



HAL
open science

Optimisation de la conception d'un dissipateur thermique pour luminaire à diode électroluminescente

Rajaa Ait Lhadj, Abdellatif Khamlichi, Francisco Mata Cabrera

► To cite this version:

Rajaa Ait Lhadj, Abdellatif Khamlichi, Francisco Mata Cabrera. Optimisation de la conception d'un dissipateur thermique pour luminaire à diode électroluminescente. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. <hal-03421240>

HAL Id: hal-03421240

<https://hal.science/hal-03421240v1>

Submitted on 9 Nov 2021

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.



HAL Authorization

Optimisation de la conception d'un dissipateur thermique pour luminaire à diode électroluminescente

R. AIT LHADJ^a, A. KHAMLICH^a, F. MATA CABRERA^b

a. Laboratoire AMS, Faculté des Sciences de Tétouan, BP. 2121 M'Hannech, Tétouan 93002, Maroc
b. Ecole Polytechnique Supérieure d'Almaden, 1 Square Manuel Meca, 13400 Almaden, Espagne

Résumé :

On présente dans ce travail l'optimisation de la conception d'un dissipateur thermique qui est introduit pour évacuer la chaleur dégagée par une diode électroluminescente de haute puissance. La méthodologie utilisée s'appuie sur le couplage à travers la notion de surface de réponse de la méthode des éléments finis avec un algorithme d'optimisation. Les paramètres considérés dans le processus d'optimisation comprennent les dimensions géométriques du dissipateur.

Abstract :

We present in this work design optimization of a heat sink which is introduced to dissipate the heat generated by high power light emitting diode. The methodology is based on coupling through response surface concept the finite element method with an optimization algorithm. The parameters considered in the optimization process include the geometric dimensions of the heat sink.

Mots clefs: diode électroluminescente, transfert thermique, dissipateur thermique, optimisation

1 Introduction

Une ampoule à filament nécessite d'être assez chaude pour fonctionner, ce qui n'est pas le cas d'une diode électroluminescente LED. Au contraire, une LED fonctionne mieux à basse température. Une LED possède un spectre compris en très grande partie dans le visible. Il en résulte que la lumière émise par une LED est quasiment dépourvue d'infra rouges et d'ultra violet. L'absence d'infra rouges implique que la lumière de la LED ne chauffe pas ce qu'elle éclaire. L'absence d'ultraviolet en évite l'altération. Mais, en contrepartie, toutes les pertes sont d'ordre thermique, ce qui invite à considérer avec soin le transfert de chaleur qui se produit dans les dispositifs à LED.

Les LED de grande puissance représentent une technologie moderne en matière d'éclairage car elles permettent une économie considérable de l'énergie tout en possédant une longue vie. La physique décrivant le mécanisme d'éclairement produit par une LED attribue son origine à deux phénomènes: effet énergétique direct et effet optoélectronique. Les deux effets sont reliés à la température de jonction. Les caractéristiques d'éclairement produit par une LED dépendent de cette température qui dépend à son tour de la puissance d'alimentation, des conditions ambiantes (température ambiante, humidité, vitesse du vent), du dissipateur thermique et de la conception des fixations du luminaire. Pour obtenir des performances d'éclairement qui restent stables et une durée de vie de fonctionnement qui soit la plus longue possible, il faut être en mesure d'évacuer l'excès de chaleur produit par la LED. Dans le cas particulier des LED blanches, la variation de la température de jonction peut causer une variation de l'intensité lumineuse et une détérioration par vieillissement ou fatigue thermomécanique des composants [1-3]. Ce qui limite la durée de vie des LED.

Plusieurs recherches développées dans le domaine des LED se sont intéressées au contrôle de l'éclairement produit par ces dispositifs. On trouve ainsi des travaux qui présentent le contrôle par retour d'état de l'éclairement [4-9]. Le contrôle ne suffit pas à lui seul pour régler tous les problèmes car il faut que le système soit lui-même le fruit d'un dimensionnement optimal.

La variation de la température de jonction est affectée par la conception du luminaire, c'est-à-dire essentiellement le boîtier de la lampe, ainsi que par les variations au niveau de la puissance d'alimentation et des conditions ambiantes. Afin de contrôler au mieux la température de jonction d'une LED, il est utile de disposer d'un modèle suffisamment précis permettant de prédire les variations de la température de jonction.

Dans ce travail, on utilise un modèle simplifié décrivant le transfert thermique en régime stationnaire qui se produit dans un luminaire à LED afin d'étudier la faculté de dissipation, par échange convectif avec l'air ambiant, de la puissance d'échauffement produite dans la LED. Le modèle du luminaire LED prend la forme d'un réseau thermique. Ce modèle est utilisé dans la suite pour conduire l'optimisation géométrique du système luminaire.

2 Modèle thermique d'un système luminaire à LED

Une ampoule LED à lumière blanche est constituée de trois éléments de base: la puce, le boîtier de fixation et la capsule avec colle au phosphore [10]. La lampe LED, le support métallique et le radiateur forment la structure du luminaire, figure 1.

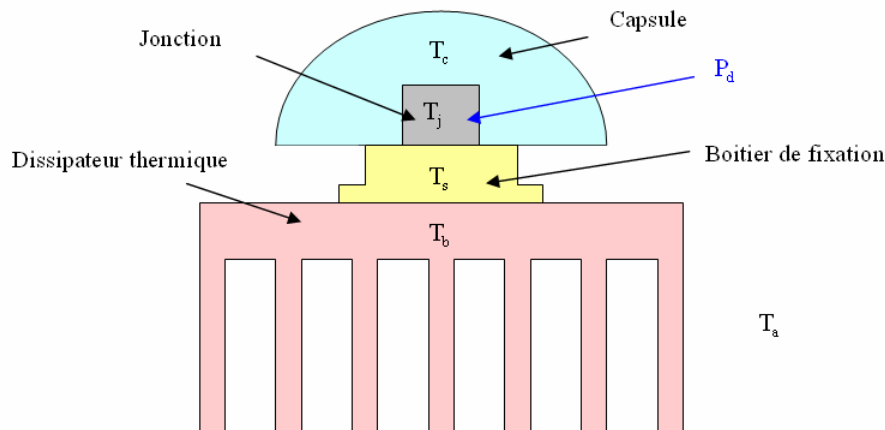


FIG. 1 – Modèle simplifié d'un luminaire à LED

Selon les principes de transfert thermique, le luminaire peut être divisé en quatre parties :

- la jonction, comprenant la structure complète de la puce ;
- la capsule, comprenant les lentilles optiques, la colle silicone et le phosphore.
- le boîtier de fixation comprenant le bloc de conduction de chaleur et éventuellement un réflecteur optique, il est encastré sous la jonction de la LED et sert à conduire la chaleur au dissipateur thermique ;
- le dissipateur thermique qui est attaché au bloc de fixation.

La jonction représente la source thermique dans une LED. Lorsque celle-ci reçoit la puissance électrique elle s'échauffe [2]. Cette chaleur est transférée par la suite aux autres composants. La capsule est en contact avec la jonction, mais on peut négliger cette partie de transfert thermique avec l'air ambiant qui est petite car la surface d'échange convectif est petite. Le boîtier de fixation qui a une masse relativement faible permet de transférer la quasi-totalité de la chaleur produite au niveau de la jonction. Le boîtier de fixation est conçu à l'aide d'un matériau ayant une grande conductivité thermique tel que le cuivre. Le boîtier a pour fonction de transférer la chaleur au dissipateur thermique dont la surface doit être suffisamment grande pour dissiper la chaleur essentiellement par convection avec l'air ambiant.

Afin de modéliser le transfert de puissance dans le luminaire à LED, nous utilisons la notion de résistance thermique d'un composant. Celle-ci caractérise l'augmentation de température occasionnée par la puissance dissipée dans le composant.

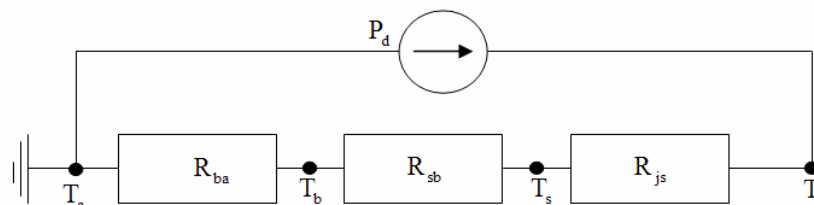


FIG. 2 – Modèle réseau thermique du luminaire à LED

Afin de stabiliser la température, il faut donc réaliser une résistance thermique adéquate, on prévoit en général pour cela un montage sur évacuateur thermique qui assure l'échange thermique entre le composant et

l'air ambiant.

Le transfert thermique moyen qui se produit dans un luminaire peut être décrit par le réseau thermique montré sur la figure 2. La température de chaque pièce est définie à l'aide d'une seule valeur (modèle thermique discret) en faisant abstraction des gradients thermiques qui peuvent se manifester dans le problème.

Les résistances thermiques qui apparaissent dans le modèle du luminaire, figure 2, sont essentiellement induites par les échanges se produisant aux différentes interfaces qui séparent les divers éléments qui le constituent. La résistance thermique équivalente entre la jonction et l'air ambiant fait intervenir les trois résistances thermiques principales suivantes:

- résistance thermique équivalente entre la jonction et le boîtier de fixation R_{js} ;
- résistance thermique entre le boîtier de fixation et le dissipateur R_{sb} ;
- résistance thermique entre le dissipateur et l'air ambiant R_{ba} .

La résistance équivalente est donnée par la formule suivante

$$R_{eq} = R_{ba} + R_{sb} + R_{js} \quad (1)$$

qui montre que R_{eq} est une fonction croissante de R_{ba} . La résistance équivalente doit permettre de dissiper la puissance $P_d = (T_j - T_a) / R_{eq}$. Le problème du dimensionnement thermique du luminaire consiste à imposer T_j , à identifier la température ambiante la plus défavorable T_a et à réaliser une résistance thermique au plus égale à $R_{eq} = (T_j - T_a) / P_d$.

Puisqu'en général, les autres résistances dans l'équation (1) qui sont différentes de R_{ba} sont imposés par les constructeurs des LED, le dimensionnement thermique du luminaire peut être fait en optimisant la configuration géométrique du dissipateur afin de minimiser R_{ba} .

3 Etude de cas

On considère une application réelle pour laquelle les données du problème sont les suivantes :

- température maximale de jonction pour une couleur blanche neutre $T_j = 125^\circ C$;
- température ambiante $T_{a,\min} = -30^\circ C$ et $T_{a,\max} = 60^\circ C$;
- résistance jonction- boîtier de fixation $R_{js} = 0.15 W / ^\circ C$;
- résistance boîtier de fixation-dissipateur $R_{sb} = 0.3^\circ C / W$;
- puissance de la diode électroluminescente à haute puissance (HP-LED) à dissiper $P_d = 84 W$;

La température ambiante de dimensionnement est donc $T_a = 60^\circ C$. La résistance thermique nécessaire pour dissiper la puissance $P_d = 84 W$ ne doit pas dépasser la valeur maximale définie par $R_{eq} = (T_j - T_a) / P_d = 0.774^\circ C / W$. D'où la résistance maximale du dissipateur thermique qui se calcule par $R_{ba} = R_{eq} - R_{sb} - R_{js} = 0.324^\circ C / W$.

On choisit comme matériau constituant le dissipateur l'Aluminium pur à 99% du fait de sa légèreté et de son excellente conductivité thermique. Il admet la conductivité thermique $k = 200 W.m^{-1}.K^{-1}$, la densité $\rho = 2710 kg.m^{-3}$ et la capacité thermique $C = 897 J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Le problème de dimensionnement du dissipateur consiste à trouver les caractéristiques géométriques du dissipateur thermique permettant de réaliser R_{ba} tout en minimisant le poids. Dans note cas, nous supposons que le problème est plan et nous introduisons les paramètres géométriques définis sur la figure 3. Seul le problème d'optimisation paramétrique est considéré. Le problème plus général d'optimisation de la forme du dissipateur en considérant une configuration géométrique variable de ce dernier est très compliqué à formuler et à résoudre. Toutefois, on pourrait intégrer dans le problème un nombre variable d'ailettes, mais il faudrait faire l'optimisation d'abord en fonction des paramètres géométriques avant de comparer ensuite les configurations à ailettes différentes entre elles.

La résolution du problème de dimensionnement du dissipateur peut être faite de manière commode en transformant le problème de la façon suivante : on impose le flux de chaleur correspondant à la puissance à dissiper sur la face AB, figure 3, et on détermine la température de cette face qui ne doit pas dépasser la

valeur $T_{b,max} = 113^{\circ}C$ calculée en utilisant les données indiquées ci-dessus. On établit ensuite une approximation par surface de réponse de cette température qui est obtenue par interpolation de résultats de calculs effectués éléments finis selon un plan d'expérience bien établi.

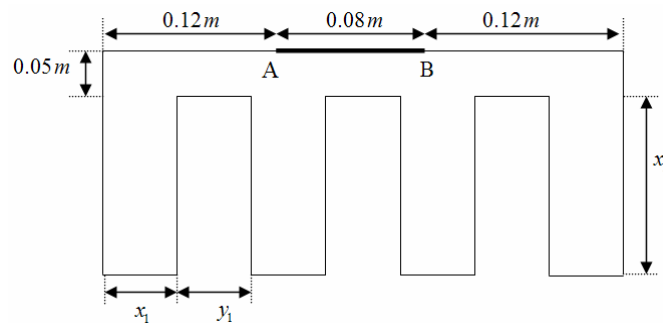


FIG. 3 – Configuration géométrique du dissipateur thermique

La géométrie du dissipateur est choisie telle que le paramètre y_1 dépende de x_1 selon $y_1 = (0.32 - 4x_1)/3$, donc seuls les deux paramètres géométriques x_1, x_2 sont indépendants. Le troisième paramètre de conception choisi représente la profondeur du dissipateur, il est noté x_3 . Il intervient dans le problème par l'intermédiaire du flux de puissance imposé sur la face AB du dissipateur $q_0 = P_d / (0.08x_3)$. Trois niveaux ont été choisis pour chacun des trois paramètres, ce qui porte le nombre de combinaisons à considérer selon un plan factoriel complet à 27. Le calcul pour chaque configuration géométrique a été effectué sous le logiciel Comsol.

Le tableau 1 permet de récapituler les niveaux choisis pour chacun des trois facteurs.

Facteur	Niveau bas (m)	Niveau moyen (m)	Niveau haut (m)
x_1	0.03	0.04	0.05
x_2	0.10	0.15	0.20
x_3	0.10	0.20	0.30

TAB. 1 – Niveaux choisis pour les trois paramètres de conception

Le module utilisé sous Comsol est « transfert de chaleur général ». L'équation modèle s'écrit

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + q_s T \quad (2)$$

avec dans notre cas $Q = q_s = 0$.

Les conditions aux limites correspondent toutes à la forme générale

$$-n \cdot (-k \nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T) \quad (3)$$

où n est la normale externe au domaine, h le coefficient de transfert thermique par convection naturelle, T_{inf} la température de l'air et q_0 un flux imposé. Sur AB le flux $q_0 = P_d / (0.08x_3)$ est imposé. Les conditions aux limites de type convection naturelle avec l'air avec le coefficient d'échange minimal $h = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ont été appliquées sur toutes les autres faces du dissipateur.

Le maillage a été initialisé puis raffiné pour tester la convergence. Les modèles construits comprennent à peu près 500 degrés de liberté, 150 nœuds et 250 éléments.

Les paramètres du solveur ont été sélectionnés de la façon suivante: type d'analyse stationnaire ; solveur Direct (UMFPACK) ; tolérance relative 10^{-6} et nombre maximum d'itérations 25.

Pour chaque combinaison des paramètres x_1, x_2, x_3 , la température maximale T_b sur la face AB est relevée. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 2. La figure 4 montre les isovaleurs dans le cas de la ligne 3 de ce tableau. L'ensemble des résultats permet d'identifier une surface de réponse qui exprime la température T_b en fonction des paramètres de conception de base sous la forme $T_b = T_b(x_1, x_2, x_3)$.

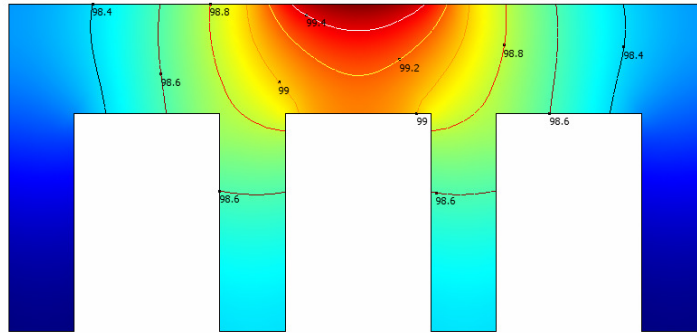


FIG. 4 – Isovaleurs de température associées aux données de la troisième ligne du tableau 2

L'analyse de variance conduite sur les résultats du tableau 2 a montré que les paramètres x_2 , x_3 ainsi que l'interaction entre x_2 et x_3 sont les plus influents sur le résultat. La corrélation sous forme d'un polynôme quadratique d'ajustement au sens des moindres carrés obtenue par la commande *regstats* de Matlab a donné

$$T_b(x_1, x_2, x_3) = 339.59 - 80.555x_1 - 839.67x_2 - 1173.6x_3 - 4.943 \times 10^{-11} x_1 x_2 + 91.667x_1 x_3 + 1338.3x_2 x_3 + 555.55x_1^2 + 1088.9x_2^2 + 1615.5x_3^2 \quad (4)$$

x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	T_b (°C)
0.03	0.10	0.10	178.8
0.03	0.10	0.20	119.4
0.03	0.10	0.30	99.6
0.03	0.15	0.10	154.2
0.03	0.15	0.20	107.1
0.03	0.15	0.30	91.4
0.03	0.20	0.10	138.6
0.03	0.20	0.20	99.3
0.03	0.20	0.30	86.2
0.04	0.10	0.10	178.3
0.04	0.10	0.20	119.2
0.04	0.10	0.30	99.4
0.04	0.15	0.10	153.9
0.04	0.15	0.20	106.9
0.04	0.15	0.30	91.3
0.04	0.20	0.10	138.3
0.04	0.20	0.20	99.1
0.04	0.20	0.30	86.1
0.05	0.10	0.10	178.2
0.05	0.10	0.20	119.1
0.05	0.10	0.30	99.4
0.05	0.15	0.10	153.7
0.05	0.15	0.20	106.8
0.05	0.15	0.30	91.2
0.05	0.20	0.10	138.0
0.05	0.20	0.20	99.0
0.05	0.20	0.30	86.0

TAB. 2 – Température T_b en fonction de la combinaison des paramètres utilisés

Le coefficient R^2 associé à la corrélation définie par l'équation (4) vaut $R^2 = 99.77\%$, ce qui montre que cette équation permet de prédire avec une excellente précision la température pour toutes les dimensions géométriques se trouvant à l'intérieur du domaine défini par le tableau 1.

Le volume du dissipateur est

$$V(x_1, x_2, x_3) = 0.016x_3 + 4x_1x_2x_3 \quad (5)$$

Pour optimiser la masse du dissipateur, on résout le programme mathématique non linéaire

$$\begin{aligned} & \text{Minimiser } V(x_1, x_2, x_3) \text{ sous les contraintes} \\ & T_b(x_1, x_2, x_3) \leq 113 \\ & 0.03 \leq x_1 \leq 0.05 ; 0.10 \leq x_2 \leq 0.20 ; 0.10 \leq x_3 \leq 0.30 \end{aligned} \quad (6)$$

La commande *fmincon* de Matlab a permis de trouver la solution optimale suivante

$$x_1 = 0.03 \text{ m}; x_2 = 0.20 \text{ m}; x_3 = 0.1528 \text{ m} \quad (7)$$

La température telle qu'elle est donnée sur la figure 4 étant assez homogène, on envisage de simplifier le modèle en posant directement $P_d = hS(T_b - T_a)$, avec $S = x_3(0.66 + 8x_2)$ la surface totale d'échange par convection du dissipateur. Un problème d'optimisation approché s'obtient en considérant au lieu (6) la nouvelle contrainte

$$T_b = T_a + \frac{P_d}{Sh} \leq 113 \Leftrightarrow 0.30189 - 0.66x_3 - 8x_2x_3 \leq 0 \quad (8)$$

On peut voir que cette contrainte ne fait pas intervenir le paramètre x_1 , ce qui corrobore le fait, comme ceci a été constaté, que son influence est faible. La solution optimale du problème approché défini par (5) et (8) avec les mêmes conditions sur les bords que celles apparaissant dans (6) est donnée par

$$x_1 = 0.03 \text{ m}; x_2 = 0.20 \text{ m}; x_3 = 0.1336 \text{ m} \quad (9)$$

La comparaison des solutions exacte (7) et approchée (9) montre que l'approximation introduite par (8) donne l'ordre de grandeur de la solution, mais une variation relative de 12.5% est constatée. Ceci permet de rendre compte du fait que la forme du dissipateur est importante. Il est donc important d'envisager aussi une étude paramétrique où par exemple le nombre de palettes est pris variable.

4 Conclusion

La modélisation du transfert thermique qui se produit dans un luminaire à diode électroluminescente sous forme d'un réseau thermique a été développée. Le modèle obtenu a été utilisé afin d'optimiser la conception du dissipateur thermique de ce dispositif.

L'optimisation a été conduite en utilisant un calcul thermique avancé conformément à un plan d'expérience en factoriel complet, ce qui a permis d'identifier une surface de réponse permettant de prédire la réponse du système en fonction des dimensions géométriques du dissipateur. L'optimisation a été réalisée enfin en résolvant le programme mathématique non linéaire ayant comme fonction objectif le poids du dissipateur.

Références

- [1] Chhaged S., Xi Y., Li Y.L., Gessmann Th., Schubert E.F., Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes, *Journal of Applied Physics*, 97 (5), 2005.
- [2] Schubert E.F., *Light Emitting Diodes*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [3] Huang B.J., Tang C.W., Wu M.S., System dynamics model of high-power LED luminaire, *Applied Thermal Engineering* 29: 609–616, 2009.
- [4] Ashdown I., Neural networks for LED color control, *Proceedings of SPIE* 5187, 215–226, 2003.
- [5] Muthu S., Schuurmans F., Pashley M., Red, green, and blue LEDs for white light illumination, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 8 (2):333-338, 2002.
- [6] Muthu S., Gaines J., Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design, 38th IAS Annual Meeting, 515–522, 2003.
- [7] Zukauskas A., Vaicekauskas R., Ivanauskas F., Quadrichromatic white solid-state lamp with digital feedback, *Proceedings of SPIE* 5187, 185–198, 2003.
- [8] Moisio O., Pajula M., Pinho P., Tetri E., Halonen L., Sepponen R., Use of junction temperature in control of CCT in LED luminaire, *CIE Midterm Meeting & León, International Lighting Congress* 5, 18-20, 2005.
- [9] Deurenberg P., Hoelen C., van Meurs J., Ansems J., Achieving color point stability in RGB multi-chip LED modules using various color control loops, *Proceedings of SPIE* 5941, 63–74, 2005.
- [10] Eastley D., *Evaluating High-Power LEDs, Strategies In Light*, San Francisco, 2006.