
Banc de tests et de caractérisation pour la mesure optique, thermique et électrique des LED

**Sidahmed Beddar, Guillaume Thin, Jean-Baptiste Millet,
Yasser Alayli**

LISV, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
10-12 av. de l'Europe, 78140 Vélizy-Villacoublay, France
beddar.s@gmail.com

RÉSUMÉ. La fiabilité des LED n'est plus aujourd'hui reliée à une problématique d'endurance mais plutôt à des défaillances soudaines liées au design ou à des défauts de process. Il est alors très important d'être en mesure de détecter de telles défaillances durant des tests de fiabilité pertinents plutôt que de simples analyses binaires de comportement. En effet, si les paramètres communs comme le flux lumineux ou la tension sont suffisants pour estimer la durée de vie des LED, ces paramètres montrent peu d'intérêt pour qualifier la fiabilité et limiter les risques de retour au constructeur. Nous présentons ici un nouveau type de banc de mesures et les paramètres associés dont la mesure est réalisée avant et après tests, et permettent une qualification poussée des LED :

- Paramètres thermiques : température de jonction (T_j), fonction de structure à partir du chemin thermique ;
- Paramètres électriques : courbes IV, luminescence bas courant, V_f bas courant ;
- Paramètres optiques : spectre, ratio bleu/blanc.

ABSTRACT. Reliability engineers no longer deal with endurance problems for LED but rather with sudden failures which are due to design or process defects. It is therefore highly important to be able to detect such potential failures during reliability tests instead of using the too poor pass/fail analysis. Indeed, if commonly used parameters like flux and forward voltage are sufficient to estimate the LED lifetime, they show low efficiency in proving LED robustness and limiting the risk for warranty returns. We present here a new sensor test bench and the critical measurements that could be conducted before and after test.

- Thermal parameters: junction temperature (T_j) monitoring, structure function of the heat path.
- Electrical parameters: IV curves, low current luminescence, low current V_f .
- Optical parameters: spectrum, blue/white ratio.

MOTS-CLÉS : température de jonction (T_j), JEDEC51-1., SSL/LED, étude thermique, durée de vie, fiabilité, capteurs banc de test.

KEYWORDS: junction temperature (T_j), JEDEC51-1., SSL/LED, thermal management, lifetime, reliability, sensor test bench.

DOI:10.3166/I2M.15.1-2.137-160 © 2016 Lavoisier

1. Introduction

Le développement de la technologie LED InGaN a permis d'offrir aux acteurs industriels une source lumineuse pour les applications d'éclairage en employant des diodes émettant une radiation bleue en association avec un luminophore jaune afin d'obtenir une lumière perçue comme blanche. Le succès de l'introduction des composants optoélectroniques dans le domaine d'éclairage s'explique par certaines caractéristiques qu'offrent les LED. En effet, ces nouvelles sources lumineuses permettent de réduire la consommation électrique tout en offrant une longévité bien supérieure aux sources lumineuses traditionnelles. De plus, la nature électronique de ces composants autorise la digitalisation de la lumière émise et permet le développement de nombreuses fonctionnalités nouvelles.

Comme tous composants à semi-conducteur, la température de jonction a une relation directe avec le courant qui parcourt la LED et la tension à ses bornes, comme le montre l'équation Shockley (équation 1). Tous les paramètres dimensionnant un produit à LED sont impactés par les effets thermiques (Chhajed, 2005) : flux, couleur, efficacité, dimensionnement et durée de vie. La gestion thermique est donc un aspect majeur des systèmes d'éclairage à LED et la maîtrise de ce paramètre est cruciale tant vis-à-vis des études de fiabilité que pour les caractérisations optiques ou le dimensionnement d'un produit utilisant des LED (Chang, 2011).

$$V_f(I, T) = \frac{kT_j}{e} \ln \frac{I}{I_s(T)} \quad (1)$$

D'où I_s est le courant de saturation, e est la charge de l'électron, k la constante de Boltzmann, V_f la tension aux bornes de la jonction et T_j la température de la jonction.

L'objectif de ces travaux est de suivre, à l'aide de la plateforme que nous développons, les paramètres critiques qui pourraient être menés avant et après le test des composants LED au sein des produits. Ceci afin de déterminer les critères de défaillance, d'optimiser la conception des produits et d'augmenter leur durée de vie.

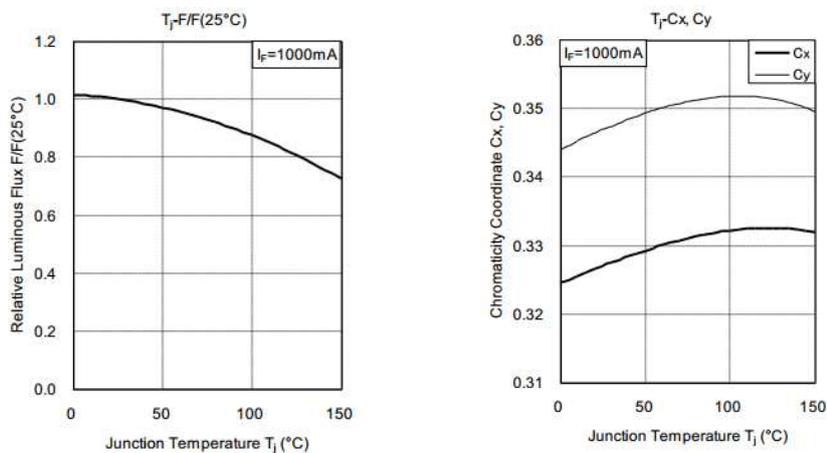
2. Enjeux et problématiques

Malgré leur efficacité, les LED nécessitent un management thermique important. Cela tient en partie au fait que la totalité des pertes créées lors de leur utilisation existe sous la forme de chaleur et qu'aucune énergie perdue n'est évacuée sous la forme d'infrarouges (tableau 1). Par ailleurs, leur forte sensibilité à la température ne permet pas de se passer de systèmes efficaces d'évacuation de la chaleur. En effet, tous les paramètres dimensionnant un produit à LED sont impactés par les effets thermiques. Ainsi, le flux lumineux et la couleur d'émission vont dépendre de la température. La fiabilité va également être directement impactée par la

température, certains modes de défaillances ayant la température pour origine directe, d'autres étant fortement accélérés par ce facteur. La gestion de la température impacte également le coût et l'encombrement des composants du chemin thermique. La gestion thermique est donc un aspect majeur des systèmes d'éclairage à LED et la maîtrise de ce paramètre est cruciale tant vis-à-vis des études de fiabilité que pour les caractérisations optiques ou le dimensionnement d'un produit utilisant des LED.

Tableau 1. Répartition d'énergie dans plusieurs systèmes d'éclairage

	Incandescente	Fluorescente	Halogénures métalliques	LED
Lumière visible	8 %	21 %	27 %	20-30 %
IR	73 %	37 %	17 %	0 %
UV	0 %	0 %	19 %	0 %
Chaleur à dissiper	19 %	42 %	37 %	70-80 %



a)

b)

Figure 1. Impact de la température sur le flux (a) et la couleur (b) d'une LED blanche

La gestion thermique commence par le composant lui-même dont le packaging tend à se réduire et la puissance à augmenter (Lasance, 2014). Or, le gradient thermique localisé dans la LED elle-même (c'est-à-dire entre la jonction et la

soudure de la LED) est le plus souvent de l'ordre de 30°C, que la LED soit de forte puissance ou non (les LED de faible puissance ont généralement une résistance thermique très élevée). Cela laisse imaginer que l'étude des comportements thermiques du packaging est une source d'amélioration importante des performances. Par ailleurs, la grande diversité actuelle de packaging nécessite de trouver des solutions plus standard et le management thermique sera l'un des facteurs importants de ce processus. La gestion thermique n'est bien entendu pas limitée au composant LED uniquement. Le mode d'assemblage, la technologie de PCB ainsi que chacun des éléments du chemin thermique doivent être optimisés (Lasance, 2014).

3. Méthodes de mesure de la température

Comme mentionné précédemment, connaître la température de la jonction en fonctionnement est d'une importance majeure. Les performances ainsi que la fiabilité de la LED dépendent bien souvent fortement de ce paramètre.

Différentes techniques ont été étudiées et appliquées à des mesures de température à l'intérieur de dispositifs à semi-conducteurs. Actuellement, le spectre des techniques de mesure disponibles est large, avec différents avantages et inconvénients. En fonction du dispositif sous test (Led, Oled ou Laser) et le besoin, nous choisirons la méthode de mesure la plus appropriée.

Nous pouvons citer trois méthodes différentes pour la mesure thermique (Lasance, 2014) :

- les méthodes électriques ;
- les méthodes optiques ;
- les méthodes physiques.

Le tableau 2 résume les principales caractéristiques de ces trois méthodes.

Tableau 2. Principales catégories de la mesure thermique

Méthodes	Exemple	Avantages	Inconvénients
Électriques	Tension jonction Tension de seuils Résistance	Système embarqué Aucun contact	Mesure de la température moyenne de la jonction
Optiques	Émission infrarouge Réflexion Effet Raman	Carte de température Bonne résolution	Besoin de vue de la surface
Physiques	Balayage nano-sonde Cristaux liquides Phosphores Thermographique	Carte de température	Besoin de vue de la surface Contact peut perturber température

3.1. Méthodes optiques

Différentes méthodes optiques existent pour évaluer la température des LED (spectre de photoluminescence, diffusion Raman, réflectance de surface, radiation infrarouge) mais la plus part d'entre elles sont des techniques surfaciques, c'est-à-dire qu'elles permettent de mesurer la température de surface de la LED. Or la région d'intérêt dans notre cas est la zone active, zone la plus chaude de la LED. Nous avons pu voir dans la description des différentes structures de LED que cette région est bien souvent présente à l'intérieur de la LED ce qui ne permet pas sa mesure directe. Par ailleurs, ces méthodes sont le plus souvent lourdes à mettre en place et ne permettent pas d'effectuer des mesures dans toutes les conditions d'utilisation des LED. Dans la plupart des cas la méthode électrique de mesure de la température de jonction des LED est préférée. Nous en détaillons le principe ci-après.

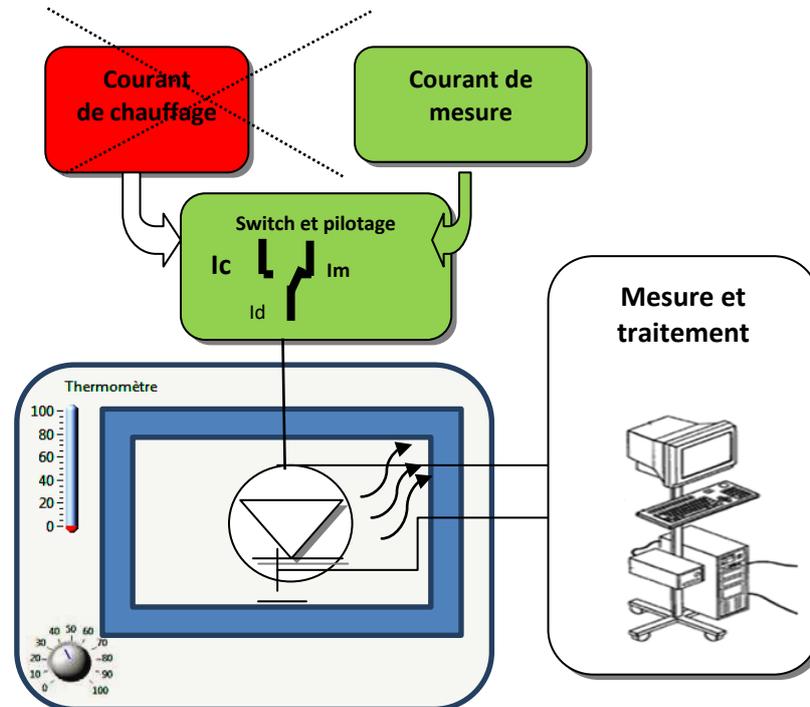


Figure 2. Schéma synoptique de la première phase (calibration) pour la technique de la mesure électrique

3.2. Méthode électrique de mesure de la température de jonction

La méthode électrique de mesure de la température de jonction fait l'objet d'un standard JEDEC (1). Le principe repose sur la connaissance de la relation entre la tension (V_f) et la température de la jonction (T_j) de la LED. La méthode requiert d'effectuer une calibration préalable de la LED afin d'obtenir la relation $V_f = F(T_j)$. Cette action est réalisée à l'aide d'une enceinte thermique dans laquelle est disposée la LED. Cette dernière est alimentée par un courant faible (I_m), choisi pour ne pas induire d'échauffement significatif de la jonction. L'enceinte thermique est réglée sur une première température. Après un temps suffisant il est possible de considérer que la température de la LED est la même que celle de l'enceinte. La tension aux bornes de la LED parcourue par le courant I_m est alors mesurée et enregistrée.

L'opération est ensuite répétée à plusieurs températures, typiquement entre -20 °C et $+120\text{ °C}$ avec des paliers de 10 à 20 °C . Dans cette plage de température, la relation $V_f = F(T_j)$ est souvent considérée comme linéaire et seule la pente de la droite (appelée facteur K) est utilisée dans la plupart des cas (figure 3).

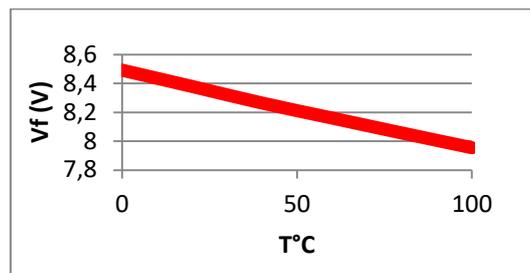


Figure 3. Courbe V_f en fonction de T_j , représentation du facteur K

Afin de connaître, à un instant donné, la température d'une LED parcourue par un courant il est nécessaire d'avoir un dispositif électronique permettant d'alimenter la LED au courant d'utilisation (I_h) et de venir sonder la tension aux bornes de la LED au courant de mesure (I_m) auquel la LED a été calibrée (figure 4).

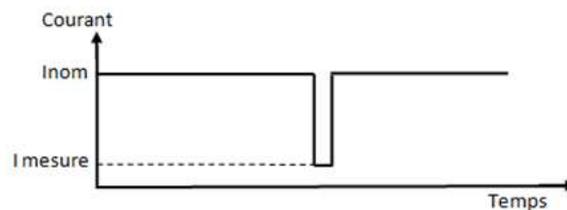


Figure 4. Représentation de la consigne courant pour sonder la tension aux bornes de la LED

Typiquement il s'agit de faire chuter le courant à I_m durant un pulse inférieur à $10 \mu s$ afin de considérer qu'aucun refroidissement ne s'est produit pendant ce laps de temps. En réalité le délai de mesure est supérieur à $10 \mu s$ et la mesure de la température est alors sous-estimée. En effet, le temps nécessaire pour passer du courant de chauffe au courant de mesure et pour effectuer la mesure de la tension (délai de mesure) peut s'avérer suffisamment long pour entraîner un refroidissement de la jonction et donc une sous-estimation de la température. Afin d'évaluer le refroidissement effectif qui apparaît lors du changement de courant il est possible d'effectuer la mesure de T_j avec plusieurs délais de mesure. En extrapolant la courbe obtenue, il est possible d'estimer l'erreur de T_j en fonction du délai de mesure.

La méthode, bien que très robuste, s'avère lourde à mettre en place. Il est en effet nécessaire de développer une électronique capable de varier très rapidement d'un courant de chauffe (pouvant s'élever à 2A) au courant de mesure (quelques mA) et de mesurer le V_f avec une bonne répétabilité et précision. Cela rend cette méthode rarement méticuleusement implémentée. Il faut cependant noter l'existence du banc T3ster, développé par les initiateurs de la méthode et commercialisé par la société Mentor Graphics dont les caractéristiques ont guidé la rédaction du standard JEDEC.

3.3. Mesure transitoire de la température et fonction de structure

La méthode standard de mesure de la T_j , bien que lourde à mettre en place offre néanmoins la précision et la vitesse d'échantillonnage suffisantes pour permettre de capter l'échauffement ou le refroidissement de la jonction pendant les premiers instants après un palier de courant.

Szekely *et al.* (Szekely, 1988 ; 1991) ont proposé pour la première fois d'étudier les variations rapides de température des diodes afin d'extraire des informations physiques sur les différentes composantes du chemin thermique entre la jonction et l'air ambiant. La méthode, que nous détaillons ci-dessous, permet notamment d'identifier les différentes interfaces et matériaux grâce à leurs propriétés thermiques et offre un outil puissant de caractérisation thermique des modules employant des semi-conducteurs à forte dissipation de chaleur tels que les LED.

À partir de la courbe transitoire de la température de jonction, acquise grâce à la mesure électrique, un processus mathématique complexe doit être appliqué afin de changer les données d'acquisition en informations concrètes sur les caractéristiques thermiques du module. Ce processus mathématique a été développé par Clemens *et al.* (Lasance, 2014) et rédigé sous la forme d'un standard (JEDEC51-14) afin d'être employé par l'industrie. C'est la société Mentor Graphics qui, la première, a commercialisé un banc (T3ster) permettant l'acquisition et le traitement de ces données. Ce banc représente aujourd'hui le produit de référence et est utilisé par la majorité des industriels de l'éclairage.

Comme nous venons de le voir, la méthode utilise les données de la mesure transitoire de la température de jonction. Deux modes existent pour enregistrer ces variations de T_j :

- Mode en échauffement,
- Mode en refroidissement.

Le premier s'obtient en appliquant un palier de puissance positif (figure 5). Dans ce cas, la LED subit une soudaine augmentation du courant et la courbe d'échauffement au cours du temps est enregistrée, on parle alors de « heating mode ». Ce mode présente toutefois de nombreux inconvénients à savoir : variation de la tension de la LED et donc de la puissance dissipée, variation de l'efficacité de la LED qui nécessiterait d'appliquer des corrections complexes sur les données recueillies. Ce mode n'est donc pas favorisé en pratique.

Dans le second cas, la LED est alimentée par un courant qui entraîne son échauffement. Après stabilisation de la tension, et donc de la température de jonction, l'alimentation de la LED passe rapidement du courant de chauffe au courant de mesure et les valeurs de la température de jonction sont enregistrées. Une courbe telle que celle présentée en figure 6 est ainsi obtenue. Cette courbe décrit le refroidissement de la jonction de la LED pendant les premiers instants après être passée du courant de chauffe au courant de mesure.

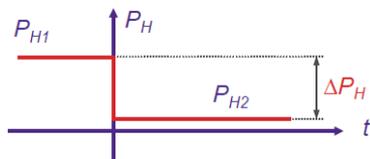


Figure 5. Palier de puissance

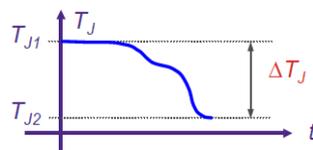


Figure 6. Courbe de refroidissement

L'impédance thermique, notée $Z_{th}(t)$, s'exprime selon l'équation suivante :

$$Z_{th}(t) = (T_{initial} - T(t))/\Delta P \quad (2)$$

où $T_{initial}$ est la température de jonction immédiatement après la coupure et $T(t)$ la valeur de la T_j en fonction du temps. ΔP est le palier de puissance thermique et est exprimé par :

$$\Delta P = (I_h \cdot V_{initial} - I_{mesure} \cdot V_{mesure}) - P_{optique} \quad (3)$$

$P_{optique}$ étant la puissance émise par la LED juste avant la coupure. I_{mesure} étant très inférieur à $I_{heating}$, nous pouvons le négliger et la relation se simplifie en :

$$\Delta P = (I_h \cdot V_{initial}) - P_{optique} \quad (4)$$

Une fois les données d'impédance thermique recueillies, il s'agit d'employer une méthode mathématique permettant de dissocier les paramètres thermiques des éléments du chemin thermique. La méthode standard est appelée NID pour : *Network Identification by Deconvolution*. Celle-ci repose sur l'analogie mathématique existant entre les modèles thermiques et les modèles électriques. Ainsi :

- Le flux de chaleur est comparé au courant ;
- La température à une tension ;
- La résistance thermique à une résistance électrique ;
- La capacité thermique à une capacité électrique ;
- L'impédance thermique à une impédance électrique.

Par ce principe d'analogie il est possible d'utiliser les modèles des circuits électriques tels que les montages RC notamment.

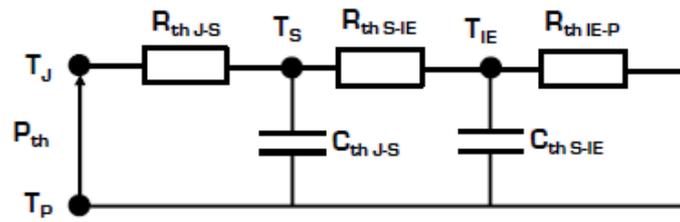


Figure 7. Modèle thermique basé sur le modèle électrique

La structure thermique peut être décrite par une succession de couples résistance thermique/capacité thermique qui forme un réseau de constante de temps RC. Ainsi, en régime stationnaire, c'est-à-dire lorsque la température ne varie pas, les capacités thermiques sont négligées et seules les résistances thermiques de chaque matériau s'additionnent pour donner la résistance thermique globale. À l'inverse, en régime transitoire, chaque élément du chemin thermique (puce, billes d'or, substrat, soudure, PCB etc.) va présenter une constante de temps thermique spécifique qui va induire une vitesse de refroidissement ou d'échauffement caractéristique. La constante de temps d'un élément du chemin thermique dépendra de la résistance thermique et de la capacité calorifique du matériau ou des interfaces entre ces matériaux. Ces vitesses de variations de température pouvant être observées par la mesure transitoire, il est alors possible de retrouver les paramètres thermiques (résistance et capacité thermique) des différents éléments du chemin thermique.

Cette méthode consiste à filtrer les données, puis analyser le spectre des différentes constantes de temps thermiques de la LED pour obtenir la fonction de structure du composant. Cette dernière se traduit par la courbe de la capacité thermique cumulée en fonction de la résistance thermique cumulée et permet

d'identifier les différents éléments du chemin thermique. L'exemple ci-dessous utilisé par Chambion (2014) pour caractériser le chemin thermique de LED de puissance permet d'identifier l'intérêt de cette méthode. Effectivement, en analysant cette courbe, il est possible de localiser et mesurer en Rth les différents constituants de la LED et de son assemblage. Nous verrons dans la que cette méthode de fonction de structure peut être utile pour localiser les points faibles du design thermique mais également comme outil de caractérisation des LED en permettant l'identification des défauts survenus lors d'un test de fiabilité.

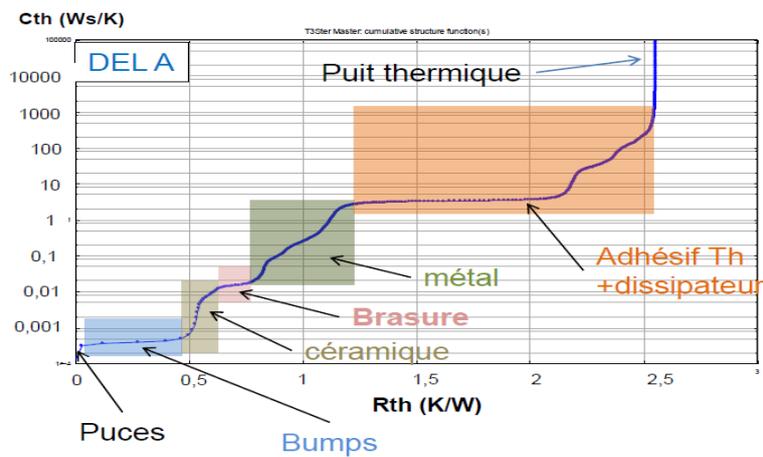


Figure 8. Capacité thermique en fonction de la résistance thermique

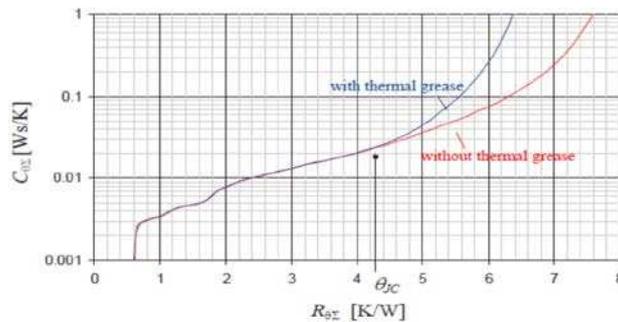


Figure 9. Illustration de la méthode TDIM : fonction de structure cumulée avec et sans graisse thermique

S'appuyant sur ces données transitoires, une méthode appelée TDIM *Transient Dual Interface Method* est définie pour évaluer la Rth d'un composant. Le principe

repose sur la comparaison des courbes de fonction de structure d'une LED assemblée sur deux PCB différents. Ainsi, les deux fonctions de structure suivent un même tracé jusqu'à la R_{th} de la LED. Au-delà, les courbes se séparent car le chemin thermique diffère d'un PCB à l'autre. Une méthode mathématique est définie pour évaluer le plus précisément possible la valeur de R_{th} à laquelle les courbes se séparent.

4. Objectifs et orientations du banc de test

Le premier objectif de ce banc était de disposer d'un moyen de test dédié à l'étude de la fiabilité des composants optoélectroniques. Ce moyen de test devait permettre l'application simultanée ou successive des principales contraintes externe sur un large nombre d'échantillons tout en contrôlant les paramètres principaux tels que la température de jonction, le flux relatif et les données colorimétriques. Disposer d'un moyen dédié permet une grande flexibilité d'action et autorise à mettre au point des techniques de vieillissement nouvelles afin d'être capable de reproduire les mécanismes de dégradation propres aux nouvelles technologies testées.

Un cahier des charges a ainsi été rédigé afin de faire réaliser le banc. Le banc a finalement été développé au sein du laboratoire LISV. Le banc offre aujourd'hui un outil précieux d'étude de la fiabilité des composants optoélectroniques.

4.1. Conception électrique et thermique

L'alimentation électrique est assurée par des drivers développés spécialement afin d'être capables de fournir des courants précis allant de quelques milliampères à 5 A pour une tension jusqu'à 30 V. Les niveaux de courant de chaque sortie sont établis à l'aide d'un jeu de résistances. Outre l'alimentation continue, l'électronique permet d'alimenter les composants sous test en PWM et est également capable d'appliquer le processus standard de mesure de la température de jonction. Deux problématiques se posent alors : la synchronisation des signaux de commande et de mesure, et l'acquisition de la mesure de T_j dans un cycle PWM (rappelons que des variations thermiques importantes apparaissent à chaque cycle PWM, il s'agissait donc d'effectuer la mesure de T_j toujours au même instant du cycle).

4.2. Conception optique

Le contrôle in-situ des données optiques est nécessaire au suivi de l'évolution des composants optoélectroniques sous test. Le contrôle in-situ permet notamment de ne pas avoir à effectuer d'arrêts périodiques des tests pour effectuer des mesures nécessitant de sortir les pièces de la chambre climatique ce qui peut s'avérer très coûteux en temps. Cela permet de plus de suivre plus finement les évolutions grâce à

l'acquisition fréquente des données. Enfin, la fusion automatique des données recueillies à l'aide d'un programme central (réalisé sous LabVIEW) offre une interface ergonomique de suivi des différents paramètres des composants testés. Ainsi, le banc permet le contrôle du flux relatif et des données colorimétriques des composants sous test. Les capteurs permettant ce type de mesure ne pouvant pas supporter les conditions extrêmes de température et d'humidité, il était évident qu'il fallait les placer hors de l'enceinte climatique. L'utilisation de fibres optiques a donc été étudiée et implémentée.

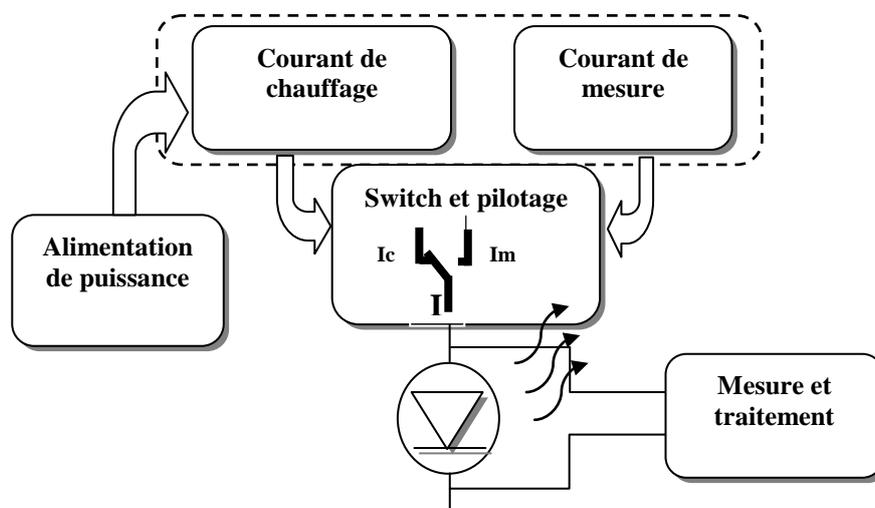


Figure 10. Schéma synoptique de la réalisation électronique

Les problématiques liées à ce type de dispositif ne sont cependant pas à négliger. Principalement, il n'est pas évident de venir placer les fibres optiques face aux LED. Des dispositifs pour lesquels une matrice de fibre vient se mettre en regard d'une matrice de LED existent. Or, ce montage bien qu'attractif n'est pas pertinent pour l'étude des LED assemblées sur les modules d'éclairage, ceux-ci n'ayant pas de forme typique définie. Ce type de montage nécessite par ailleurs l'emploi d'un PCB dédiée et ne permet pas de tester des LED de puissance qui nécessitent une bonne dissipation thermique. Afin de répondre à ces problématiques, un dispositif mécanique a été mis au point (figure 12). Celui-ci permet d'assurer la fixation d'une fibre optique en face d'une LED montée sur n'importe quel type de produit. Le maintien du module est effectué par serrage de celui-ci entre un nid à clous composé de trois pointes et la partie haute du support.

Finalement, le montage s'avère répondre parfaitement aux principales problématiques, à savoir : le maintien des fibres en face des émetteurs de produits de

différentes formes, l'externalisation des détecteurs en dehors de la zone de contrainte et la stabilité des fibres durant le fonctionnement de l'étuve.

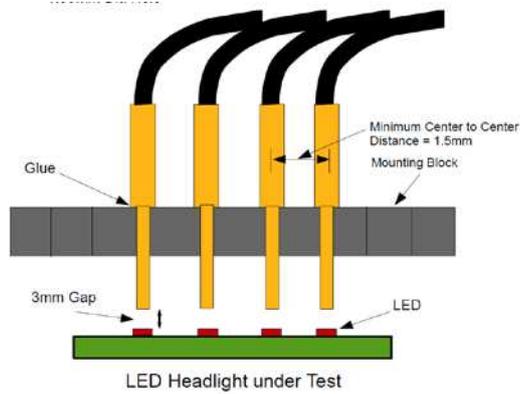


Figure 11. Dispositif à fibre optique pour banc de test existant

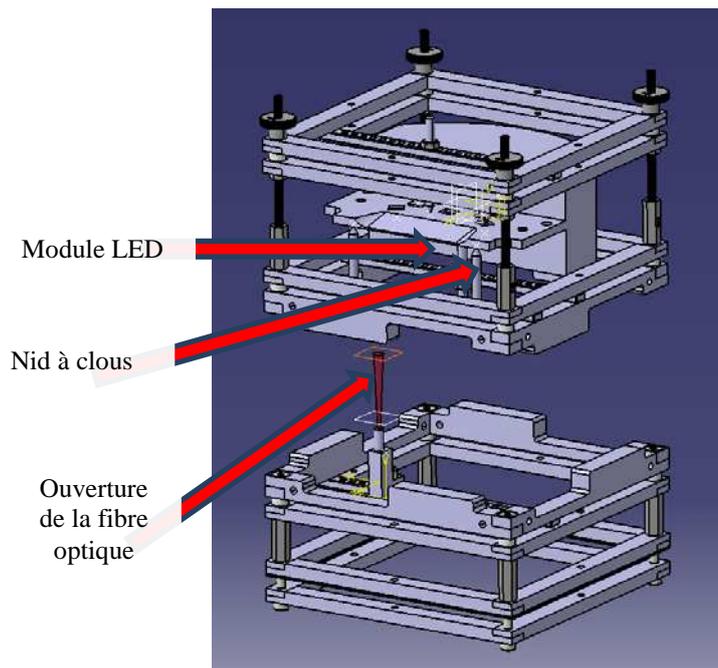


Figure 12. CAO du dispositif implémenté

5. Banc de mesure de la température de jonction

Le banc développé permet d'effectuer des mesures de température de jonction stabilisées, en temps réel, à courant constant ou en PMW. La mesure de la température de jonction est effectuée selon la méthode standard décrite précédemment. La LED est préalablement calibrée à un courant de mesure à l'aide d'une enceinte climatique afin d'obtenir ses caractéristiques de tension en fonction de la température de jonction. La LED est alimentée au courant nominal par toute source de courant au choix de l'utilisateur tandis que le banc injecte en permanence le courant de mesure de façon à faciliter la transition électrique entre le courant de chauffe et le courant de mesure. La mesure de la température de jonction s'effectue automatiquement à période définie par l'utilisateur ou bien manuellement à l'aide d'un bouton de commande de l'interface LabVIEW. Les éléments Hardware du banc sont donc les suivants : une carte électronique développée spécifiquement et remplissant les fonctions d'alimentation du courant de mesure et de transition électrique, une carte national Instrument, effectuant la mesure précise et rapide de la tension et deux alimentations, l'une pour injecter le courant dans la LED, l'autre pour alimenter le dispositif.



Figure 13. Illustration du banc de mesure de la T_j

Afin d'obtenir des résultats répétables et non bruités, la mesure de tension au courant de mesure s'effectue $400 \mu\text{s}$ après la coupure du courant de chauffe. Cette dernière est détectée numériquement par détection du front bas de la tension ce qui permet de ne pas subir de décalage pouvant survenir entre la commande et l'exécution du processus de mesure. Pendant cette durée de $400 \mu\text{s}$ la LED a pu se refroidir de façon sensible et l'application d'une correction est nécessaire afin de tenir compte de cet effet transitoire. Ainsi, avant toute mesure de température une étape préliminaire est nécessaire afin de déterminer l'offset à appliquer. Cet offset

va dépendre de deux facteurs que sont la LED elle-même et la valeur du courant auquel la mesure s'effectuera. Cette étape d'établissement de l'offset est effectuée par le programme en effectuant une mesure transitoire (chaque 8 μ s) de la tension entre 400 μ s et 2 ms après la coupure du courant de chauffe. Les valeurs obtenues forment une courbe que l'utilisateur peut interpoler selon plusieurs modèles (linéaire, polynomial ou exponentiel). Le choix du modèle d'interpolation n'affecte qu'assez peu la valeur obtenue mais permet à l'utilisateur d'appliquer les processus standards de mesure de l'offset. L'équation ainsi obtenue permet d'extrapoler les valeurs de la tension juste après la coupure et indique ainsi, en degré, le refroidissement ayant eu lieu entre la coupure du courant de chauffe et la mesure de la température de jonction. Cet offset est alors ajouté à la mesure de la température effectuée après 400 μ s. Étant donné la durée très courte (2 ms) sur laquelle est effectuée cette correction, la valeur de celle-ci ne dépend que du chemin thermique au plus proche de la jonction et permet ainsi de ne pas avoir à effectuer à nouveau cette correction si le chemin thermique au-delà de la puce de la LED est modifié. Par exemple, dans le cas où la LED est montée sur un dissipateur et que l'utilisateur souhaite changer les conditions de flux d'air, le chemin thermique est modifié. La valeur de l'offset ne dépendant pas de cette partie du chemin thermique il n'y a pas lieu de devoir la remesurer. Cela permet, pour une LED donnée, de simplement et rapidement constater l'impact d'un changement sur l'échauffement du module, comme on peut le voir sur la figure 14.

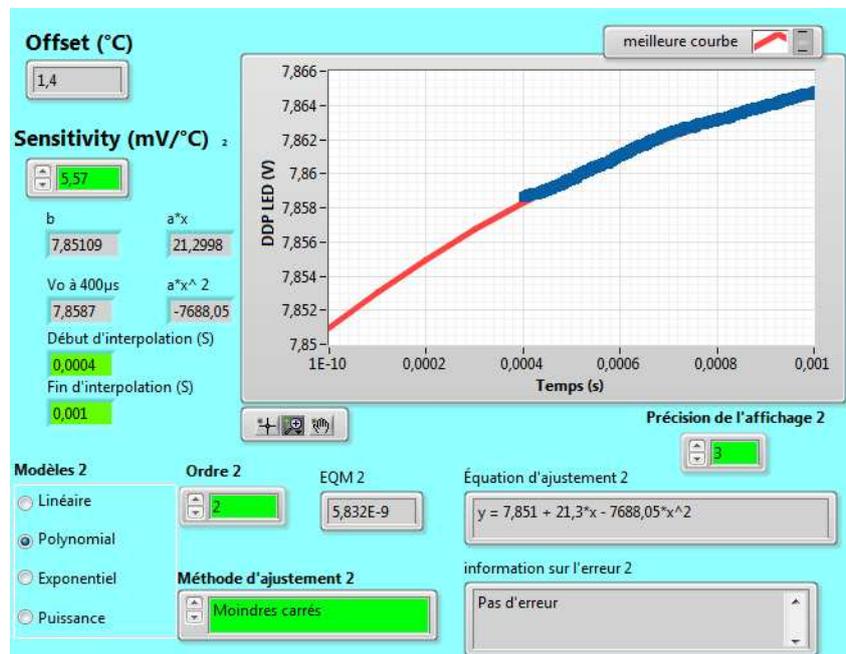


Figure 14. Interface Labview réalisant l'évaluation de l'offset

À l'inverse, l'offset va dépendre quasi linéairement du courant appliqué. S'il est possible de changer la valeur de l'offset manuellement afin de prendre en compte cette variation en la supposant proportionnelle à la variation de courant, il est préférable d'effectuer une nouvelle estimation de l'offset pour la nouvelle valeur de courant afin de tenir compte des effets non linéaires (qui sont liés à la baisse d'efficacité de la LED et de la dépendance, très faible, de la R_{th} à la température).

Le traitement numérique de l'offset sur $400 \mu s$ et non sur la durée totale de stabilisation thermique ainsi que la possibilité d'utiliser une source de courant externe au banc permettent à ce moyen de mesure d'offrir une grande simplicité d'utilisation ainsi qu'un certain nombre de fonctionnalités que ne propose par exemple pas le banc T3ster. Aussi, ce banc permet d'effectuer des mesures de température de jonction en temps réel ce qui le rend presque ludique à utiliser. Il est ainsi très rapide de constater les écarts d'échauffement induits par tous changements du chemin thermique (changement de TIM, de radiateur, orientation des ailettes etc.). Il est ainsi possible de détecter un changement du flux d'air par exemple et avoir une estimation de la T_j la plus proche possible de la réalité. Les figures 15 et 16 permettent d'illustrer cela. Sur la figure 15 nous pouvons visualiser la valeur de la T_j d'une LED assemblée avec quatre autres LED sur un même radiateur et placée dans une enceinte climatique à $125^\circ C$. Dans une première phase, seule la LED dont la T_j est mesurée est alimentée.

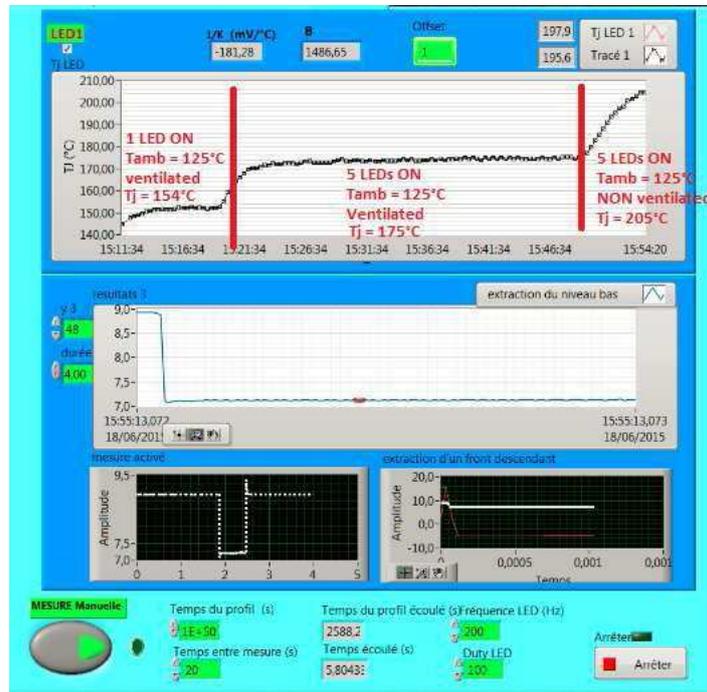


Figure 15. Interface de mesure et exemple de séquence de mesure

L'impact de la mise sous-alimentation des autres LED est directement visible et mesurable dans la seconde phase de la mesure. La troisième phase de la mesure représente l'impact thermique de l'arrêt de la ventilation de la chambre climatique. Celle-ci favorisait le refroidissement du radiateur et son absence engendre une élévation très importante de la température du module à LED. De la même façon nous pouvons visualiser sur la figure 16 l'impact d'un changement de flux d'air sur la mesure de T_j d'un module à LED.

L'autre intérêt de cette architecture réside dans la possibilité d'alimenter la LED avec n'importe quelle alimentation et notamment de constater l'impact des protocoles d'alimentation d'un driver particulier (Notamment les protocoles de derating). De par son faible encombrement et sa simplicité Hardware, ce banc est aisément déplaçable et dupliquable ce qui autorise de l'employer en association avec d'autres instruments non déplaçables (tel les sphères intégrantes).

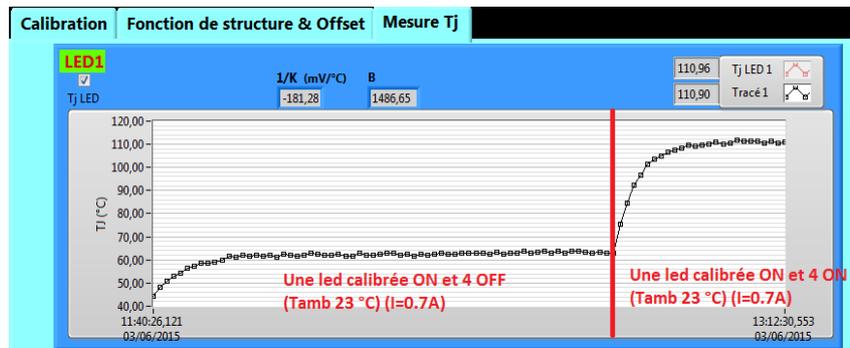


Figure 16. Interface de mesure et exemple de séquence de mesure

6. Comparaison entre banc Tj LISV & banc T3ster

La comparaison entre les deux bancs (banc Tj LISV et banc T3ster) a pour but de valider et étalonner le nouveau banc Tj LISV avec un banc commercial T3ster au qu'elle le standard JEDEC est appliqué. Le plan de comparaison entre deux instruments de mesure thermique permet de :

- Fixer un plan de test (échantillon led, condition, courant, etc),
- Fournir des mesures thermiques (température de jonction (T_j) et fonction de structure) réalisée par le Banc Tj LISV,
- Reproduire les mêmes tests avec T3ster,
- Comparer les deux résultats.

6.1. La démarche du test

Nous avons prévu une démarche pour établir les mesures thermiques mentionnées et assurer une répétabilité des conditions de mesure

- Leds à mesurer,
- Support mécanique,
- Point de mesure température référentielle,
- Calibration,
- Évaluation de l'offset,
- Mesure T_j ,
- Fonction de structure.

6.2. Echantillon LED à tester

Une LED montée sur un module (le critère du choix est la disponibilité). Tests sur deux échantillons.

- LED : Panasonic 3 chips,
- Dissipateur : Aluminium,
- Courant de mesure : 5 mA,
- Courant de pilotage (chauffe) : 700 mA,
- Température ambiante : en °C (Hors étuve).

6.3. Support mécanique

L'échantillon est posé sur un support mécanique conçu pour garder la même position, hauteur et circulation d'air entre les ailettes.

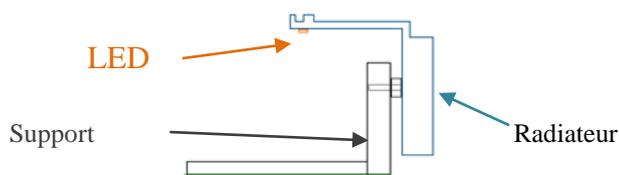
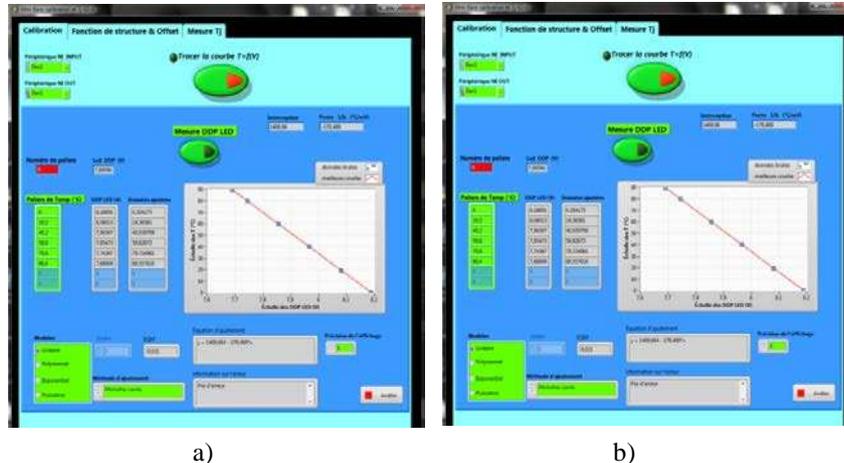


Figure 17. Support mécanique

6.4. Calibration

Le principe de calibration repose sur la connaissance de la relation entre la tension (V_f) et la température de la jonction (T_j) de la LED réalisée à un faible courant 5 mA (pas d'échauffement de la LED) (figure 18).



a)

b)

Figure 18. Calibration : a) Facteur K1 (module 1) = -5.57mV/°C ;
 b) Facteur K2 (module 2) = -5.82mV/°C

6.5. Évaluation de l'offset

Le traitement numérique de l'offset sur 400 μs et non sur la durée totale de stabilisation thermique. À un courant de 0.7A l'offset est estimé 1.2°C (pour les deux échantillons), cette valeur Toffset est prise en compte durant la mesure de Tj.

6.6. Mesure Tj

Afin d'évaluer la température de jonction (Tj), nous avons posé le module dans son support puis dans une boîte (éviter les courants d'air), alimenté les LED au courant nominal (0.7 A) pendant plus 1200 s (stable thermiquement) et mesuré la Tj chaque 30 s tel que l'on peut le voir sur les figures 19 et 20.

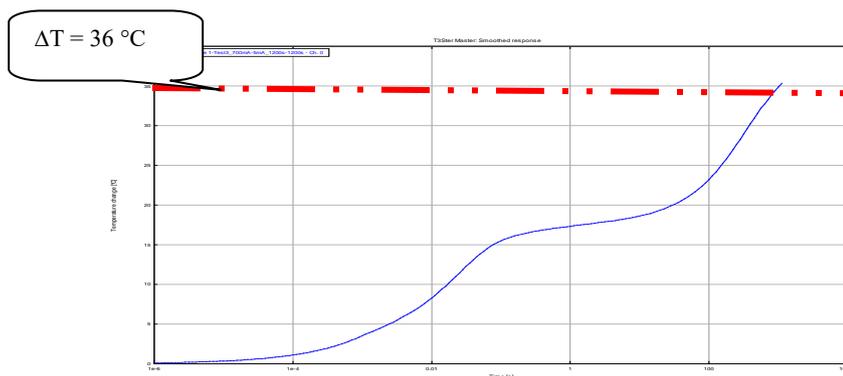


Figure 19. Échauffement module 1 (T3ster) ΔT = 36°

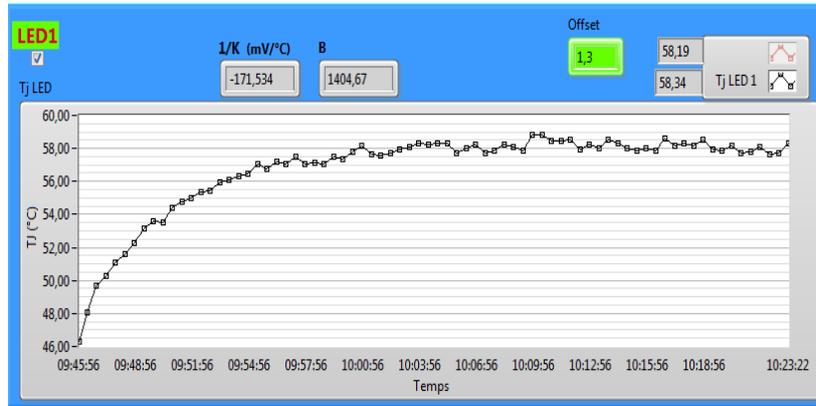


Figure 20. Mesure de la T_j (LISV) $\Delta T = 58.34^\circ\text{C}$

La mesure de la température ambiante est importante pour estimer l'échauffement (ΔT) de la LED (T3ster donne que l'échauffement) et pouvoir comparer les résultats entre les instruments de mesure.

$$\Delta T = T_j - T_{amb} \quad (5)$$

La température référentielle T_{ref} est prélevée au moment de la stabilité thermique du module (la fin du test).

$$\Delta T_{ref} = T_{ref} - T_{amb} \quad (6)$$

6.7. Point de mesure de température référentielle

Un thermocouple est collé (avec thermocolle) à l'embase (au verso) d'échantillon module LED à mesurer qui servira comme un point de mesure de températures référentielle (T_{ref}) durant la comparaison.

Nous résumons les résultats des mesures effectuées sur les deux modules avec les deux bancs (LISV et T3ster) sur le tableau 3.

ΔT est l'échauffement ($^\circ\text{C}$), le facteur de comparaison entre les mesures des deux bancs est le même (36°C) à $\pm 1^\circ\text{C}$. Les mesures obtenues durant les tests de comparaison entre les deux bancs affirment à $\pm 1^\circ\text{C}$ d'incertitude que les résultats des deux bancs sont similaires.

Tableau 3. Résumé des résultats des mesures effectuées sur les deux modules avec les deux bancs

		Tamb (°C)	Tref (°C)	K (mV/°C)	ΔT (°C)	Tj (°C)	ΔT ref (°C)	Rth (°C/W)
Banc LISV	Module 1	22	42,4	-5,57	36,30	58,30	20,4	3,2
	Module 2	22	43,0	-5,82	36,20	58,20	21,0	3,3
Banc T3ster	Module 1	25	45,0	-5,75	36,00	61,00	20,0	3
	Module 2	27	47,3	-5,82	35,30	62,30	20,3	3

7. Résultats

7.1. La mesure de la température de jonction

Le nouveau protocole de communication LIFI (*Light Fidelity*) exige une alimentation des LED en pulsé (PWM). Ce type d'alimentation implique une nouvelle forme de contrainte dans les risques entraînent l'arrêt de fonctionnement des LED.

Parmi toutes les applications possibles du banc de test, celle qui consiste à déterminer, dans le cas de nouveaux profils d'émission, la température de jonction, qui permettra ainsi de requalifier la LED.

Le banc de test permet de tester plus de dix LED différentes en même temps. La figure 21 montre l'écart de température entre deux LED drivées en continu et deux LED en PWM. Les quatre LED ont le même courant moyen. Ces résultats montrent en temps réel que les LED à PWM possèdent une température plus élevée que celles qui sont en continues. Ce résultat à des conséquences directes sur la qualification des LED (le flux, la couleur, l'efficacité et la durée de vie).

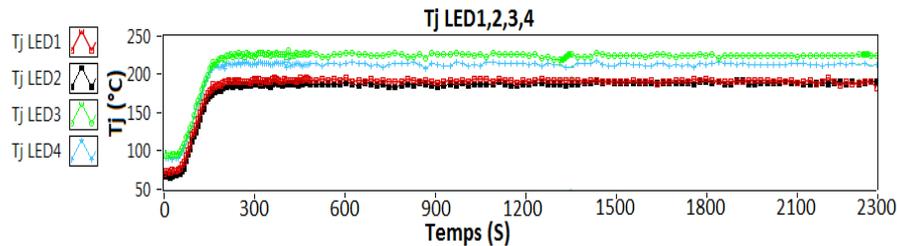


Figure 21. Température de jonction de quatre LED : LED 1 et 2 alimentée avec un courant continu, LED 3 et 4 en PWM. Les quatre LED ont le même courant moyen

7.2. La fonction de structure et le chemin thermique

Réduire la résistance thermique dans la LED assemblée nécessite l'évaluation et la sélection de l'interface thermique intermédiaire des couches de matériaux (TIM), qui sont disponibles dans une très grande variété de types et de formes. Diminuer la résistance thermique globale peut être améliorée par la réduction des pertes à travers les différentes interfaces entre les différents composants dans un assemblage du produit final.

La figure 22 montre un exemple d'un cas pratique pour optimiser l'assemblage d'un module LED et choisir l'interface thermique (TIM) (tableau 4) la plus adaptée afin de réduire la résistance thermique de l'ensemble des couches qui constituent le module. Le vieillissement des modules LED est manifesté dans les changements de conductivité thermique. Ces changements peuvent ainsi être mesurés par les fonctions de structure.

L'analyse de défaillance permet de détecter les couches endommagées (figure 23) après vieillissement. La figure 23 montre le même chemin thermique d'une LED avant et après un test de surchauffe. L'analyse de cette fonction de structure nous montre que la déficience est localisée au niveau de la soudure entre la puce et le PCB (die attach).

Tableau 4. Interfaces thermiques intermédiaires entre PCB-Dissipateur (TIM) utilisé pour réaliser le test

TIM	Référence RadioSpares (RS)
Graphite	712-3986
Pâte thermique	301-2826
Colle thermique	725-9971
écran thermique	XXX-XXXX

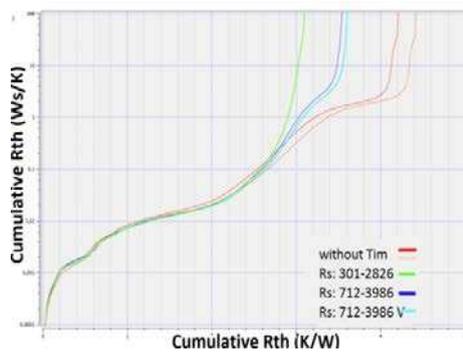


Figure 22. Chemin thermique d'un module LED avec 5 interfaces thermiques différentes

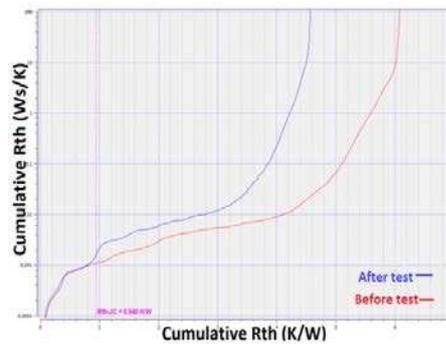


Figure 23. Chemin thermique d'un module LED avant et après un test de surchauffe de 200 heures

8. Conclusion

La technologie LED est en constante évolution, chaque fournisseur a ses propres technologies, matériaux et procédés. Dans la plupart des cas, la durée d'émission de la LED est atteinte au cours de la phase de qualification. À l'inverse, les défaillances soudaines se produisent encore de temps à autre et ne sont pas détectés pendant la qualification, en particulier si les facteurs successifs se réunissent pour produire l'échec. Une procédure de caractérisation fine permet d'élargir le spectre de la détection des défaillances potentielles.

Nous l'avons vu, l'intérêt d'un banc de test dédié réside notamment dans la capacité à mettre rapidement en place des tests expérimentaux. Aussi, nous avons vu quelques résultats des tests qui ont été menés. En effet, l'alimentation PWM, le monitoring du flux en temps réel, le suivi de la température de jonction sont autant de fonctionnalités qu'une simple enceinte climatique ne permet pas et apportent un grand nombre d'informations sur la fiabilité des LED sous test. Il faut également noter que la mission initiale du banc qui était de suivre la dégradation progressive du flux lumineux a été limitée dans la mesure où nous avons constaté que ce mode de défaillances ne représente pas un enjeu majeur de la fiabilité des LED. À l'inverse, cette question reste d'actualité pour les composants Laser et OLED et les caractéristiques du banc permettent d'étudier ces comportements. Par ailleurs, l'emploi du banc de test pour des protocoles de tests de vieillissement accéléré ou des combinaisons innovantes de facteurs de stress s'avère utile pour les LED dont la robustesse peut être mise en cause. Associé à un ensemble de moyens et de techniques de caractérisation des composants optoélectroniques (traceur de courbe, banc de caractérisation du chemin thermique etc.) le banc de test fait partie d'une plateforme intéressante d'étude du comportement de ces composants pour les conditions les plus sévères. Enfin, sa construction logicielle basée sur LabVIEW permet d'envisager toute évolution qui s'avèrerait nécessaire à l'étude d'une nouvelle source lumineuse, à la réalisation d'une nouvelle manipulation ou à une plus grande automatisation des séquences de test.

Bibliographie

- Chambion B., Mendizabal L., Bechou L., Carreau V., Deshayes Y., Gasse A. (2012). Eclairage Automobile. Les conséquences de l'intégration de DEL blanches de puissance sur la stratégie des tests de fiabilité. *Journée IMAPS*.
- Chang M. H., Das D., Pecht M. (2011). Junction Temperature Characterization of High Power Light Emitting Diodes. *Proc., IMAPS Mid-Atlantic Microelectronics Conference*, p. 23-24.
- Chhajed S., Xi Y., Gessmann T., Xi J-Q., Shah J. M., Kim J. K., Schubert E. F. (2005) Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods. *Proc. SPIE 5739, Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications IX*, 16.

- JEDEC Solid State Technology Association. (2010). Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction to case of semiconductor devices with heat flow through a single path. *JEDEC Standard*.
- Lasance C. J., Poppe A. (Eds) (2014). *Thermal management for LED applications*. Springer.
- Székely V., Van Bien T. (1988). Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method. *Solid-State Electronics*, vol. 31, n° 9, p. 1363-1368.
- Székely V. (1991). On the representation of infinite-length distributed RC one-ports. *Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 38, n° 7, p. 711-719.