis of porous volumetric receivers coupled to solar concentration systems », *Applied Energy* 252 (2019).



- [7] H. Leuenberger, R. Person, « Compilation of radiation shape factors for cylindrical assemblies. Technical report », *ASME* (1956).
- [8] K. Sagawa, Y. Takahashi, « Spectral luminous efficiency as a function of age », *Journal of Optical Society of America* 18(11) : 2659-2667 (2001).
- [9] Y. Tyukhova, C. Waters « An assessment of high dynamic range luminance measurements with LED lighting », *Leukos* 10(2): 87-99 (2013).

### **Remerciements**

Les auteurs souhaitent remercier Valeo Lighting Systems pour leur soutien.