HAL open science

Modélisation des échanges radiatifs dans un système d'éclairage automobile par la méthode de Monte-Carlo

Myriam Dauphin, Stéphane Albin, Christine Roucoules, Yannick Le Maoult, Fabrice Schmidt, Mouna El-Hafi

To cite this version:

Myriam Dauphin, Stéphane Albin, Christine Roucoules, Yannick Le Maoult, Fabrice Schmidt, et al.. Modélisation des échanges radiatifs dans un système d'éclairage automobile par la méthode de Monte-Carlo. SFT (Congrès Société Française de Thermique), May 2013, Gérardmer, France. hal-02057100

HAL Id: hal-02057100

https://hal.science/hal-02057100v1

Submitted on 6 Mar 2019

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

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

Modélisation des échanges radiatifs dans un système d'éclairage automobile par la méthode de Monte-Carlo.

Myriam DAUPHIN[1,2,*], Stéphane ALBIN[1],Christine ROUCOULES[1], Yannick LE MAOULT[2], Fabrice SCHMIDT[2] , Mouna EL HAFI [2]

[1]Valeo Lighting Systems
34, rue Saint-André – 93000 Bobigny
[2]Mines Albi, ICA (Institut Clément Ader)
Campus Jarlard – 81013 Albi Cedex 09
[*](auteur correspondant : myriam.dauphin@valeo.com ; myriam.dauphin@mines-albi.fr)

Résumé - La géométrie complexe des optiques des systèmes d'éclairages automobiles peut générer des points de focalisation du rayonnement sur les parties plastiques du système. Cet article porte sur la modélisation des transferts radiatifs entre une lampe à incandescence et un réflecteur dont le revêtement est en aluminium. L'objectif a été d'évaluer le modèle de lampe adapté pour le calcul de la température d'une plaque opaque, irradiée par un système « lampe-réflecteur ». Pour cela, nous avons comparé trois modèles de lampes : une source ponctuelle, une source cylindrique et une source issue de mesures goniométriques. Le calcul de rayonnement a été mis œuvre au moyen d'une méthode de Monte Carlo associée à des techniques de suivi de rayons. On a démontré que la manière de modéliser la lampe a un impact sur la température de la plaque.

Nomenclature

Sf	surface du filament, m^2	$\varepsilon_\lambda(T_f)$	émissivité du filament à T_f
Tf	température du filament, K	$L_\lambda^\circ(T)$	: luminance du corps noir, $W.m^{-2}.\mu m^{-1}sr^{-1}$
$\tau_b(\lambda)$	transmittivité du bulbe		

1. Introduction

Les simulations thermiques effectuées au sein de Valeo Lighting Systems permettent de prédire les températures des matériaux des systèmes d'éclairages automobiles en vue d'éviter leur dégradation. Des simulations utilisent la méthode des ordonnées discrètes et permettent d'estimer les points chauds avec une précision de +- 5°C sur les températures [1]. Cependant, cette méthode ne permet pas de traiter précisément les réflexions spéculaires et n'est pas adaptée aux phénomènes de focalisation du rayonnement rencontrés dans certains cas. C'est pourquoi, des méthodes de « raytracing » sont appliquées aux cas automobiles ([2],[3]). Dans l'article de Filippuzzi [3], un cas simple d'une lampe irradiant une plaque valide la distribution de température sur le bulbe de la lampe[1] par le biais d'un couplage rayonnement-CFD du système lampe-plaque.

Dans ce travail, nous faisons le choix de découpler le calcul du rayonnement du calcul de CFD. Notre objectif est de valider le modèle d'émission d'une lampe à incandescence (figure 1) dans le cadre d'une méthode numérique de Monte-Carlo permettant de prédire les températures atteintes par une plaque opaque, irradiée par un système « lampe-réflecteur » (figure 2). La distribution de température, calculée en face arrière de la plaque, est comparée

[1] Bulbe de la lampe : enveloppe en verre protégeant le filament de l'oxydation (figure 1).

aux mesures thermographiques. Ce cas d'étude permet de valider indirectement le modèle d'émission de la lampe et la modélisation des surfaces réfléchissantes. Dans un premier temps, on s'intéressera aux propriétés radiatives de la lampe. Puis, nous détaillerons les simulations effectuées pour trois modèles de lampes et nous comparerons nos résultats avec des mesures par thermographie infrarouge.

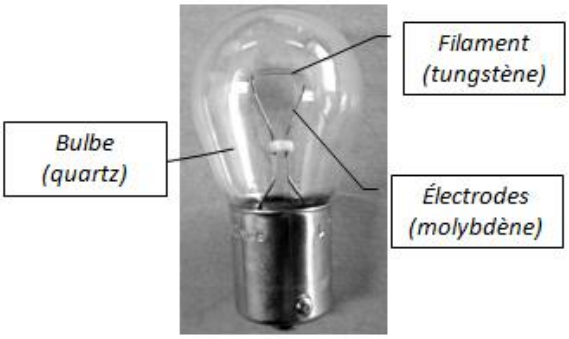

Figure 1 : *Lampe P21W-Philips - filament (L= 6mm, d= 0,75mm)*

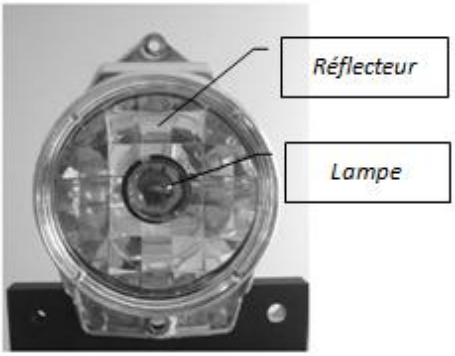

Figure 2 : *Système ouvert « Lampe-Réflecteur »*

2. Propriétés radiatives de la lampe

Le rayonnement thermique du filament, donné par la relation (1), fait intervenir l'émissivité du tungstène et la température, *Tf*. L'émissivité, $\varepsilon_\lambda(T_f)$, dépend de la température et varie fortement avec la longueur d'onde. Une précédente étude [7] a permis d'interpoler les données de la littérature sur la bande spectrale [0,25µm; 28µm] [4,5,6].

$$L_\lambda(T_f) = \varepsilon_\lambda(T_f) L_\lambda^\circ(T_f) \tag{1}$$

Des mesures en transmission du bulbe ont également été réalisées [7] au moyen d'un spectromètre IRTF. La synthèse de ces données est présentée figure 4. Le bulbe transmet 93% du rayonnement émis par le filament, $\tau_b = 0.93$, dans la bande [0,3µm ; 5,5 µm] (Figure 3). Au-delà de 5,5 µm, le bulbe est opaque affectant l'énergie partant du filament : $L_\lambda(T_f) = \tau_b(\lambda)\varepsilon_\lambda(T_f) L_\lambda^\circ(T_f)$ (Figure 4).

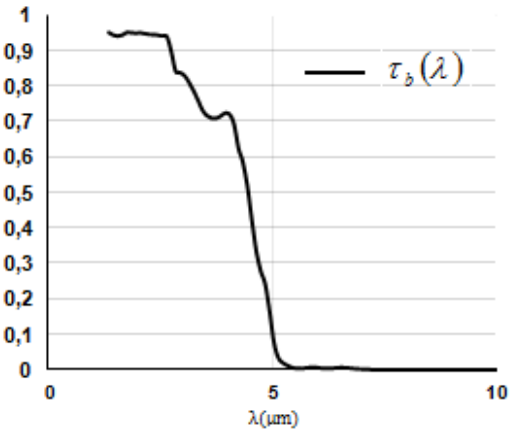

Figure 3 : *Transmission du bulbe*

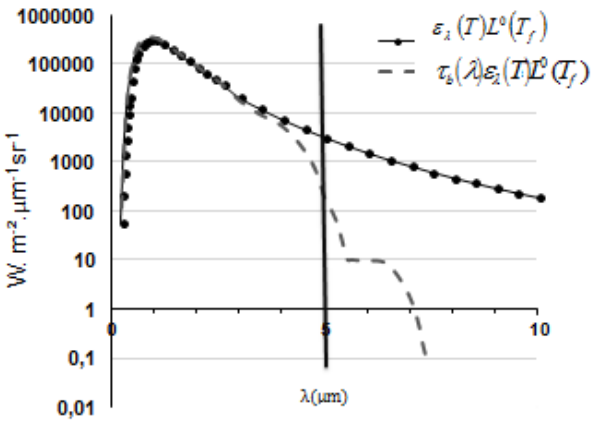

Figure 4 : *Influence du bulbe sur le rayonnement transmis*

3. Modélisation du système « lampe-réflecteur-plaque »

Nous utilisons la méthode numérique de Monte-Carlo comme une méthode statistique de calcul intégral pour estimer les distributions de densités de flux. Elle permet de tirer les rayons selon des lois de densités de probabilité et d'introduire aisément des effets radiatifs dans le processus de simulation [8]. Cette méthode, implémentée dans l'environnement, EDStar, développé par la communauté scientifique StarWest [9], utilise la bibliothèque de synthèse d'images PBRT (Physically Based Rendering Tool) [10].

3.1. Modèle d'émission de la lampe

Pour cette étude, nous proposons de comparer trois modèles de sources radiatives de puissance équivalentes, 25W, dans le but d'identifier un modèle de lampe adapté et simple (Tableau 1). Les sources se distinguent par la distribution spatiale des rayons. La première source est ponctuelle. La deuxième source est modélisée par un filament cylindrique d'où sont tirés les rayons selon une *pdf* « Lambertienne »[2]. L'énergie de la lampe est uniformément répartie sur la totalité des rayons. En chaque point source, les vecteurs directions des rayons sont uniformément distribués dans l'hémisphère sortant selon la loi de Lambert. Enfin, la troisième source, « source goniométrique », est issue des mesures de l'intensité radiative de la lampe pour différents angles sur la bande spectrale [0,4; 1,1 µm]. En pratique, il s'agit d'un fichier de rayons, chaque rayon étant affecté de la même valeur unitaire. La polaire d'émission de la lampe est donc recréée par les variations de densités de rayons sur la surface du bulbe (Figure 5). Nous utilisons seulement les données portant sur les vecteurs directions. Ainsi, la source goniométrique est vue comme une source de recalage spatial pour notre modèle de lampe recréant fidèlement le trajet optique des rayons.

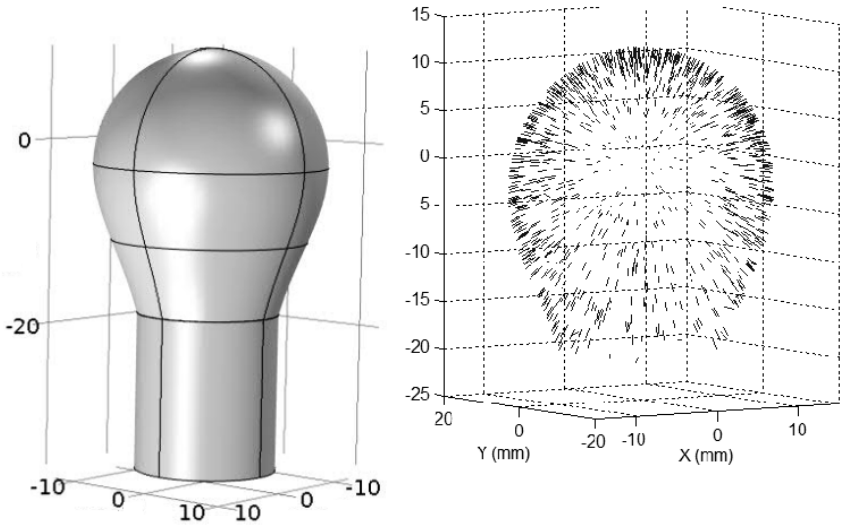

Figure 5 : *Source goniométrique : représentation 3D d'un échantillon de 1000 rayons- Données Valeo Lighting Systems*

---

[2] *Pdf* « Lambertienne » : $p(\vec{\omega}) = \frac{\cos\theta}{\pi}$, $\cos\theta$ est le produit scalaire entre le vecteur direction $\vec{\omega}$ et le vecteur normal

	Puissance	*Géométrie filament*	*Surface rayonnante (Origines rayons)*	*Vecteurs directions*
	W			
Ponctuelle (1)	25	Point source	Point source	*Pdf* isotrope
Cylindrique (2)	25	Cylindre (L=6mm, d=0.75mm)	Cylindre	*Pdf* Lambertienne
Goniométrique(3)	25	–	Bulbe	Vecteurs directions

Tableau 1 : *Tableau de synthèse des modèles de sources radiatives*

3.2. Modèle de réflexion du réflecteur

Notre algorithme, se basant sur les propriétés statistiques de la méthode de Monte-Carlo, consiste à effectuer un test sur une valeur seuil pour lequel un nombre aléatoire sur l'intervalle unité est tiré de manière uniforme. Ce nombre, selon qu'il soit inférieur ou supérieur à cette valeur seuil, détermine le futur du rayon (absorbé ou réfléchi). Un grand nombre de rayons permet de prendre en compte la fraction réelle d'énergie absorbée ou réfléchie par le réflecteur. On suppose une réflexion spéculaire idéale avec une valeur seuil constante ρ^R=0,8 de sorte que 80% du rayonnement est réfléchi. L'algorithme permet ainsi de ne pas modifier l'énergie du rayon au cours des évènements qu'il subit avant d'impacter la plaque.

4. Validation du modèle par thermographie infrarouge

4.1. Banc expérimental et simulation thermique

Deux expériences permettent de valider le modèle radiatif d'un système lampe-réflecteur. Dans l'expérience 1, l'irradiation d'une plaque opaque de type ABS-N est faite avec lampe seule (Figure 6). En simulation, seules les sources ponctuelles et goniométrique sont testées pour ce cas. Dans l'expérience 2, l'irradiation de la plaque est faite avec le système lampe-réflecteur (Figure 7). La distribution de densité de flux sur la plaque irradiée, calculée dans EDStar, est appliquée comme condition aux limites sur la face avant, afin de réaliser une simulation thermique 3D dans le logiciel commercial Comsol Multiphysics®. Le résultat à l'issu de chaque configuration est ensuite comparé aux mesures par caméra infrarouge- FLIR SC325 réalisées dans la même configuration d'irradiation.

	Résolution	*Bande spectrale*	*Focale (Objectif)*	*Taille pixel détecteur*
	°C	µm	mm	µm
FLIR SC325	0,05	[7.5-13]	30	25

Tableau 2 : *Paramètres Caméra-Infrarouge*

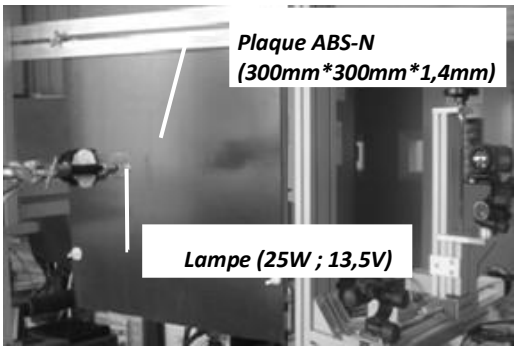

Figure 6 : *Expérience 1 : lampe seule*
Distance filament-plaque = 7cm

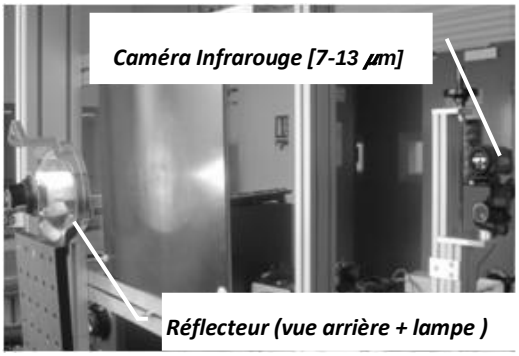

Figure 7 : *Expérience 2 : lampe–réflecteur*
Distance filament-plaque = 14,94cm

	C_p *(mesure « hot disk »)*	k *(mesure « hot disk »)*	ρ	ε_{ABS_N} *(mesure spectromètre IRTF Bruker Vertex-70)*
	$W.kg^{-1}.K^{-1}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$kg.m^{-3}$	-
ABS-N	1300	0,19	1050	0,94

Tableau 3 : *Paramètres thermiques de la plaque ABS-N*

4.2. Résultats

4.2.1. Analyse des distributions de températures sur la plaque

Nous avons comparé les profils expérimentaux XX' et ZZ' aux profils obtenus numériquement. Les figures 8 et 9 présentent les profils relatifs à l'expérience 1 (lampe seule). Les figures 10 et 11 correspondent aux profils de l'expérience 2 (lampe et réflecteur). Figures 8 et 9, les profils expérimentaux sont symétriques. En revanche, le champ de température expérimental apparait dissymétrique sur les figures 10 et 11. Cette dissymétrie est causée par la géométrie facettée du réflecteur. On constate d'ailleurs que numériquement, le suivi de rayon reproduit bien cet effet.

La somme des écarts quadratiques des profils thermiques issus de l'expérience 1 (Figure 8, Figure 9) s'élève à 3 à 4 % pour la source goniométrique, et 5 à 6 % pour le cas ponctuel. Par ailleurs, la courbe relative à la source goniométrique surestime le profil thermographique de 2 °C au maximum. A l'inverse, la courbe relative à la source ponctuelle sous-estime ce profil thermographique de 2 °C. Pour l'expérience 2 (Figure 10, Figure 11), les écarts quadratiques s'accentuent. Ils varient entre 10 et 14,5 % pour la source ponctuelle, 8 et 14,3 % pour la source goniométrique et la source cylindrique. Cette fois ci, la source ponctuelle surestime la thermographie tandis que la source cylindrique et la source goniométrique sous estiment la thermographie. Par rapport à l'expérience 1, il y a donc eu une inversion de la tendance liée à la présence du réflecteur. Le modèle de réflexion étant le même pour les trois sources, on peut d'ores et déjà dire que cette inversion est liée aux différences de distribution spatiale du rayonnement des sources. Dans l'expérience 2, on constate que la source cylindrique approche mieux le profil goniométrique. Cette dernière étant notre source de recalage spatial, nous pouvons conclure qu'il n'est pas nécessaire d'affiner le chemin optique des rayons et de prendre en compte les effets de réfraction du bulbe.

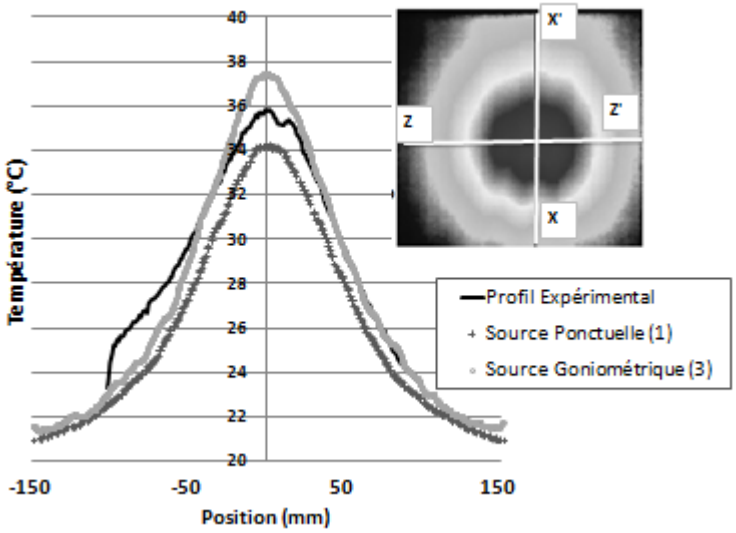

Figure 8 : ***Expérience 1****- Profil XX'*

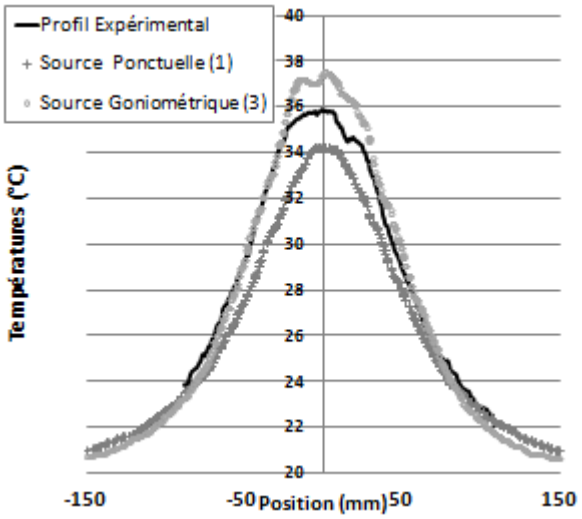

Figure 9 : **Expérience 1** - Profil ZZ'

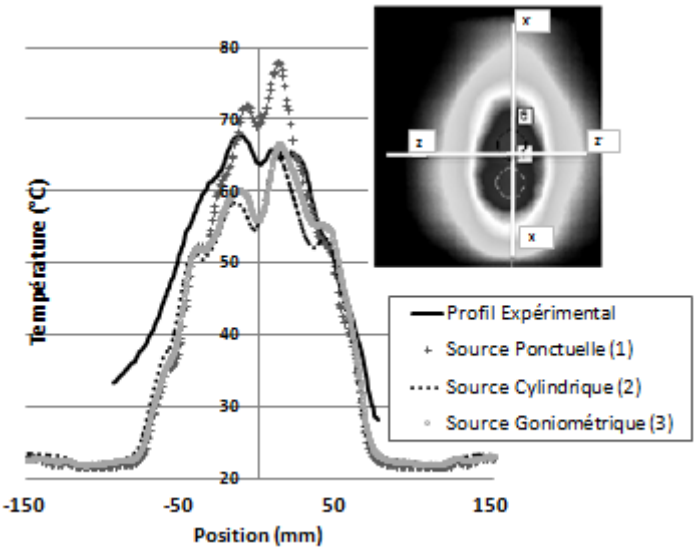

Figure 10 *:* ***Expérience 2****- Profil XX'*

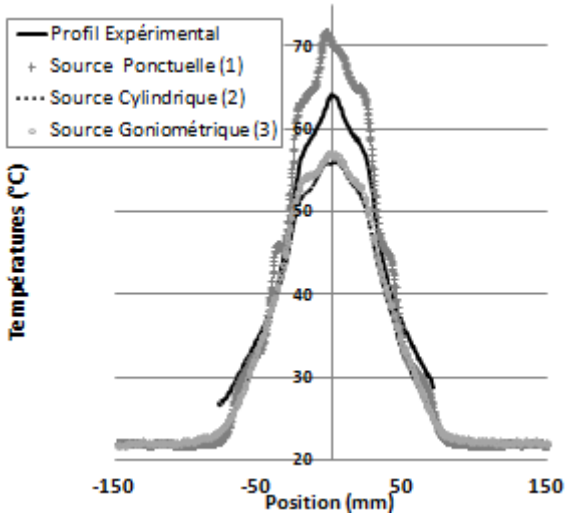

Figure 11 *:* ***Expérience 2****-Profil ZZ*

4.2.2 Analyse des distributions de densités de flux sur la plaque

Le tableau 4 présente la répartition de la puissance radiative dans le système (expérience 2). Les puissances obtenues sur la plaque et le réflecteur sont comparables. La puissance absorbée par la plaque dans le cas ponctuel est même inférieure de 1% à celle obtenue avec la source goniométrique. Les écarts constatés sur les profils thermiques ne peuvent s'expliquer de manière globale, il faut s'intéresser à la distribution des densités de flux pour détecter des éventuels points de focalisation.

	goniométrique	ponctuelle	cylindrique
	%	%	%
Puissance absorbée plaque	58.1	57	54.8
Puissance absorbée réflecteur	10.9	11,5	10.1
Puissance absorbée porte lampe	26.1	21	24.2
Puissance perdue	4.8	10,5	10.9

Tableau 4: *Répartition des puissances :* $(P_{surface}/P_{lampe})_{\%}$ *(expérience 2)*

Nous analysons la distribution $\Delta\phi_{(1)}(x,y)$ sur la plaque (2) afin de comparer les différences de répartition des densités de flux entre la source goniométrique et la source ponctuelle. L'expérience 1 (Figure12) montre que la source goniométrique est plus directive vers le centre de la plaque avec une irradiation plus importante d'environ 170 W/m² par rapport à la source ponctuelle. Figure 13, on observe l'effet inverse : la source ponctuelle irradie plus au centre de la plaque avec un écart de densité de flux significatif jusqu'à 600W/m² (zones gris médium) et très localement 1000 W/m² (zones noires). L'inversion de la tendance dans les profils thermiques est bien liée à un problème de dispersion des rayons.

$$\Delta\phi_{(1)}(x,y) = \phi_{gonio}(x,y) - \phi_{ponctuelle}(x,y) \qquad (2)$$

	Figure 12	Figure13
Zone 1	$\phi_{ponctuelle}(x,y) < \phi_{gonio}(x,y)$	$\phi_{ponctuelle}(x,y) > \phi_{gonio}(x,y)$
Zone 2	$\phi_{ponctuelle}(x,y) > \phi_{gonio}(x,y)$	–

Tableau 5 : Analyse des *zones présentées Figure 12 et Figure 13*

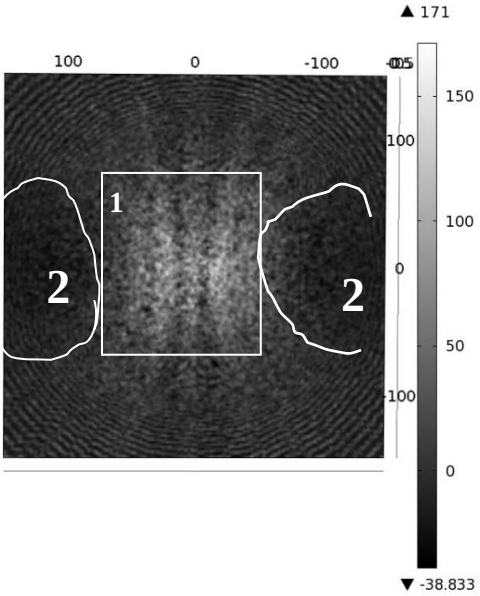

Figure 12 *:* ***Expérience 1*** *-* $\Delta\phi_{(1)}(x,y)$ **(W/m²)**

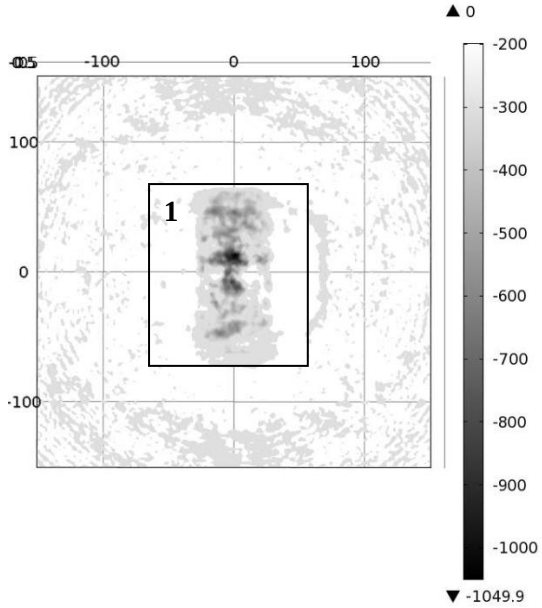

Figure 13 : ***Expérience 2-*** $\Delta\phi_{(1)}(x,y)$ <0

5. Conclusions et perspectives

L'introduction du réflecteur dans le système radiatif montre que la source ponctuelle conduit à un résultat numérique surestimant la température de 15°C par rapport au résultat de la simulation réalisée avec la source goniométrique. Nous avons ainsi démontré que le modèle de source ponctuelle n'est pas adapté à notre système.

Le calcul fait avec le modèle de source cylindrique, quant à lui, se recale thermiquement sur celui de la source « goniométrique ». Cela confirme qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte les effets de réfraction du bulbe.

En revanche, les modèles retenus, goniométriques et cylindriques, induisent des résultats qui sous-estiment la mesure thermographique de 6°C au maximum de température. En perspective, nos efforts se focaliseront donc sur l'amélioration du modèle de réflexion pour approcher les mesures expérimentales.

Références

[1] C. Chenevier « Thermal simulation in lighting systems -5 days/5degrees», (*Valeo Lighting Systems), PAL Symposium Darmstadt*, (2001).

[2] W.I. Moore, E. S. Donovan, C.R. Powers « Thermal Analysis of automotive lamps using the ADINA-F coupled specular radiation and natural convection model », *Computers and Structures* 72 (1999).

[3] A. Filipuzzi, O. Cotula, A. Pipino, F. Zanoletti, S. Paroni « Thermal Behavior of Bulb and LED based Automotive Rear Lamps», *3rd European Automotive CFD Conference* (2007).

[4] F. Devignes «Propriétés des rayonnements optiques», *Masson* (1997) (in French).

[5] LN. Latyev, VYA.Chekhovski, E.N. Shestakov. « Monochromatic emissivity of tungsten in the temperature range 1200-2600K and in the wavelength range 0.4-4µm», *High Pressures*, 2:175-181 (1970)

[6] L. Fu, R. Leutz, H. Ries «Physical Modeling of filament light sources», *Journal of Applied Physics* (2006).

[7] M. Dauphin, S. Albin, M. El Hafi, Y. Le Maoult, F. Schmidt «Towards thermal model of automotive lamps », *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography* (2012)

[8] J.R. Howell, « The Monte Carlo method in radiative transfer », *Hemisphere, Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme*, 120(3) : 547-560 (1998)

[9] Groupe de recherche Star-West. ED-Star (environnement de développement pour les statistiques radiatives). http:// wiki-energetique.laplace.univ-tlse.fr/wiki/index.php/starwest.

[10] M. Pharr and G. Humphreys., «Physically Based Rendering: from theory to implementation», *Elsevier* (2004).

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Valeo Lighting Systems pour leur soutien.