Etude de la fiabilité de modules à base de LEDs blanches pour applications automobile

Bertrand Chambion

▶ **To cite this version:**

Bertrand Chambion. Etude de la fiabilité de modules à base de LEDs blanches pour applications automobile. Physique [physics]. Université de Bordeaux, 2014. Français. NNT : 2014BORD0163 . tel-01148774

HAL Id: tel-01148774

https://theses.hal.science/tel-01148774

Submitted on 5 May 2015

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.

université de BORDEAUX

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES DE L'INGENIEUR

SPÉCIALITÉ : Electronique

Par Bertrand CHAMBION

Etude de la fiabilité de modules de puissance à base de LEDs blanches pour des applications en environnement automobile

---

Sous la direction de M. Laurent BECHOU

Soutenue le Jeudi 25 Septembre 2014 à 14h00, GRENOBLE.

Membres du jury :

M. LANDESMAN, Jean-Pierre	Professeur, IPR Rennes	Président
M. SALVESTRINI, Jean-Paul	Professeur, SUPELEC-Université de Lorraine	Rapporteur
M. CAMPS, Thierry	Professeur, LAAS CNRS-Université de Toulouse III	Rapporteur
M. BECHOU, Laurent	Professeur, Université de Bordeaux	Examinateur
M. DESHAYES, Yannick	Maître de conférences, Université de Bordeaux	Examinateur
M. MENDIZABAL, Laurent	Docteur, Chef de projet CEA-LETI, Grenoble	Examinateur
M. GASSE, Adrien	Docteur, Chef de projet CEA-LETI, Grenoble	Examinateur
M. CARREAU, Vincent	Docteur, Référent fiabilité composants, Renault, Guyancourt	Examinateur
M. ZOJCESKI, Zdravko	Docteur, Référent électronique éclairage, Valeo, Bobigny	Invité

Titre : Etude de la fiabilité de modules de puissance à base de LEDs blanches pour des applications en environnement automobile

Résumé : Les composants dédiés et actuellement disponibles pour le marché automobile présentent une grande diversité technologique tant au niveau puce que stratégie de packaging ou encore architecture module (mono-puce ou multi-puce) pour des performances équivalentes. Cette étude s'est attachée à développer une méthodologie d'évaluation de la fiabilité de deux filières technologiques particulières de modules de LEDs multi-puce : l'une intègre une technologie verticale (VTF pour *Vertical Thin Film*) tandis que la seconde est focalisée sur une structure par puce montée-retournée (TFFC pour *Thin Film Flip Chip*). La méthodologie s'articule autour de trois principaux axes:

- La connaissance des structures et le développement de modèles électro-optiques et thermiques multi-puce permettant d'extraire les paramètres clés à suivre au travers d'un panel varié de techniques d'analyse physique et non-destructives incluant les aspects électriques, optiques, thermiques….
- Une analyse comportementale de robustesse par paliers afin de dégager les marges opérationnelles de fonctionnement ainsi que les modes et les signatures caractéristiques de défaillance.
- Une étude de fiabilité conduite à partir de différents régimes de contraintes accélérées pour estimer les durées de vie moyennes de ces nouveaux composants en environnement automobile et l'impact au niveau système.

Les résultats mettent en évidence une durée de vie très dépendante de la filière technologique (facteur 6 entre les deux filières étudiées). Les analyses de défaillance ont permis d'identifier précisément les comportements de ces nouvelles sources d'éclairage pour dégager des indicateurs précoces de défaillance. Enfin, des préconisations ont été extraites afin de fiabiliser les futurs projecteurs à sources LEDs de puissance pour les applications en automobile.

Mots clés : LED blanche, optique, automobile, puissance, multi-puce, packaging, robustesse, fiabilité, dérive paramétrique, modélisation, défaillance, durée de vie.

Title : Reliability investigation of high power white LEDs multichip modules for automotive applications

Abstract : With rapid development of Lighting Emitting Diode (LED) market, LED performances are now suitable for automotive high beam / low beam lighting applications. Due to the need of Ultra High Brightness (UHB-LEDs), LEDs are packaged on high thermal conductivity materials to obtain multichip module (4 chips in series), which deliver up to 1000 lumens at 1A. Currently, several LED technologies are commercially offered for the same performances, and different packaging strategies have been implemented in terms of chip configuration, bonding, down conversion phosphor layer and mechanical protection to optimize performances. This study addresses a dedicated methodology for reliability analysis, applied on two LED chip packaging technologies: On the one hand, a Vertical Thin Film (VTF) technology; on the other hand a Thin Film Flip Chip (TFFC). Our methodology is based on 3 main items:

- Packaging technology structure, materials analysis and electro-optical and thermal multichip models for both technologies to understand and extract the key parameters to monitor during ageing tests.
- Robustness assessment tests to define operating margins, adjust accelerated life-testing conditions, and identify failures signatures.
- Reliability study through a 6 000 hours High Temperature Operating Life (HTOL) accelerated tests, to predict the Mean Time To Failure (MTTF) of these new light source technologies regarding the automotive mission profile. Linked to failure analysis, convincing failure mechanisms are proposed.

Based on these results, parametric variations are compared to failure analysis results to propose failure mechanisms. The HTOL tests reveal that both LED technologies have their specific reliability behavior and failure modes: catastrophic failure and gradual failure. Predictive lifetime estimations (L70B50) of these multichip modules give a factor 6 between both technologies.

Beyond these reliability results, the multichip architecture brings new issues for Solid State Lighting (SSL) sources in automotive, as well as partial failure or unbalanced behavior after stress. These new issues are discussed through the behavior modeling of a 10 LED modules batch for both failure modes. Modeling results demonstrate that the predictive lifetime of a LED multichip architecture is directly related with the LED technology failure mode.

Keywords : White LED, optics, automotive, power, multichip, packaging, robustness, reliability, parametric variation, modeling, failure, lifetime

Unité de recherche

IMS, UMR CNRS 5218, 351 Cours de la Libération F-33405 TALENCE CEDEX

Remerciements

Commençons ce manuscrit par les nombreux remerciements que ce sujet et ces trois années de travail semblent mériter. Les trois années passées au cœur de cette collaboration CIFRE tripartite entre le Laboratoire de l'Intégration des Matériaux au Système (IMS) de l'Université de Bordeaux, le laboratoire de Packaging et Assemblage (LPA) du CEA-LETI à Grenoble et le partenaire industriel Renault, à Guyancourt, m'ont permis d'engager de très nombreuses discussions enrichissantes autour de cette nouvelle technologie d'éclairage pour l'automobile, les LEDs. Je remercie tout d'abord les membres du jury qui m'ont fait l'honneur et le plaisir de juger mon travail. Merci aux rapporteurs, messieurs Jean-Paul SALVESTRINI et Thierry CAMPS, qui ont parcouru et analysé avec attention mon manuscrit : un merci tout particulier pour leurs rapports élogieux. Je remercie également les membres du jury, monsieur le président Jean-Pierre LANDESMAN, et monsieur Zdravko ZOJCESKI référent électronique éclairage chez Valeo pour leur intérêt dans mon travail et les discussions enrichissantes que nous avons eues.

Une collaboration tripartite, ce n'est pas toujours facile à gérer, c'est pourquoi je tiens à remercier toute l'équipe encadrante pour le travail à distance et leurs engagements respectifs lors des points d'avancement à Grenoble, Paris, ou Bordeaux !

J'aimerais commencer par le laboratoire IMS. Merci à toute l'équipe «Evaluation des Dispositifs Micro et Nano-Assemblés» (EDMiNA) malgré mon temps passé à Bordeaux très limité sur ces trois années. Je remercie tout particulièrement mon directeur de thèse, monsieur Laurent BECHOU, pour ses conseils dans l'orientation des travaux et la clarté de ses commentaires et corrections lors de la relecture du manuscrit. Merci également à messieurs Yannick DESHAYES et Yves OUSTEN pour m'avoir aidé à extraire les travaux pertinents de la littérature.

Dans le cheminement, je remercie toutes les personnes de chez Renault qui ont participé de près ou de loin à l'avancée de mes travaux de thèse. Merci à messieurs Christophe QUINTARD, Michel MAHE, François BEDU, Marie-Pierre ROUSSE, Pascal DUMONTET, Patrick DESRUMEAUX, Christophe LAVERGNE, Davy NOREZ, Sylvain HENRY, Nicolas PISSELOUP, et Raymond CLERC pour les nombreuses discussions et manipulations permettant de cerner précisément le sujet afin d'intégrer au maximum les problématiques automobile dans la démarche de thèse. Je tiens à remercier particulièrement l'Unité Elémentaire de Travail (UET) Ingénierie Hardware du Service Sécurité Fonctionnelle et Fiabilité Système à laquelle j'ai été rattaché durant ces trois années. Je remercie tout particulièrement monsieur Olivier BOIVINEAU, chef de l'UET ainsi que monsieur Christophe MAADED, souvent mis à contribution pour les questions sur les LEDs. Je termine par un grand merci à monsieur Vincent CARREAU, mon encadrant industriel, pour m'avoir intégré à l'équipe, m'avoir expliqué calmement les 1001 acronymes Renault mais surtout pour avoir piloté habilement la thèse pour sa composante automobile en restant toujours disponible pour répondre efficacement à mes questions.

C'est au laboratoire LPA du CEA-LETI Grenoble, mon laboratoire d'accueil, au sein duquel j'ai passé la majeure partie de mon temps. Laboratoire très dynamique et pluridisciplinaire, ce serait bien trop long de remercier individuellement toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail... J'ai en tout cas énormément appris sur le packaging de composants au sens large et surtout qu'il représente un point essentiel pour la fiabilisation des architectures. Un grand merci à toute l'équipe du LPA ! Je tiens à remercier particulièrement mes encadrants CEA, messieurs Adrien GASSE et

Laurent MENDIZABAL avec qui les trois années passées ont été un réel plaisir. C'est eux qui étaient en première ligne pour le travail au quotidien, montage des essais, points d'avancement… Un immense merci à monsieur Jean-Charles CIGNA (Charly ☺) pour avoir gentiment accepté de relire mon manuscrit le soir, au coin du feu, sur le plateau du Vercors. Je remercie également monsieur Benoit HAMON pour les échanges sur les problématiques de fiabilité des LEDs, où « tout était à faire au labo » et les membres du Laboratoire des Composants pour l'Eclairage (LCE) pour toutes les discussions et le partage de certains équipements. Je profite de ces pages pour remercier messieurs Raymond BOCH et Bernard ANDRE, chefs du Service Technologies et Moyens ainsi que messieurs Hervé RIBOT et David HENRY, chefs successifs du LPA sans oublier Véro, notre deuxième maman au laboratoire !

Me voici arrivé dans les remerciements hors de la sphère professionnelle. Merci pour les parties de bad, basket, sorties vélo et autres crapahutages à la Bastille, les concernés se reconnaitrons. Je tiens à remercier particulièrement… mon trombone, ainsi que le quintette MAGYC, l'ensemble E=MCu, le Big Band de Fontaine et les autres activités musicales qui m'ont beaucoup aidé à faire des coupures lors de la phase de rédaction. Je remercie également tous les copains qui sont venus de loin pour voir ma soutenance, ça fait plaisir !

Force est de constater que je ne peux finir sans remercier ma famille. Merci à parents, Blandine et Gérard CHAMBION, pour m'avoir soutenu, corrigé mon manuscrit, géré la logistique du pot… Vous m'avez toujours fait confiance dans mes projets et je vous en suis très reconnaissant. Maintenant que le fiston est Docteur, vous pouvez être très fier de vous, je vous dois beaucoup ! Merci également à Patricia et Denis PRICAZ, pour avoir été présent à la soutenance et gérer le pot d'une main de maître.

Enfin, un profond remerciement à ma chère et tendre, Floriane, pour avoir traversé cette très belle année 2014 à trois avec Alice, notre fille. Quant à toi, Alice, merci pour ton calme (relatif) autour du clavier de papa lorsque je devais rédiger à la maison. On se fera une joie de te raconter cela quand tu seras plus grande…

A tous, merci !

Sommaire

Introduction Générale ……..-10-

Chapitre I : Etat de l'art des LEDs blanches de puissances pour l'éclairage automobile

1 Introduction..... - 15 -

2 Contexte économique et enjeux sociaux ..... - 16 -

2.1 Le marché global des LEDs.....- 16 -

2.2 L'éclairage pour l'Automobile.....- 17 -

2.3 Contraintes normatives des sources d'éclairage solides en automobile.....- 22 -

3 L'état de l'art technologique multi-niveaux des LEDs de puissance : de la zone active à l'assemblage sur carte ..... - 23 -

3.1 Principe d'élaboration d'une puce.....- 24 -

3.2 Différents types de boîtiers.....- 31 -

3.3 Techniques de montage des puces sur embase.....- 35 -

3.4 Les circuits imprimés et leurs performances.....- 40 -

4 Modes de défaillance des LEDs blanches et mécanismes associés ..... - 45 -

4.1 Mécanismes de défaillance et facteur d'aggravation des LEDs de puissance.....- 45 -

4.2 Mécanismes de défaillance et facteur d'aggravation des assemblages à LEDs de puissance - 47 -

4.3 Synthèse des mécanismes de défaillance de LEDs.....- 52 -

5 Positionnement et objectifs du travail de thèse..... - 53 -

5.1 Positionnement du travail de thèse.....- 53 -

5.2 Objectifs du travail de thèse.....- 54 -

6 Conclusion..... - 56 -

7 Bibliographie..... - 57 -

Chapitre II : Présentation des composants étudiés, et outils et méthodes d'analyses mises en œuvre

1 Introduction ..... - 63 -

1.1 Choix des composants étudiés ..... - 63 -

1.2 Analyse de construction des composants retenus ..... - 64 -

2 Caractérisations déployées et principe des mesures physiques ..... - 70 -

2.1 Caractérisations physico chimiques ..... - 71 -

2.2 Mesures des paramètres électriques d'un module à LEDs ..... - 73 -

2.3 Mesures des paramètres optiques d'un module à LEDs ..... - 85 -

2.4 Mesures des paramètres thermiques d'un module à LEDs ..... - 92 -

2.5 Etude paramétrique en vue de l'analyse de défaillance ..... - 107 -

3 Bilan des caractéristiques physiques et fonctionnelles ..... - 108 -

3.1 Caractéristiques physiques ..... - 108 -

3.2 Caractéristiques fonctionnelles ..... - 110 -

4 Présentation du banc de test développé et contraintes associées ..... - 110 -

4.1 Cahier des charges ..... - 111 -

4.2 Conception de la plage d'accueil des composants ..... - 111 -

4.3 Conception de la connexion électrique 4 fils ..... - 112 -

4.4 Conception optique et simulations ..... - 112 -

4.5 Caractéristiques du banc de test final et métrologie ..... - 113 -

5 Définition des lots représentatifs et caractérisations initiales ..... - 115 -

5.1 Mise en place des lots représentatifs ..... - 115 -

5.2 Mesures avant vieillissement ..... - 117 -

6 Conclusion ..... - 117 -

7 Bibliographie ..... - 119 -

Chapitre III : Méthodologie d'analyse de la robustesse de modules à LEDs multi-puce et résultats

1 Introduction ..... - 123 -

2 Descriptif de la méthodologie ..... - 123 -

3 Spécifications des paramètres électro-optiques des LEDs étudiées ..... - 124 -

4 Test de robustesse en courant ..... - 125 -

4.1 Conditions de test ..... - 125 -

4.2 Résultats obtenus pour les modules TFFC ..... - 126 -

4.3 Résultats obtenus pour les modules VTF ..... - 135 -

4.4 Bilan du test en courant ..... - 143 -

5 Test de robustesse en température ..... - 144 -

5.1 Conditions de test ..... - 144 -

5.2 Résultats obtenus pour les modules TFFC ..... - 145 -

5.3 Résultats obtenus pour les modules VTF ..... - 155 -

5.4 Bilan du test en température ..... - 165 -

6 Bilan de l'étude de robustesse ..... - 166 -

6.1 Test en courant ..... - 166 -

6.2 Test en température ..... - 168 -

7 Préparation de l'étude de fiabilité ..... - 169 -

8 Conclusion ..... - 170 -

9 Bibliographie ..... - 172 -

Chapitre IV : Méthodologie d'analyse et résultats de la fiabilité de modules à LEDs multi-puce

1 Introduction ..... - 178 -

2 Rappels de fiabilité ..... - 178 -

2.1 Généralités ..... - 178 -

2.2 Définition mathématique de la fiabilité ..... - 179 -

2.3 Evolution du taux de défaillance ..... - 180 -

2.4 Principales lois de fiabilité ..... - 180 -

2.5 Fiabilité d'un système ..... - 182 -

3 Méthodologie appliquée et définition des tests ..... - 183 -

3.1 Méthodologie appliquée ..... - 183 -

3.2 Définition des tests de fiabilité ..... - 185 -

3.3 Conception du banc de vieillissement ..... - 185 -

3.4 Suivi des LEDs témoins ..... - 186 -

4 Résultats pour les modules VTF ..... - 187 -

4.1 Evolutions paramétriques ..... - 187 -

4.2 Analyse de défaillance ..... - 196 -

4.3 Extraction de paramètres ..... - 203 -

5 Résultats pour les modules TFFC ..... - 208 -

5.1 Evolutions paramétriques ..... - 208 -

5.2 Analyses de défaillance ..... - 214 -

5.3 Extraction de paramètres ..... - 223 -

6 Synthèse et comparaison des technologies en vieillissement ..... - 227 -

6.1 Dérives paramétriques ..... - 228 -

6.2 Analyses de défaillance ..... - 229 -

6.3 Comportement en vieillissement (fiabilité module) ..... - 229 -

6.4 Durée de vie des modules en environnement automobile ..... - 232 -

7 Indicateurs précoces de défaillance ..... - 234 -

7.1 Technologie VTF ..... - 234 -

7.2 Technologie TFFC ..... - 236 -

7.3 Bilan.....- 237 -

8 Conclusion ..... - 238 -

9 Bibliographie ..... - 240 -

Conclusion Générale.....-243-

Production scientifique.....-248-

Annexes.....-249-

Introduction générale

Dans les années 1990, la mise au point de la première Diode Electroluminescente bleue (LED pour *Light Emitting Diode*) a ouvert le développement de la technologie d'éclairage à source à base d'InGaN. L'optimisation des LEDs bleues a rapidement contribué à la naissance des LEDs blanches, par couplage d'une LED bleue et d'un luminophore jaune. L'évolution technologique de ces composants optoélectroniques, plus particulièrement pour des applications liées à l'éclairage, nécessite de conjuguer l'augmentation de la puissance optique à une grande compacité, avec un niveau de fiabilité de plus en plus élevé, tout en réduisant les coûts de fabrication.

Les différentes étapes de fabrication de ces composants doivent satisfaire à plusieurs critères : maitrise du procédé de fabrication des couches actives par épitaxie, optimisation des procédés d'assemblage à partir de matériaux performants en terme de dissipation thermique et permettre la conception d'un dispositif capable d'assurer un couplage optique optimisé vers l'extérieur tout en protégeant efficacement la puce émettrice des agressions extérieures (rayonnement, humidité, température, vibration…). Les techniques de report de puces, de connexions sur boîtier et d'encapsulation ont fait l'objet d'études variées décrites par de nombreux auteurs.

Les performances électro-optiques et thermiques des LEDs blanches actuelles permettent d'adresser de multiples applications d'éclairage de puissance et notamment pour le domaine automobile. Dans ce contexte, la problématique spécifique d'intégration de sources lumineuses à LEDs en projecteur automobile requiert la prise en compte de plusieurs points-clés :

- Puissance optique réglementaire en sortie de projecteur.
- Stratégie de pilotage : courant et tension d'alimentation.
- Conception optique intégrant réflecteur et/ou lentille.
- Conception mécanique nécessitant une grande compacité des sources lumineuses.
- Conception thermique se basant sur un refroidissement actif ou passif.
- Profil de mission environnemental sévère (température, humidité, cycles thermiques…).
- Durée de vie des sources supérieure à 1000 h.

Dans ce contexte, une des solutions proposées par les fabricants de sources à LEDs consiste en l'assemblage de 2 à 5 puces reportées en série, alignées géométriquement, dans un même boîtier. Une telle architecture permet de délivrer un flux optique supérieur à 1000 lumens à 1 A avec une densité d'intégration accrue. L'apparition de ces nouvelles architectures de sources lumineuses dédiées au marché automobile impose d'évaluer le plus finement possible leurs comportements électro-optiques et thermiques dans le temps. En effet, la configuration dite multi-puce ajoute une dimension supplémentaire par rapport à celle dite mono-puce :

- La concentration de puissance entraine de plus fortes amplitudes thermiques et impose une conception thermique et thermomécanique optimisée.
- La juxtaposition et l'alignement géométrique des puces entrainent une gestion thermique spécifique à chaque puce.
- Le déséquilibre des paramètres électro-optiques et thermiques entre puces est susceptible d'impacter le fonctionnement du module et sa fiabilité.

- Les modes de défaillance des LEDs blanches sont de deux types : La dérive graduelle jusqu'à un seuil donné ou la chute brutale de la puissance optique. En fonction du mode de défaillance, les conséquences seront radicalement différentes à l'échelle du module multi-puce.

Le développement de ces nouvelles sources multi-puce pour l'éclairage l'automobile exige donc des procédures de tests et de qualification adaptées. Pour les composants discrets, le standard de qualification actuellement requis en automobile se base sur la norme AEC-Q101. Ce document initialement construit pour les composants silicium a été adapté pour les LEDs. Cependant, les tests définis pour les LEDs soulèvent de nombreuses interrogations quant à leur pertinence pour un profil de mission en projecteur automobile.

Le travail, mené dans le cadre de cette thèse, s'attache donc à évaluer la fiabilité de ces nouvelles architectures de module à LEDs dédiées aux applications en environnement automobile. Deux filières technologiques ont été identifiées et approvisionnés afin de caractériser leurs comportements dans le temps en fonction de différentes sollicitations environnementales. En s'appuyant d'une part, sur les caractérisations électro-optiques et thermiques mesurées *in-situ* et d'autre part, sur les modèles développés à partir de ceux mis en place pour les composants mono-puce, des modèles électriques et thermiques équivalents multi-puce seront proposés pour détecter et analyser les dérives paramétriques enregistrées en vieillissement. Les analyses de défaillance, non destructives et destructives, apporteront des éléments pertinents pour valider les modèles multi-puce proposés.

Cette étude est réalisée en visant un double objectif :

- La compréhension des modèles électro-optiques et thermiques mono-puce et le transfert à deux technologies LEDs multi-puce différentes mais concurrentes.
- L'étude de fiabilité exhaustive à travers les caractérisations électro-optiques et thermiques des modules, l'analyse des dérives paramétriques lors de vieillissements accélérés et les analyses de défaillance permettant de proposer des mécanismes de défaillance par analyses croisées.

Ces travaux de thèse se sont déroulés à travers une collaboration CIFRE tripartite entre le Laboratoire de l'Intégration des Matériaux au Système (IMS) de l'Université de Bordeaux, le Laboratoire de Packaging et Assemblage (LPA) du CEA Grenoble et le Centre de Recherche de la société RENAULT, fabricant d'automobiles. La méthodologie développée dans ce manuscrit s'articulera autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre introduira ces travaux par un état de l'art exhaustif des LEDs blanches de puissance pour les applications automobile. Il a pour but de présenter la globalité de la technologie LED, du principe de fonctionnement du semi-conducteur à l'intégration en projecteur automobile en passant par les technologies de puce, l'assemblage, et mise en boitier. Il permettra de positionner précisément le travail de thèse en considérant trois principaux axes : Le contexte normatif automobile et ses limites, l'apparition de nouveaux composants multi-puce et la multiplicité des technologies LEDs blanches disponibles et concurrentes.

Le deuxième chapitre décrira l'ensemble des outils et moyens mis en œuvre dans cette thèse pour la caractérisation et le suivi des paramètres électro-optiques et thermiques des LEDs multi-puce. Tout d'abord, le choix des deux technologies retenues sera justifié et les modèles équivalents électriques et thermiques seront présentés. Ensuite, le banc de test, spécifiquement développé pour

l'étude, sera détaillé et la métrologie des mesures implémentées sur ce banc seront présentées. Enfin, la dispersion statistique des paramètres électro-optiques et thermiques avant vieillissement des composants approvisionnés sera estimée afin de créer des lots représentatifs pour les vieillissements.

La méthodologie permettant d'identifier les forces et faiblesses des deux technologies identifiées sera présentée dans **le troisième chapitre** sur la base d'une étude de robustesse face à deux sollicitations sous contraintes échelonnées : la température et le courant. S'inscrivant dans la méthodologie globale, son but initial consistera à définir les marges opérationnelles de fonctionnement des deux technologies. Ces marges permettront d'ajuster les niveaux de contraintes en vieillissement accéléré afin d'éviter l'apparition de mécanismes de dégradation non représentatifs d'un profil de mission automobile.

Enfin, **le quatrième et dernier chapitre** présentera les résultats de l'étude de fiabilité à travers trois conditions de vieillissement en température. Les résultats sont présentés selon trois axes : les dérives paramétriques sur plusieurs milliers d'heures de fonctionnement sous conditions accélérées, les analyses de défaillance et l'extraction des paramètres usuels de fiabilité. Les comportements seront ensuite analysés et comparés pour les deux technologies étudiées à l'échelle du module. Enfin, les analyses croisées entre les dérives paramétriques et les mesures initiales aboutiront à la définition d'indicateurs précoces de défaillance qui pourront être mis à profit pour une sélection efficace des composants en fonction du profil de mission.

Les différentes phases présentées dans ce manuscrit doivent constituer une méthodologie globale d'analyse comportementale de LEDs multi-puce et permettront de conclure sur la durée de vie des modules étudiés dans une utilisation en environnement automobile.

Chapitre I : Etat de l'art des LEDs blanches de puissance pour l'éclairage automobile

Chapitre I : Etat de l'art des LEDs blanches de puissance pour l'éclairage automobile

1 Introduction ..... - 15 -

2 Contexte économique et enjeux sociaux ..... - 16 -

2.1 Le marché global des LEDs ..... - 16 -

2.2 L'éclairage pour l'Automobile ..... - 17 -

2.3 Contraintes normatives des sources d'éclairage solides en automobile ..... - 22 -

3 L'état de l'art technologique multi-niveaux des LEDs de puissance : de la zone active à l'assemblage sur carte ..... - 24 -

3.1 Principe d'élaboration d'une puce ..... - 24 -

3.2 Différents types de boîtiers ..... - 31 -

3.3 Techniques de montage des puces sur embase ..... - 35 -

3.4 Les circuits imprimés et leurs performances ..... - 40 -

4 Modes de défaillance des LEDs blanches et mécanismes associés ..... - 45 -

4.1 Mécanismes de défaillance et facteur d'aggravation des LEDs de puissance ..... - 45 -

4.2 Mécanismes de défaillance et facteur d'aggravation des assemblages à LEDs de puissance - 47 -

4.3 Synthèse des mécanismes de défaillance de LEDs ..... - 52 -

5 Positionnement et objectifs du travail de thèse ..... - 53 -

5.1 Positionnement du travail de thèse ..... - 53 -

5.2 Objectifs du travail de thèse ..... - 54 -

6 Conclusion ..... - 56 -

7 Bibliographie ..... - 57 -

1 Introduction

Depuis une quinzaine d'années, la spectaculaire progression des performances des technologies semi-conductrices à base de nitrures, mises au service des composants optoélectroniques dans de multiples domaines d'application (médical, énergie, techniques d'informations et de la communication…), a permis une augmentation significative du marché des Diodes ElectroLuminescentes (LEDs pour *Light Emitting Diode*).

Depuis les années 2000, la préoccupation de notre société vis à vis des aspects environnementaux et plus particulièrement de la réduction de la consommation électrique a généré un effort spécifique pour le développement de l'éclairage public. Ceci conduit à un remplacement progressif, dans tous les domaines d'application de ces lampes à incandescence par des technologies de lampes à LEDs. La LED à base de GaN a donc pénétré ce marché jusqu'alors maîtrisé par les géants de l'éclairage à lampes fluorescentes et incandescentes. La miniaturisation des dispositifs d'éclairage à LEDs et la constante augmentation de leurs performances (> 150 lm/W) conduisent à de nouveaux challenges qui doivent être relevés en termes de gestion thermique et de garanties de durée de vie en conditions opérationnelles de plus en plus sévères.

L'évolution croissante de la complexité des technologies LEDs ainsi que la miniaturisation des technologies d'assemblage rendent difficiles l'analyse de défaillance. La conséquence directe est que la fiabilité de ces systèmes est de plus en plus difficile à estimer. De nombreux fabricants se basent sur une projection mathématique exponentielle pour évaluer des durées de vie supérieures à 50 000h. Or, la plupart d'entre eux basent leur calcul sur le retour d'expérience des lampes à incandescence et fluocompacte [1]. Actuellement les lampes à LEDs concurrencent les lampes classiques avec une moyenne de 100 $lm.W^{-1}$, mais leurs couleurs sont définies comme blanc froid. Pour les fabricants de lampes à LEDs, la durée de vie à travers la fiabilité, revêt un aspect fondamental et devient un argument de vente avec un poids équivalent à la réduction de la consommation d'énergie.

Ce premier chapitre a pour vocation de comprendre la globalité de la technologie LED, du principe de fonctionnement du semi-conducteur à l'intégration en projecteur automobile en passant par les technologies de fabrication de puce, l'assemblage, et la mise en boîtier. Nous nous attacherons donc, dans ce chapitre, à décrire tout d'abord le contexte économique dans lequel se situent ces travaux de thèse, en positionnant les enjeux et les challenges du marché des LEDs à technologie GaN pour l'automobile, les nouvelles fonctions, ainsi que les nouvelles sources d'éclairage à LEDs multi-puce disponibles [2]. A l'issue de cette première partie, nous nous intéresserons à l'architecture des sources à LEDs depuis l'élaboration de la puce jusqu'au composant multi-puce, en passant par toutes les étapes d'assemblage et de report. Enfin, en lien étroit avec le sujet, les problématiques de défaillance des LEDs seront abordées, d'une part au niveau puce et d'autre part au niveau de l'assemblage en boîtier. Ces trois parties permettront de positionner précisément cette étude sur trois axes :

- Le contexte normatif automobile et ses limites.
- L'apparition de nouveaux composants multi-puce.
- Plusieurs technologies LEDs blanches disponibles et concurrentes.

2 Contexte économique et enjeux sociaux

De façon très schématique, les LEDs se comportent comme des transducteurs électro-optiques permettant, d'envisager des applications extrêmement variées, adressant divers domaines d'application : médical, énergie, Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)…. Les technologies utilisées actuellement pour les LEDs associées aux techniques d'assemblage couvrent la bande de longueurs d'ondes d'émission s'étendant de l'ultraviolet (350 nm) à l'infrarouge (2000 nm), ce qui permet de couvrir de nombreux besoins.

Le fort développement de la technologie GaN durant ces quinze dernières années a permis de répondre aux applications utilisant la bande ultraviolet-visible. Nous développerons plus spécifiquement les applications associées au domaine du visible. Cette partie présente une étude du marché des LEDs à base de GaN pour l'éclairage, et plus particulièrement des technologies visées par le marché de l'automobile. Ce contexte économique permettra de mieux situer les objectifs scientifiques de notre étude.

2.1 Le marché global des LEDs

Les applications de l'éclairage requièrent des LEDs de plus en plus fiables avec une augmentation des volumes de production pour les secteurs comme le grand public, l'automobile, le spatial et l'aéronautique. A l'échelle internationale, les perspectives de réduction de la consommation d'énergie confirme la position des LEDs sur le marché de l'éclairage, en particulier dans les secteurs du bâtiment et des infrastructures. L'évolution du marché des LEDs de 2008 à 2020 est illustrée en Figure 1 [3]. En 2010, il a dépassé le seuil des 10 milliards de dollars américains (USD). Avec une croissance annuelle globale de 13,6 % de 2001 à 2012, ce marché devrait atteindre un chiffre record de 14,8 milliards USD d'ici à 2015. On constate que la part du marché dédié à l'éclairage général n'a cessé d'augmenter de 2008 à 2014 et une stabilisation est attendue pour 2018, liée à une maturité des produits en termes de fiabilité et performances. A contrario, la part dédiée au rétro-éclairage devrait décroître à partir de l'année 2014, car le nombre de LEDs nécessaires par écran a diminué et les performances par unité ont augmenté. Concernant la part de marché allouée au domaine automobile, elle est stable autour de 10% du marché global et devrait rester quasi-constante à l'horizon 2020.

Dans le cadre des technologies nitrurées, les sociétés NICHIA et TOYOTA GOSEI (Japon), PHILIPS LUMILEDs (Europe), CREE (Etats-Unis), et OSRAM (Europe) sont considérées comme les cinq acteurs majeurs du marché des LEDs ; TOYOTA GOSEI étant particulièrement présent sur le marché des LEDs GaN de forte puissance (>1 W). SAMSUNG et SEOUL SEMICONDUCTOR sont également très présents sur le domaine automobile. Ces acteurs sont principalement des fondeurs et maîtrisent la totalité des étapes de fabrication d'une puce LED.

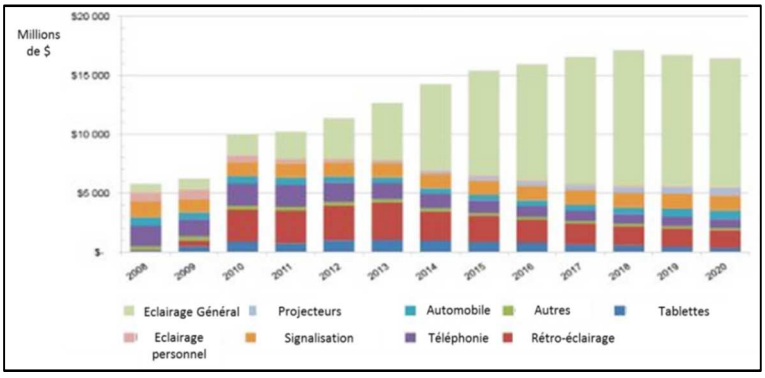


Figure 1 : Evolution et projection des marchés dédiés aux LEDs de 2008 à 2020 d'après [3]**.**

Nous allons, à présent, nous focaliser sur l'intégration de LEDs dans les applications automobile, correspondant au cœur de ces travaux de thèse.

2.2 L'éclairage pour l'Automobile

2.2.1 Les fonctions liées à l'éclairage automobile

L'éclairage automobile est une fonction essentielle qui doit satisfaire d'une part les contraintes sécuritaires associées à la réglementation et d'autre part, apporter de nouvelles prestations aux clients : offrir plus, tout en véhiculant l'image de marque de chaque constructeur. Il est divisé en deux grands domaines : l'éclairage intérieur et l'éclairage extérieur. Le premier ne concerne que des luminaires placés dans l'habitacle du véhicule, aux fonctions très diverses, alors que le second regroupe quatre domaines, suivant deux critères : la position du feu (avant ou arrière du véhicule) et sa fonction principale vis à vis du conducteur (voir ou être vu) [4]. Ce classement en différents domaines peut être résumé comme décrit dans le Tableau 1. Parmi les dispositifs intégrant des LEDs, ce sont les feux de croisement et de route qui nécessitent le plus de brillance et les LEDs de puissance représentent donc des solutions intéressantes pour assurer ces fonctions. Elles constituent l'objet principal de l'étude de cette thèse.

Les LEDs deviennent de plus en plus présentes dans le domaine de l'automobile, à la fois pour les applications intérieures et extérieures. Dans les années 1980, les LEDs ont fait leur apparition pour des applications de signalisation, *i.e.* le rétroéclairage lumineux pour des tableaux de bord [5]. Si l'on s'attache aux applications basses et moyennes puissances (<1 W), les utilisations actuelles sont multiples : rétroéclairage pour voyant lumineux, bouton rétroéclairé, décoration, éclairage intérieur, rétroéclairage d'afficheurs [6]…

Pour les applications de puissance, on se tourne naturellement vers l'éclairage extérieur. La Figure 2 montre que le développement des applications de puissance a débuté dans les années 1990 par l'intégration de LEDs rouges pour les feux-stop placés à l'arrière du véhicule.

	Voir	Être vu
Avant	Feu de croisement Feu de route Feu antibrouillard	Feu de position Indicateur de direction Feu de jour[1]
Arrière	Feu de recul	Feu de position Feu de stop Indicateur de direction Feu de brouillard Feu de recul

Tableau 1: Bilan des différentes fonctions d'éclairage extérieur en automobile [4].

[1] *Feu de jour ou DRL pour Day-time Running Light*, une fonction actuellement obligatoire dans l'union européenne depuis le 7 Février 2011 à la suite à l'acceptation de La directive européenne 2008/89/CE. Elle doit être allumée de jour lorsque le véhicule fonctionne.

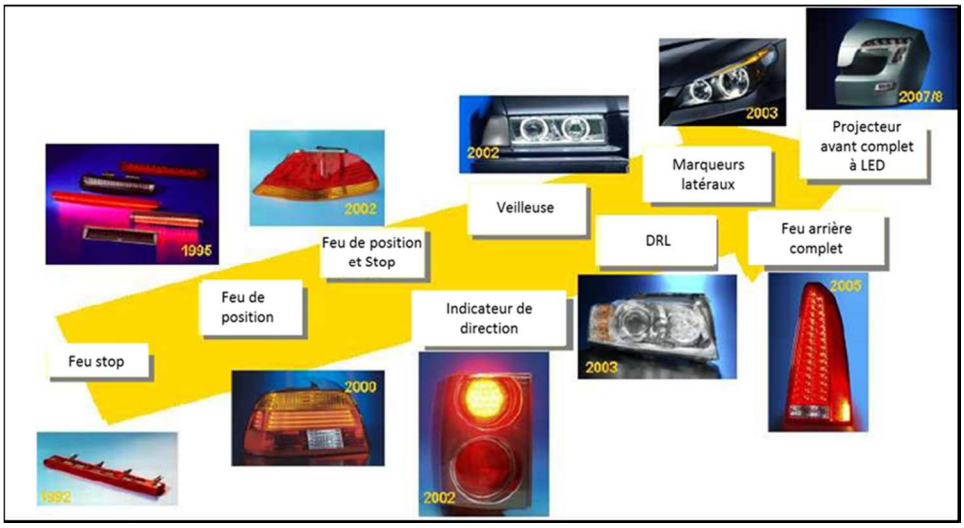


Figure 2 : Développement des applications extérieures LEDs en automobile depuis les années 1990 [5].

Le développement des LEDs de puissance blanches et le travail accompli sur les designs de boîtiers des composants durant ces cinq dernières années permettent d'atteindre des performances énergétiques équivalentes, voire supérieures, aux technologies actuellement utilisées dans les projecteurs automobile, comme les sources xénon ou halogène. On trouve maintenant sur les nouveaux véhicules de série, des LEDs sur les DRL. Des projecteurs complets à LEDs sont déjà commercialisés sur des véhicules dits haut de gamme (AUDI, MERCEDES) et commencent à se généraliser sur les véhicules de moyenne gamme (SEAT Léon, VOLKSWAGEN Polo 2014). Ces deux types de technologies de projecteurs à LEDs seront détaillés ultérieurement dans le chapitre 1. Commençons dans un premier temps par les applications code et route.

2.2.2 Les fonctions feux de croisement et de route

Un projecteur automobile est composé d'une source lumineuse maintenue par un bâti et une optique environnante. A chaque fonction d'éclairage, une optique spécifique est associée, dont le rôle est de mettre en forme le faisceau issu de la source lumineuse pour le projeter sur la route selon des géométries précises, définies par la réglementation automobile en vigueur [7] [8] [9]. Les formes des faisceaux de feu de croisement et feu de route sont représentées en Figure 3. On notera la forme asymétrique du faisceau de feu croisement caractérisée par une « coupure du faisceau » à 15° afin de ne pas éblouir les conducteurs circulant en sens inverse.

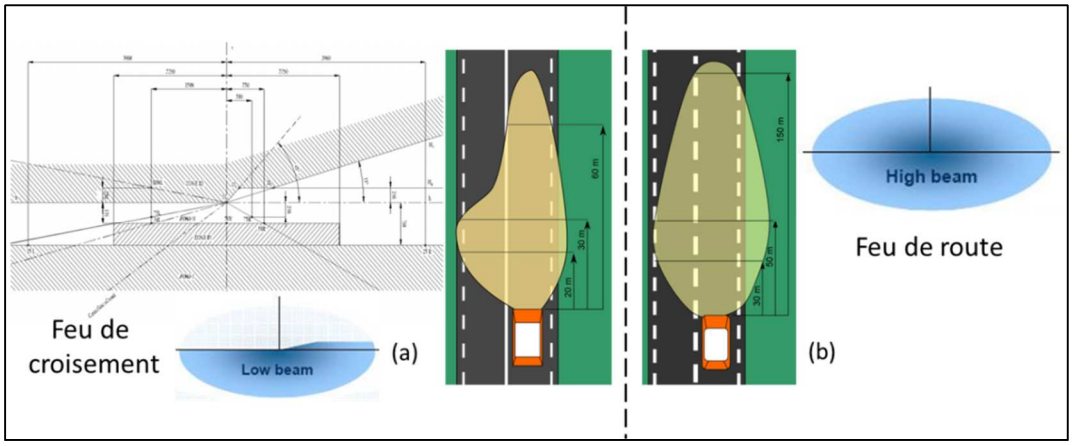


Figure 3 : Allure des faisceaux de feux de croisement (a) et route (b) [7] [8] [9].

2.2.3 Les différentes sources lumineuses

L'éclairage extérieur en automobile vise à remplir des cahiers des charges précis (flux, colorimétrie, géométrie du faisceau). Actuellement, trois technologies sont disponibles pour satisfaire les fonctions feu de croisement et feu de route [10]. On y trouve les lampes à incandescence (incluant la technologie halogène), les lampes à décharge et les LEDs [5]. Le Tableau 2 présente les principales caractéristiques de ces trois technologies. Leur maturité a été évaluée en fonction de l'évolution actuelle des performances pour chaque technologie. Les trois technologies de source sont illustrées en Figure 4.

Technologie	Source	Année de commercialisation	Flux par source (lumens)	Efficacité ($lm.W^{-1}$)	Durée de vie moyenne (h)	Maturité	Température de couleur (K)
Incandescence	filament	1915	50	8	500	oui	2700
	halogène	1965	1100	25	500	oui	3200
Décharge	xénon	1992	3200	90	3000	oui	4000
Electroluminescence (LED blanche)	LED 1mm²	2003	300(2013)	100 (2013)	10 000	non	6000

Tableau 2 : Caractéristiques principales des sources d'éclairage actuelles en automobile [4] [11] [5] [12].

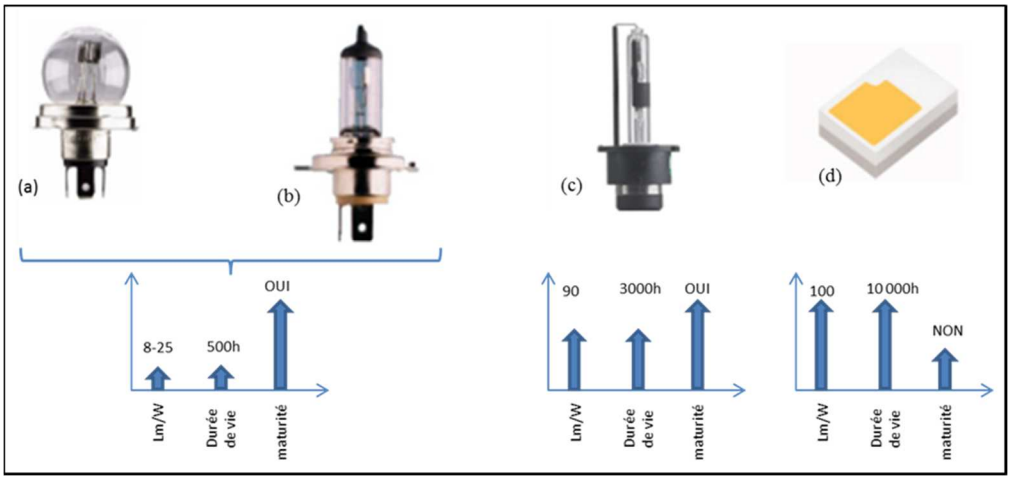


Figure 4 : Exemples de sources lumineuses : lampe à filament et lampe halogène (a et b), lampe au Xénon (c) et source à LEDs (d) et leurs principales caractéristiques fonctionnelles. [10] [13].

2.2.4 Intérêt des LEDs de puissance en automobile

Les LEDs présentent de nombreux avantages vis-à-vis des sources conventionnelles utilisées dans l'automobile mais la durée de vie des LEDs apparait au premier plan [14]. Tandis que les lampes à filaments ou halogène présentent des durées de vie de quelques centaines d'heures, les lampes à décharges xénon se positionnent autour de quelques milliers d'heures, les LEDs peuvent être utilisées jusqu'à 10 000 voire 15 000 heures en fonction des profils de mission exigés [10] [15]. Dans le domaine automobile, d'autres avantages sont particulièrement appréciés : la résistance mécanique des composants, leur efficacité lumineuse et leur grande compacité. Ce dernier point est primordial dans la conception et le design des projecteurs à LEDs, permettant de réduire les dimensions des projecteurs, simplifier les optiques, afin d'optimiser l'espace et réduire les coûts. La Figure 5 permet de comparer les différentes technologies d'éclairage automobile vis à vis du rendement énergétique utile (sur la route), c'est à dire rendement optique total, projecteur compris. Notons que la technologie LEDs présentait en 2010 un rendement équivalent au xénon (17 $lm.W^{-1}$) mais la projection pour 2015 donne un net avantage aux LEDs (34 $lm.W^{-1}$) [16]. Des travaux récents

ont permis de développer des prototypes de projecteurs présentant un rendement optique « sur la route » de 70 lm.W^{-1} [12].

Concernant des technologies alternatives, il existe les LEDs organiques (OLED pour Organic Light Emitting Diode) dont l'émission de photons est basée sur un phénomène comparable aux LEDs inorganique, mais dont le cœur actif est à base de matériaux organiques [17]. Les problèmes actuels de cette technologie, sont :

- Une fiabilité relativement faible des assemblages dans le temps (quelques milliers d'heures) : ce phénomène est principalement dû au fait de les composés organiques sont très sensibles à l'humidité et donc moins adaptés à des environnements aussi sévères que l'automobile.
- Une conformabilité nulle (boîtier hermétique en verre) ainsi que des rendements faibles actuellement stabilisés autour de 16 lm.W^{-1} : ces composants sont particulièrement bien adaptés aux écrans de téléphone portable et *smartphone* dont la dalle tactile représente une protection efficace mais fragile et permet des durées de vie opérationnelle d'environ trois ans.

Les composants à base de LEDs pour l'automobile présentent un rendement optique très avantageux (100 lm.W^{-1}) mais présentent encore une densité de flux lumineux par puce assez faible (de l'ordre de 300 lm.mm^{-2} à 1 A) [13] contrairement à une source xénon qui peut émettre jusqu'à 800 lm.mm^{-2} [10].

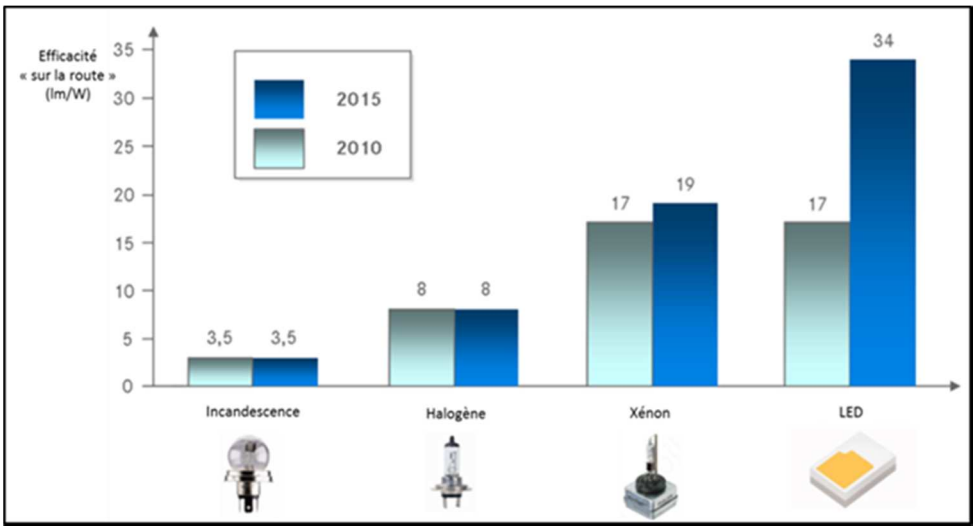


Figure 5 : Efficacité énergétique des LEDs vis-à-vis des technologies existantes [16].

2.2.5 Architecture d'un projecteur automobile à LEDs

Un projecteur à LEDs est constitué de 4 principales parties :

- Le composant à LEDs : module multi-puce souvent constitué de 1 à 5 puces [18].
- L'électronique de pilotage des LEDs [10].
- Le dissipateur thermique, typiquement en Al [19]. Cette dissipation peut être passive (convection naturelle, radiateur seul) ou active (convection forcée sous ventilation) [20].
- Le réflecteur optique permettant d'obtenir une première mise en forme de faisceaux. Il est complété par un miroir qui réalise la « coupure de faisceau » pour la fonction feu de croisement.

La Figure 6 présente l'architecture habituelle d'un projecteur à LEDs et rassemble les parties listées ci-dessus. C'est le principe de fonctionnement d'un projecteur à LEDs de véhicule de moyenne gamme (exemple de la SEAT Léon, Figure 7). Cette architecture avec réflecteur optique présente le meilleur compromis entre efficacité optique et coût [10]. Côté design, traduisant la répartition des LEDs, les optiques utilisées peuvent être différentes. Les principales stratégies optiques rencontrées dans l'automobile sont également détaillées. Outre la technologie à réflexion simple, d'autres technologies basées sur une lentille ou un guide lumineux permettent de mettre en forme le faisceau, ou encore dans un esprit de stratégie hybride, combinant la réflexion à l'utilisation d'une lentille.

Concernant l'électronique d'alimentation des LEDs, il existe trois principales solutions techniques :

- La régulation linéaire (régulation résistive).
- Le convertisseur courant continu / courant continu (plus connu sous la dénomination convertisseur DC/DC).
- L'alimentation en courant pulsé (PWM pour *Pulse Width Modulation*).

Sur certains véhicules haut de gamme, on peut trouver des projecteurs à LEDs intégrant jusqu'à 40 puces par projecteur pour la fonction feu de croisement. C'est le cas de l'AUDI A8 version 2013 qui propose ces projecteurs en option [10]. Chaque puce est adressable individuellement ce qui permet d'accéder à de nouvelles fonctions en éclairage automobile, comme la technologie de feux de route non éblouissants (GFHB[2] pour *Glare Free High Beam*) [21].

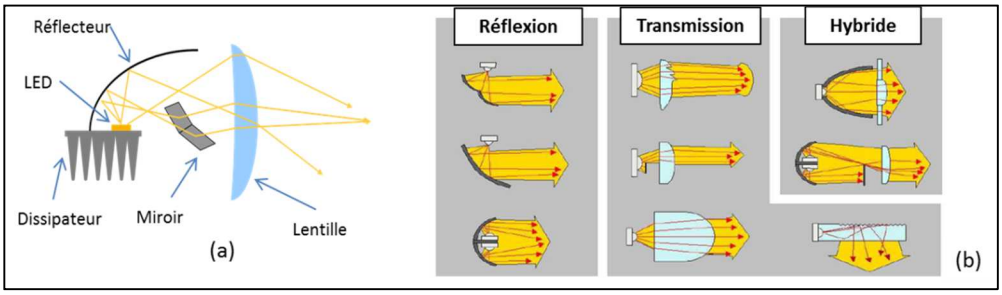


Figure 6 : Architecture typique d'un projecteur à LEDs pour automobile (a) et différentes stratégies optiques disponibles (b) [10] [5].

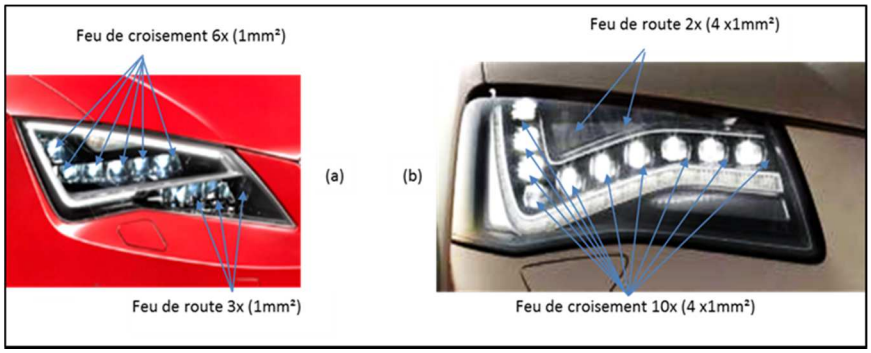


Figure 7 : Exemples de projecteur de Seat Léon (a) et de l'Audi A8 (b) [10].

Nous venons de dresser un aperçu des technologies actuelles d'éclairage automobile. Après une présentation des différentes fonctions à bord d'un véhicule, les fonctions de puissance ont été

[2] GFHB : feu de route non éblouissant. Chaque puce est pilotée individuellement, ce qui permet de réaliser un éclairage segmenté et donc sélectif.

détaillées, depuis les sources lumineuses disponibles jusqu'à leurs intégrations en projecteur en passant par la réglementation ainsi que les mises en forme de faisceau. Notre intérêt va se porter à présent sur les contraintes normatives appliquées aux LEDs pour les applications automobiles.

2.3 Contraintes normatives des sources d'éclairage solides en automobile

Si l'on répertorie les normes applicables aux LEDs pour l'automobile, il existe d'une part les normes dédiées aux LEDs (tous domaines confondus y compris celui de l'automobile) et d'autre part les normes automobiles, couvrant les composants LEDs.

2.3.1 Normes dédiées à l'éclairage général à LEDs

Les principales normes dédiées à l'éclairage à LEDs sont les normes LM79 et LM80 [22]. Ces documents, rédigés par l' « *Illuminating Engineering Society of North America* » (IESNA), décrivent des tests photométriques pour les luminaires à base de LEDs et expliquent comment le luminaire doit être testé et quelles sont les informations que l'on doit retrouver dans le rapport photométrique. Les tests à appliquer aux LEDs se déroulent ainsi :

- Conditions de test :
    - Trois tests à trois températures différentes (température du boîtier des LEDs).
    - Le courant est « nominal » et régulé à ± 3%.
    - Tests à 55°C, 85°C et une troisième température au choix.
    - L'humidité relative ambiante ne doit pas dépasser 65%RH.
- Conditions de mesure :
    - La durée des tests est de minimum 6 000h, idéalement 10 000h.
    - L'intervalle de mesure maximal est de 1 000h.

La norme TM21, écrite également par l'IESNA, précise que les données de vieillissement exploitables se situent entre 6 000 et 10 000h de vieillissement [23]. Une fois les données collectées, on extrait les paramètres d'ajustement sur une loi exponentielle telle que décrite par l'équation 1.

$$\Theta(t) = B.e^{(-\alpha.t)} \qquad \textbf{Équation 1}$$

Avec α : Coefficient de décroissance déterminé par ajustement.
B : Constante, ordonnée à l'origine déterminée par ajustement.
t : Temps de vieillissement en heures.
$\Theta(t)$: Flux optique moyenné à l'instant t.

Grâce à ces paramètres déterminés expérimentalement, il est possible de calculer une durée de vie des composants LEDs dans les mêmes conditions de vieillissement (Equation 2).

$$t_p = \ln(100.B / p) / \alpha \qquad \textbf{Équation 2}$$

Avec t_p : Durée de vie estimée en heures et p le pourcentage de flux initial restant.

Nous verrons que la démarche proposée par le document TM21 est applicable à l'étude de fiabilité de modules à LEDs dédiés à l'automobile. Cependant, les préconisations dictées par la norme LM80 ne sont pas adaptées et sont non représentatives du profil de mission des LEDs de puissance en automobile (durée des tests, courant, température, humidité…). D'autre part, notons que 10 000 heures de fonctionnement correspondent à plus d'une année en continu, ce qui entraîne des campagnes de tests extrêmement longues.

2.3.2 Normes dédiées aux LEDs en automobile

La qualification des LEDs pour l'automobile suit la norme AEC-Q101, en vigueur pour l'ensemble des composants discrets utilisés en automobile. Pour les LEDs, certaines modifications sont apportées notamment concernant les tests thermiques : la plage de température a été restreinte à minima en 2005 avec l'introduction des LEDs dans l'automobile à -40/+85 °C se substituant à -40/+125 °C. Depuis, aucune modification n'a été apportée quant aux amplitudes thermiques des tests, malgré un fort développement des technologies LEDs (augmentation des températures admissibles). D'autre part, des tests dédiés à l'évaluation de la sensibilité des LEDs à l'humidité sont mis en œuvre, mais les conditions de test sont très critiquables : en effet, certains tests sont réalisés sous conditions d'humidité avec des composants alimentés en continu à une température de jonction maximale (150 °C). Cela ne permet pas à l'humidité d'être absorbée dans les boîtiers [13]. Des travaux ont montré une influence significative du fonctionnement d'une LED (T_j >100 °C) vis-à-vis de la pénétration de l'humidité dans le boîtier [24]. La diffusion d'humidité vers la jonction serait dans ce cas fortement limitée et la puce ne verrait pas l'humidité ambiante. Enfin, la validation ou non des tests AEC-Q101 s'effectue lorsque les paramètres électriques dérivent dans les 20 % de la valeur initiale (V_f) et les paramètres optiques dans les 30 % (flux) en regard de la fiche technique, mais les informations collectées ne prennent pas en compte la dérive des coordonnées chromatiques du spectre des LEDs. En effet, le point de couleur peut dériver dans le temps et ainsi tendre vers un blanc plus bleu ou plus jaune. Cela peut conduire à un déséquilibre de couleurs entre LEDs, visible par les utilisateurs, et présente des risques potentiels pour la santé avec une plus forte puissance optique bleue [25].

Dans ce contexte sans standard concernant l'utilisation des LEDs de puissance dans le domaine automobile, les fabricants de LEDs identifient et définissent actuellement en interne, des tests inspirés d'autres standards internationaux afin d'évaluer la robustesse de leurs produits. Quelques exemples de tests déployés chez les fabricants sont détaillés dans le Tableau 3.

L'état de l'art des conditions d'utilisation et d'intégration des LEDs pour l'automobile vient d'être effectué. Nous avons clairement mis en évidence des lacunes et certaines incohérences à la fois dans la construction des tests normatifs mais également dans les extractions de durées de vie qui rendent ces documents critiquables pour une évaluation de nouveaux composants ou technologies destinés à un profil de mission du type automobile.

Test	Normes	Conditions de test	Durée du test	Nombre de LEDs pour le test
Stockage haute température	JEITA ED-4701 200 201	$T_{ambiance}$ = 125 °C	1000 h	4*6
Cycles thermiques	JESD22-A105	-40°C/125°C I_f =1200 mA T_{on}-T_{off} = 5 min	1000 h	4*6
Chocs thermiques	MIL-STD-202G JESD22-A106	15 min/15 min -40 °C/100 °C -50 °C/150 °C	2000 h 2000 cycles 2000 cycles	10 6
Cycles humides	JESD22-A101	85 °C/85 % RH I_f = 1200 mA T_{on}-T_{off} : 30 min	1000 h	3*30

Tableau 3 : Exemples de tests environnementaux déployés chez les fabricants de LEDs dédiées automobile.

3 L'état de l'art technologique multi-niveaux des LEDs de puissance : de la zone active à l'assemblage sur carte

Afin de générer une lumière blanche à partir de LEDs, deux voies technologiques sont possibles : Premièrement, l'émission d'une longueur d'onde courte dont tout ou partie est convertie en longueurs d'ondes plus grandes (phénomène dit de « *up-conversion* ») pour obtenir la couleur blanche. On distingue alors deux possibilités : l'émission d'une longueur d'onde invisible (*e.g.* ultraviolette) couplée à une composition de luminophores rouge, vert et bleu ou une courte longueur d'onde visible (généralement bleue) associée à un luminophore jaune. Cette dernière est la technique la plus utilisée à l'heure actuelle pour les applications LEDs de puissance (Figure 8). Deuxièmement, on peut également citer l'association de trois puces LEDs émettant respectivement les trois couleurs primaires, à savoir le rouge, vert et bleu ; le mélange aboutissant alors à une lumière blanche.

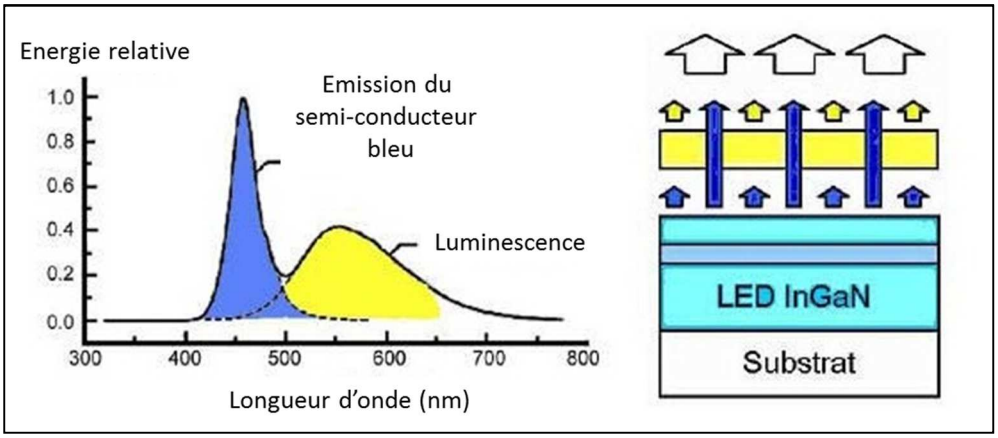


Figure 8 : Génération de lumière blanche à partir d'une LED bleue par conversion [26]

Malgré la grande diversité architecturale des composants LEDs de puissance du marché, nous retrouverons systématiquement les éléments suivants dans l'ensemble des structures :

- Une puce constituant la source lumineuse.
- Un boîtier qui accueille la puce et son optique primaire (optionnelle).
- Une protection TVS (pour *Transient Voltage Suppressor*) contre les décharges électrostatiques (ESD[3] pour ElectroStatic Discharge).
- Un circuit imprimé ou support, assurant un maintien mécanique global et drainant le flux thermique.

Chaque partie va être détaillée dans la suite du document.

3.1 Principe d'élaboration d'une puce

La puce est à base de GaN, elle permet d'assurer la transduction électro-optique pour l'émission de photons. Elle se compose d'une zone active en InGaN, contenue entre deux zones GaN permettant de confiner les porteurs par un puits de potentiel et les photons par variation d'indice. Pour les technologies GaN, on optimise systématiquement la zone active avec des puits quantiques pour augmenter les performances d'émission de lumière. Pour activer le phénomène de transport au

[3] ESD : Décharge électrostatique qui peut potentiellement détériorer un composant électronique lors des phases de manipulation, transport, montage ou utilisation.

sein de la zone active et donc permettre les transitions électroniques, il est nécessaire d'injecter et de conduire, des porteurs de types différents (électrons et trous) par des contacts. Actuellement, il est très difficile de réaliser des contacts ohmiques sur la technologie GaN du fait des différences entre l'affinité électronique du GaN et la valeur des travaux de sortie des différents métaux disponibles dans cette filière technologique. Le contact est donc très souvent de nature Schottky du côté P de la diode [27]. Cette puce est ensuite intégrée dans un boîtier où plusieurs configurations existent.

3.1.1 Elaboration de la zone active : Epitaxie du GaN/InGaN

La réalisation d'une LED de rendement élevé requiert que le cristal semi-conducteur soit de haute qualité, c'est à dire avec le moins de défauts et d'impuretés possible. Dans le cas des nitrures d'éléments III comme le GaN, il existe une différence de paramètre de maille conséquente entre les différents matériaux utilisés lors des procédés de dépôt (substrat, couche tampon, zone active), qui est à l'origine de fortes contraintes internes. A partir d'une certaine épaisseur, dite critique, le matériau se relaxe plastiquement en créant des dislocations. Celles-ci peuvent alors être à l'origine de processus de recombinaisons non-radiatives des excitons lors du fonctionnement de la LED. Ce phénomène a généralement comme conséquence un auto-échauffement de la jonction puis à terme, sa dégradation. Dans une telle situation, la faible longueur de diffusion des porteurs dans les nitrures est un point favorable [28]. Ainsi, si la distance entre deux dislocations est grande devant cette longueur de diffusion, les processus de recombinaisons non-radiatives seront limités. Pour exemple, T. SUGAHARA et al. [28] montrent que si la longueur de diffusion des trous est de l'ordre de 50 nm alors la densité de dislocations ne doit pas dépasser $10^{7}.cm^{-2}$ pour obtenir un rendement optique maximal. Le choix du substrat de croissance est donc déterminant pour la qualité finale des couches épitaxiées.

Aujourd'hui, il n'existe pas de substrat accordé en maille pour la croissance épitaxiale du GaN, mis à part le GaN lui-même mais sa synthèse sur de grandes surfaces compatibles aves les procédés de la micro-électronique est difficile et très coûteuse [29]. Le substrat saphir, bien que présentant un très fort désaccord de paramètre de maille (-14 %) est largement utilisé pour la réalisation de LED en raison de son coefficient de dilatation thermique proche du GaN, de sa transparence dans le visible et de son faible coût [30] [29] [31]. Le 6H-SiC, utilisé, entre autres, par la société CREE, présente quant à lui un désaccord de maille intéressant de seulement 3,3 %, mais reste très onéreux [29]. Cependant, la contrainte induite par l'hétéroépitaxie de GaN sur saphir conduit à la formation de dislocations traversantes dans la couche de GaN [31] [32]. Par le procédé d'Epitaxie par Jet Moléculaire (EJM), la densité de dislocations obtenue sur substrat de saphir est classiquement de l'ordre de $2.10^{9}.cm^{-2}$ [31]. En utilisant la technique d'épitaxie en phase vapeur organométalliques (ou MOVPE pour *MetallOrganic Vapour Phase Epitaxy*), grâce à différents procédés de croissance (exemple ELO pour *Epitaxial Lateral Overgrowth*), elle peut être largement réduite à $0,5.10^{6}.cm^{-2}$ [32]. Aujourd'hui, les industriels réalisent l'épitaxie des couches actives par le procédé HVPE (*Halide Vapor Phase Epitaxy*) qui est une combinaison de l'évaporation d'un précurseur GaCl(s) avec une MOVPE et une ELO [32]. Les densités de dislocations obtenues atteignent alors $10^{6}.cm^{-2}$.

Le dopage P par substitution au Ga est réalisé classiquement avec du Mg lors de l'épitaxie des couches actives (transport, injection, blocage). Pour le dopage de type N, on utilise préférentiellement le Si qui est introduit en substitution au Ga durant le procédé d'épitaxie. A la jonction P-N, la zone active est constituée d'une structure à multi-puits quantiques MPQ $In_{0,3}Ga_{0,7}N$/GaN (jusqu'à 9 périodes) dont les épaisseurs typiques sont de 30 et 70 Å respectivement, fabriquée par EJM, ayant pour but de confiner spatialement les porteurs et aboutir à un meilleur rendement quantique de la LED.

3.1.2 Transport et injection de porteurs : dopages et contacts N et P

La prise de contact sur le GaN de type N est réalisée par dépôt successif de couches métalliques utilisant des métaux dont le travail de sortie (ϕ_m) se confronte à l'affinité électronique du semi-conducteur GaN de type N et forme généralement une barrière de potentiel. Les métaux comme le Ti (ϕ_m = 8,28 eV) ou l'Al (ϕ_m = 4,33 eV) sont classiquement utilisés ainsi que des bicouches Ti/Al [33]. Cette configuration bi-couche permet de tirer profit des propriétés chimiques du Ti (bonne adhérence) et de la très bonne conduction électrique de l'Al. L'adaptation entre le dopage de la couche semi-conductrice et le métal de contact permet de réduire la barrière de potentiel ϕ_b. L'expression de cette dernière est donnée par : $\phi_b = \phi_m - \chi_{sc}$. L'affinité électronique χ_{sc} du GaN est de 4,1 eV. Pour une prise de contact en Al, la barrière de potentiel s'élève à 230 meV. Face aux contraintes d'oxydation, il est fréquent de recouvrir d'Au les contacts, procédure couplée à un dépôt tampon afin de prévenir la diffusion de l'Au dans les couches inférieures (Ti/Au, Pt/Au ou encore Ni/Au) [34]. Les meilleures performances ont été atteintes avec des structures Ti/Al/Ni/Au 15/220/40/50 nm après recuit à 600°C pendant 2 minutes aboutissant à une résistance spécifique de l'ordre de $10^{-5}\Omega.cm^{-2}$ [33].

En revanche, la prise de contact sur GaN de type P est beaucoup plus sensible. Le dopage P extrinsèque est réalisé par incorporation de Mg lors de la croissance du GaN. Compte tenu de la forte énergie d'activation du dopant (de l'ordre de 200 meV), environ 1 % des atomes de Mg sont actifs électriquement. Le dopage maximal de type P envisageable à température ambiante est trop faible pour pouvoir réaliser des contacts ohmiques avec de bonnes propriétés en terme d'injection électrique. Idéalement, le métal réalisant le contact de type P aura un fort travail d'extraction. Les matériaux comme le Pt, Ni, Pd, Au sont classiquement utilisés avec des travaux d'extraction respectifs de 5,65, 5,15, 5,12, 5,1 eV [35].

Les empilements de contact P les plus rencontrés sont Ni/Au, Ni/Pt/Au, ou Pd/Au [36]. C'est le couple Ni/Au (20/100nm) qui présente les meilleures propriétés électriques, avec une résistance de contact d'environ $10^{-6}\Omega.cm^{-2}$. Concernant les LEDs de forte brillance, le contact P peut être précédé d'une fine couche de Ag (réflecteur optique). Dans ce cas, c'est l'Ag qui constitue le contact et présente un travail de sortie de 4,3 eV.

Ceci étant, la barrière de potentiel typique est donnée par : $E_v - E_f = \chi_{sc} + E_i + \Phi_{FI} - \Phi_m$

E_i correspond à la position du niveau de Fermi pour un semi-conducteur intrinsèque et φ_{FI} la position du niveau de Fermi du matériau dopé par rapport à E_i.

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + kT \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) \quad \textbf{Équation 3}$$

$$\Phi_{FI} = -kT \ln\left(\frac{n_i}{N_a}\right) \quad \textbf{Équation 4}$$

Pour un dopage de l'ordre de 10^{17} cm^{-3} et un contact réalisé avec Pt, on trouve une barrière de potentiel de 1,61 eV. Avec de l'Ag, on trouve une barrière de potentiel de 2,96 eV.

Nous venons de décrire succinctement le procédé d'épitaxie du cœur « actif » de la LED (GaN/InGaN) et présenter la nature des contacts classiquement utilisés dans les LEDs GaN, abordons à présent les différentes structures de puce envisageables. La structure (ou configuration) de puce adoptée définira la méthode d'extraction de lumière depuis la jonction vers l'extérieur de la puce.

3.1.3 Différentes structures et méthodes d'extraction de lumière

Dans cette partie, nous allons détailler les différentes architectures ou configurations de LEDs et leurs performances en terme d'extraction de lumière afin d'avoir un aperçu des différentes solutions disponibles actuellement sur le marché.

Quatre filières technologiques en vue de l'interconnexion de la puce en boîtier sont possibles :

- Puce conventionnelle (CC pour *Conventional Chip*).
- Puce retournée (FC pour *Flip Chip*).
- Puce en couche mince verticale (VTF pour *Vertical Thin Film*).
- Puce en couche mince retournée (TFFC pour *Thin Film Flip Chip*).

a. Conventional Chip (CC)

La configuration CC (Figure 9) est la configuration historiquement utilisée dans la réalisation de puces LEDs pour sa simplicité de mise en œuvre [30]. Dans cette dernière, la cathode est réalisée en gravant la couche P afin d'accéder à la couche N et un contact ohmique est déposé sur celle-ci. Etant donné que le GaN:Mg (type P) possède une faible conductivité électrique (de l'ordre de 1 Ω.cm), il est nécessaire de déposer un contact électrique semi-transparent (Ni/Au ou ITO pour *Indium Tin Oxide*) sur la majorité de la face supérieure de la puce [37] [38]. En effet, cela permet d'uniformiser l'injection du courant électrique sur la majeure partie de la surface de la diode en gardant les performances optiques.

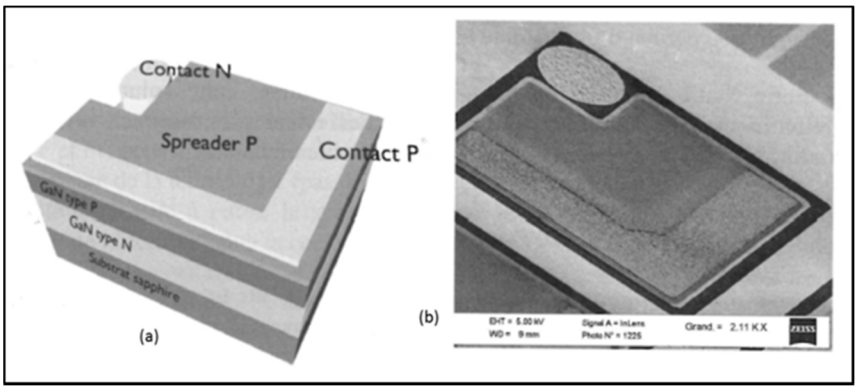


Figure 9 : Structure schématique (a) et vue au microscope électronique à balayage (MEB) (b) d'une puce réalisée selon la configuration CC au CEA LETI [38].

Cette architecture est techniquement simple mais présente les inconvénients suivants :

- Faible extraction lumineuse au travers du contact supérieur (rendement d'extraction faible).
- Mauvaise uniformité de l'injection électrique (résistance série importante).
- Mauvaise dissipation thermique (résistance thermique du composant). En effet, le saphir (Al_2O_3) utilisé en tant que substrat de croissance, constitue une couche supplémentaire dans le management thermique majoritairement orienté vers l'embase.

Le problème de base de la configuration CC réside dans le compromis entre l'extraction de lumière et l'uniformité de l'injection du courant sur toute la surface de la puce [38]. En contrepartie de l'augmentation du courant d'injection, l'augmentation de l'épaisseur du contact semi-transparent, nécessaire pour éviter un échauffement trop important, diminue la quantité de lumière extraite de la puce par absorption lumineuse.

b. Flip Chip (FC)

Dans la configuration FC (Figure 10), une couche métallique réfléchissante assure le contact P sur une grande partie de la diode et augmente le rendement d'extraction par le caractère réfléchissant de cette couche métallique. Dans cette architecture, la lumière est émise au travers du substrat saphir.

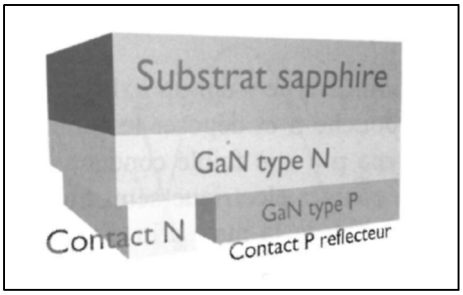


Figure 10 : Schéma de principe de la configuration Flip Chip [38]

D'autre part, la structure est reportée sur un matériau qui présente une faible résistance thermique (Si ou certaines céramiques comme l'Al_2O_3 ou l'AlN) [39] [29] [40]. Le rapprochement de la jonction et du dissipateur thermique permet d'obtenir une meilleure extraction du flux de chaleur. Cette configuration est souvent appelé type « *P-down* », indiquant que la couche P est reportée sur un substrat d'accueil. L'avantage de cette configuration est souligné par le fait que la partie P d'une LED est beaucoup plus mince que la partie N. La différence d'épaisseur est dans le même rapport que la mobilité des électrons par rapport à celle des trous. La zone active, source thermique dans un composant optoélectronique émissif, se retrouve donc à une faible distance du refroidisseur, réduisant considérablement la résistance thermique de ce dispositif.

Enfin, outre les avantages d'un point de vue thermique, cette architecture permet d'éliminer la présence de fils de contact supérieurs (contact N) et potentiellement, de faciliter le dépôt conforme des luminophores de conversion lumineuse.

Les sociétés CREE et PHILIPS, ont récemment mis sur le marché des puces FC avec des contacts anode et cathode sur la même face arrière en finition Au_{80}-Sn_{20} pour un report direct sur carte par brasure [41] [42].

Cependant, les principaux problèmes de cette technologie sont :

- L'élaboration d'une structure relativement plane afin de permettre le report de type flip-chip.
- Dans la contrainte mécanique de report qui peut faire évoluer la contrainte intrinsèque dans la zone active et donc modifier les caractéristiques de cette dernière (seuil de la diode, rendement, dislocations…).

c. Vertical Thin Film (VTF)

Dans le cas de la configuration VTF (Figure 11), le contact P est déposé sur toute la surface de la LED à l'issu de la croissance du GaN par épitaxie. La structure est ensuite hybridée (reportée) sur un substrat hôte (Ge, Si, CuW). L'étape suivante consiste à retirer le substrat pour ouvrir le contact N. Cette opération peut s'effectuer par un procédé de retrait du substrat par laser (LLO[4] pour « *Laser Lift Off* ») qui sera détaillé en partie 3.1.4.

[4] LLO : Procédé de retrait utilisant une source laser excimer permettant dans le cas des LEDs de séparer mécaniquement une couche semi-conductrice de son substrat de croissance.

Dans la configuration VTF, le contact N est déposé au centre de la puce et la résistivité électrique du matériau type N (GaN:Si autour de 0,005 Ω.cm) est suffisamment faible pour assurer un bon étalement du courant sur toute la surface de la puce LED [30].

Cette configuration permet une bonne extraction lumineuse à travers le GaN-N mais rend difficile le dépôt des luminophores par la présence du ou des fils du contact supérieur [30]. Des sociétés comme CREE, OSRAM ou SEMILEDs proposent actuellement cette configuration de puce dans leurs produits [43].

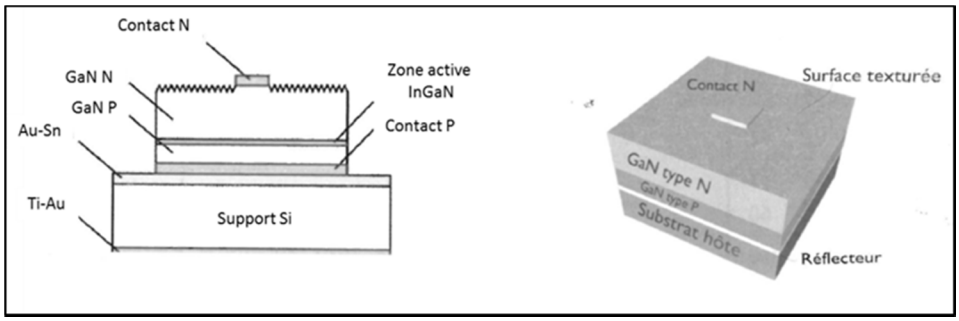


Figure 11 : Vue en coupe et schéma de principe d'une LED en configuration VTF [38].

d. Thin Film Flip Chip (TFFC)

La solution TFFC (Figure 12) correspond à une architecture composite des configurations VTF et FC pour combiner les bénéfices en termes de dissipation de chaleur, d'absence de câblage filaire et du dépôt facilité des luminophores. Cette solution consiste à retirer le substrat une fois la plaque réalisée selon la configuration FC. Elle constitue en fait l'évolution naturelle de la solution FC. La lumière est donc extraite au travers du GaN-N. LUMILEDs est actuellement un des leaders sur cette technologie et la propose dans ses produits [40].

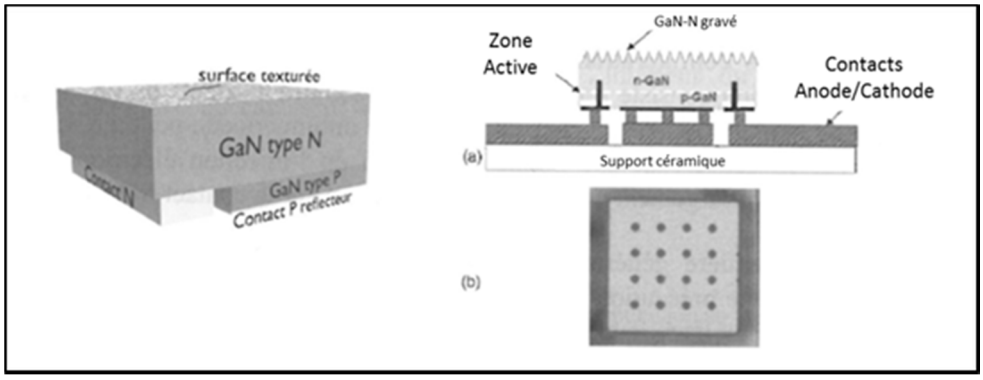


Figure 12 : Schéma de principe en configuration TFFC (a) et exemple de réalisation (b) [38].

3.1.4 Retrait du substrat

Les architectures (VTF et TFFC) nécessitent le retrait du substrat de croissance en saphir (cf. 3.1.3). Cette étape reste une manipulation limitante et encore difficile à transférer pour une réalisation industrielle bas coût en préservant les hautes performances en terme de brillance [38]. Le saphir est un cristal très rigide (module d'Young= 420 GPa), il est donc difficile de le retirer par polissage mécanique [38]. Une solution consiste à insoler la face arrière de l'échantillon avec un laser Excimer de type KrF à une longueur d'onde de 248 nm. A une telle longueur d'onde, seul le saphir est transparent. En absorbant le faisceau, le GaN va subir un échauffement local très intense (le GaN entre alors en fusion à 2500 °C) [30]. Une zone de fracture par formation de bulles d'azote et de gouttelettes de Gallium va apparaître. Il sera ensuite possible de désolidariser la couche active du substrat par un recuit [44].

Bien qu'il existe des lasers de forte puissance avec des tailles importantes de faisceaux, cette étape reste délicate à maitriser et prend énormément de temps. Pour obtenir des densités de puissance suffisantes, l'insolation ne peut pas être réalisée pleine plaque mais par un spot laser (de forme rectangulaire) balayant la surface de l'échantillon. Une fois le substrat retiré, les gouttelettes de Ga sont éliminées par gravure HCl. Cette étape est classiquement suivie d'une étape de photogravure chimique (PEC[5] pour *PhotoElectricoChemical*) [45] afin de texturer la surface pour augmenter l'extraction de la lumière (voir paragraphe suivant).

3.1.5 Optimisation de l'extraction de lumière

Deux axes principaux sont ici étudiés afin d'améliorer l'extraction lumineuse de la puce LED : D'une part, la nature et la géométrie des contacts et d'autre part, la texturation d'une partie de la structure. Le dépôt de contacts métalliques épais en forme de grille sur la face supérieure de la puce (configuration CC et VTF) masque une partie de la surface émissive. La solution consiste à utiliser un contact semi-transparent ou un réseau de pistes métalliques uniformément réparties sur la surface. Une fois la lumière générée, si aucune précaution n'est prise, la majorité des photons reste piégée à l'intérieur du matériau. Une solution simple consiste à placer une surface réfléchissante à la longueur d'onde de travail (450 nm) afin de rediriger la lumière vers la surface émettrice. Les matériaux utilisés sont des métaux à base d'Al ou d'Ag [29]. Concernant la texturation de surface, cette technique peut être appliquée sur toutes les configurations (CC, FC, VTF et TFFC) mais aura une efficacité plus ou moins importante. Un exemple de surface texturée est donné en Figure 13. Le principe repose sur le caractère aléatoire de la valeur de l'angle relatif entre le rayon lumineux incident et la surface d'émission. Au cours de ses multiples réflexions, la probabilité pour que le rayon lumineux arrive à la surface supérieure de l'échantillon avec une direction permettant de rayonner vers l'espace libre augmente grâce au caractère aléatoire de la surface. Avec une telle structuration, Y. FANG a montré une augmentation significative du flux lumineux de puces GaN de 50 % [46].

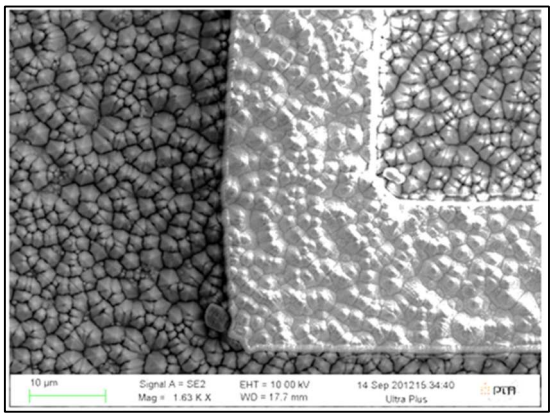


Figure 13 : Exemple d'une surface N-GaN texturée au niveau du contact sur une structure VTF, gravée avec une solution à base de KOH, gravure PEC.

A l'heure actuelle, les solutions commerciales sont axées sur une combinaison de l'utilisation de contacts réfléchissants pour les configurations TFFC et VTF ainsi que la texturation de surface. Cela permet d'atteindre des rendements d'extraction au niveau puce de l'ordre de 80 % [38].

Afin de finaliser ce tour d'horizon des différentes configurations possibles de puce LED, il est utile de préciser, à l'exception de la configuration de puce conventionnelle (CC) qui a rapidement montré

[5] PEC : Procédé de gravure chimique utilisant une base (KOH est un exemple) et un acide (HCl est un exemple) assisté par une insolation UV dont l'énergie du photon doit être supérieur au band gap du matériau à graver.

ses limites pour les LEDs de puissance, qu'aucune des autres configurations entre le FC, VTF et TFFC ne se dégage des autres en termes de performances optiques comme le démontre le Tableau 4.

Les différentes technologies de puces LED disponibles commercialement étant maintenant décrites (CC, FC, VTF, et TFFC), abordons les différents types de boîtiers envisageables pour l'accueil de puces LEDs ainsi que les solutions de report et reprises de contacts associées.

Configuration	CC	FC	VTF	TFFC
Avantages	Fabrication simplifiée	Absence de câblage	Contact P pleine puce Couplage thermique optimisé	Absence de câblage Bonne extraction optique
Inconvénients	Extraction de lumière non optimisée	Température de surface non homogène	Présence d'un câblage Retrait du substrat (LLO)	Retrait du substrat (LLO) Couplage thermique non optimisé
Performances optique sur LEDs blanche (Janvier 2014) à 700 mA.mm^{-2} T_j 85°C		130 lm.W^{-1} (LumiLEDs) 115,5 lm.W^{-1} (CREE)	105 lm.W^{-1} (CREE) 120 lm.W^{-1} (OSRAM)	105 lm.W^{-1} (LumiLEDs)

Tableau 4 : Récapitulatif des différentes configurations de puces et principales caractéristiques.

3.2 Différents types de boîtiers

En fonction des applications, et de la configuration de puce choisie, différents types de boîtiers seront utilisables :

- Les boîtiers dits classiques (à pattes extérieures ou à contacts traversants).
- Les boîtiers en Si ou montage direct de la puce sur la carte (COB pour « Chip On Board »).

Nous allons maintenant détailler l'architecture de ces différents boîtiers de manière à bien situer les assemblages étudiés dans ce travail de thèse. Ces derniers seront présentés de manière approfondie au chapitre 2.

3.2.1 Boîtiers classiques

a. Les boîtiers « leadform »

De manière globale, les boîtiers « *leadform* » se caractérisent par des pattes d'interconnexion extérieures au boîtier (Figure 14). Néanmoins, il existe un très grand nombre de boîtiers « *leadform* » dont le design, est souvent propre à chaque constructeur [47] [40]. La bibliographie décompose schématiquement un composant « *leadform* » en six éléments principaux [30] :

- La puce.
- Un support mécanique de puce permettant une interconnexion électrique et une dissipation thermique.
- La couche de luminophores dans le cas des LEDs blanches.
- Un encapsulant déposé sur la puce, en tant que protection contre les agressions environnementales.
- Une optique rapprochée de type lentille (optique primaire), apportant une protection mécanique et une mise en forme du faisceau.
- Des pattes d'interconnexions extérieures au boîtier qui permettront l'assemblage et l'interconnexion finale du composant sur carte.

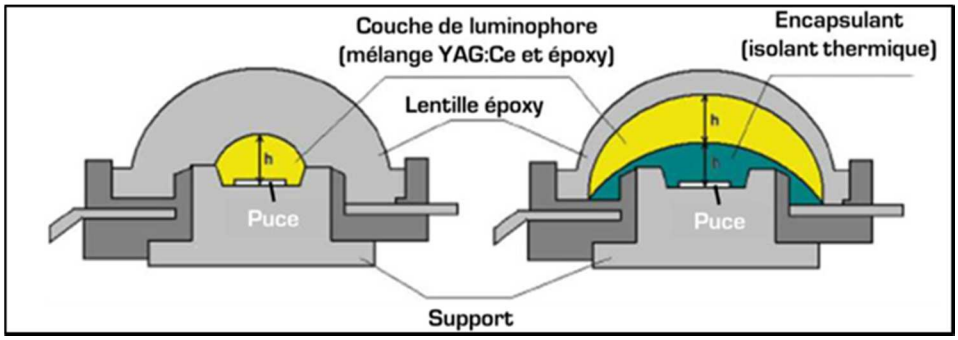


Figure 14 : Représentation schématique d'une LED blanche « *leadform* » à conversion lumineuse [48].

Le support est généralement en Cu ou dans certains cas en Al pour des raisons de coûts, principalement [49]. Cela constitue le drain thermique du composant LED et la connexion électrique en face arrière de la puce LED, qui est assurée par une brasure ou un report par collage. Typiquement la colle est un adhésif époxy chargé à l'Ag pour la conduction électrique et thermique mais reste souvent limité pour des applications de forte puissance [50]. Un câblage filaire en Au (non représenté sur la Figure 14) permet de connecter la puce LED avec les interconnexions. Un matériau polymère est surmoulé autour du drain thermique. Il permet le maintien mécanique des interconnexions extérieures et est généralement réalisé en époxy ou polymère à cristaux liquides (LCP[6] ou *Liquid Cristal Polymer*). Ce dernier présente une bonne résistance thermique (Haute température de transition vitreuse) et de très bonnes aptitudes à l'injection moulage notamment pour de la micro injection.

Selon la configuration des puces LEDs (CC, FC, VTF ou TFFC), l'intégration des connexions électriques (câblage filaire en Au ou report direct) sera donc différente.

b. *Les boîtiers « leadless »*

Dans ce type de boîtier, les interconnexions électriques vers la carte sont réalisées par des contacts traversants et non par des pattes extérieures. De ce fait, le support mécanique est isolant électrique. Les composants sont la plupart du temps montés en surface des cartes (CMS pour Composant Monté en Surface). Un schéma représentatif d'un boîtier « *leadless* » sur embase céramique est présenté en Figure 15.

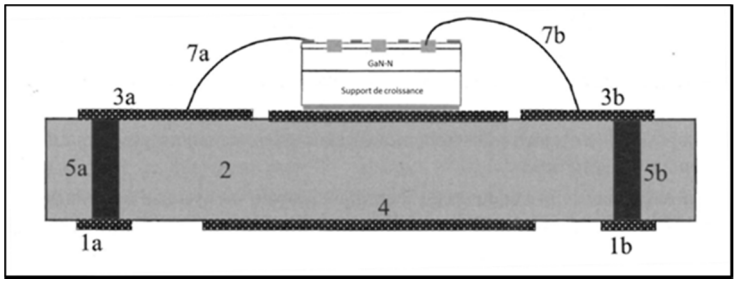


Figure 15: Exemple de composant CMS « leadless » avec un support céramique [30].

Comme dans le cas des boîtiers « *leadform* », toutes les configurations de LEDs peuvent être montées (CC, FC, VTF ou TFFC). Le support (Figure 15-2) est ici une céramique mais l'on peut également trouver des polymères dans le cas de puces de faible puissance pour des applications à bas coût. On voit très clairement que la dissipation thermique va s'effectuer à travers le support (Figure 15-2). Les supports en céramique les plus utilisés sont l'alumine (Al_2O_3) et le nitrure d'Al (AlN),

[6] LCP : Polymère à cristaux liquides présentant de très bonnes propriétés rhéologiques à l'injection.

dont les conductivités thermiques sont respectivement de 25 et 170 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [29] [30]. A titre de comparaison, le Cu présente une conductivité thermique de 400 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [30].

Les interconnexions de surface (3) et les vias (Figure 15-5) sont réalisés classiquement en Cu par dépôt en couche épaisse (50 à 100 µm). Notons que sur ce type de boîtiers, une large zone est métallisée en face arrière du composant (4) permettant le brasage ou le collage de celui-ci sur la carte pour améliorer la dissipation thermique.

Récemment, une nouvelle génération de boîtier « *leadless* » est apparue sur le marché, ce sont les composants dont le boîtier est de même dimension que la puce (CSP pour « *Chip Scale Package* ») représentée en Figure 16. Ce type de dispositif est disponible actuellement sur le marché de l'automobile. Les dimensions de ces composants permettent un montage sur carte présentant une forte densité d'intégration, compatible avec les fonctions automobile d'éclairages sélectifs ou matrices de LEDs.

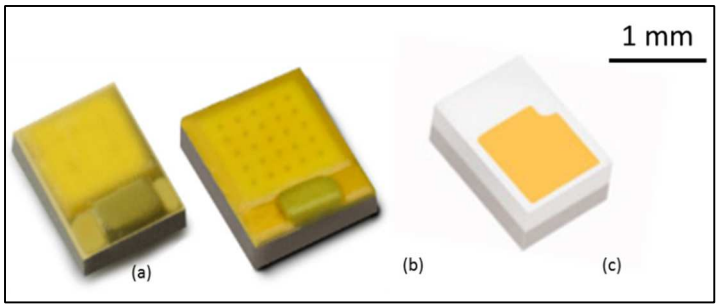


Figure 16 : Exemples de composants LEDs CSP dédiés au marché de l'automobile. Composants de la série Philips luxéon F (a,b) [51] et Osram Oslon compact (c) [13].

3.2.2 Boîtiers à haute densité d'intégration

a. Montage « Chip on Board »

Dans ce type de boîtier, on s'affranchit du montage de la puce LED sur un support, la puce est directement reportée sur la carte. Dans le cas des LEDs, cette technologie est principalement guidée par les objectifs suivants :

- L'augmentation de la compacité d'un dispositif en juxtaposant les puces interconnectées entre elles sur la carte (Figure 17-a).
- La possibilité de réaliser des matrices ou designs spécifiques, intérêt prononcé dans le domaine automobile (Figure 17-b).
- La réduction de la conductivité thermique globale en réduisant le nombre d'interfaces thermiques [50].

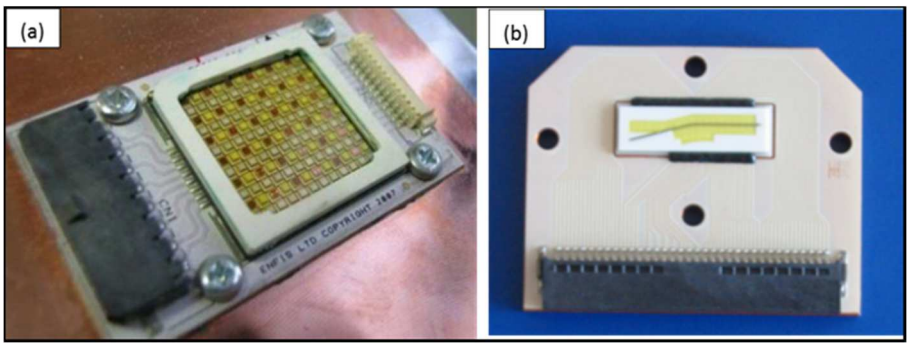


Figure 17 : Exemple de modules de LEDs utilisant la technologie « Chip On Board » : matrice de puces LEDs 1 mm² juxtaposées (a) [52] et module d'éclairage automobile pour de l'éclairage sélectif (b) [6].

Les matériaux principaux de la carte peuvent être organiques, plus précisément une résine époxy chargée en fibres de verre (PCB pour *Printed Circuit Board*) ou pour des cartes à bases métalliques (IMS pour *Insulated Metal Substrate*). Dans le cas de la technologie de type « IMS », le cœur métallique est recouvert d'une couche mince isolante électriquement, afin de construire le réseau de pistes en Cu permettant d'interconnecter les puces LEDs. Bien que le report direct de puces sur la carte présente les avantages listés ci-dessus, il impose des différences de dilatation thermique relativement plus grandes. Ainsi, pour les limiter, on se tourne vers des substrats en céramique (détail en partie 3.4.4.) permettant un meilleur accord des coefficients de dilatation thermique des matériaux engagés.

L'ensemble des propriétés physiques des matériaux classiquement rencontrés dans un composant LEDs sont présentés en annexe 1.

b. Boîtier Si

L'intégration des puces LEDs est également possible avec des boîtiers de technologie très différente comme le Si. La Figure 18 présente l'architecture d'un boîtier entièrement réalisé en Si, inspiré très fortement des technologies de structuration du Si pour les microsystèmes [29]. Dans cette optique, on réalise collectivement des cavités par gravure anisotrope permettant le report de puces LEDs (Figure 18-a-1) à l'échelle du wafer (Figure 18-b). La puce intégrée sur la figure est une puce en configuration FC. L'interconnexion entre la puce et la face arrière est obtenue par vias métalliques (4). Les plots de brasure en face arrière (5) sont prévus pour le report sur carte. Une lentille de forme simple (7) ou plus élaborée (surmoulage) peut être placée au-dessus du boîtier Si [29]. On appréciera dans ce cas l'excellente adhérence du silicone sur le Si. L'excellente compacité et une bonne conductivité thermique du Si (de l'ordre de 148 $W.m^{-1}.K^{-1}$) constituent les principaux avantages de ce type de boîtier.

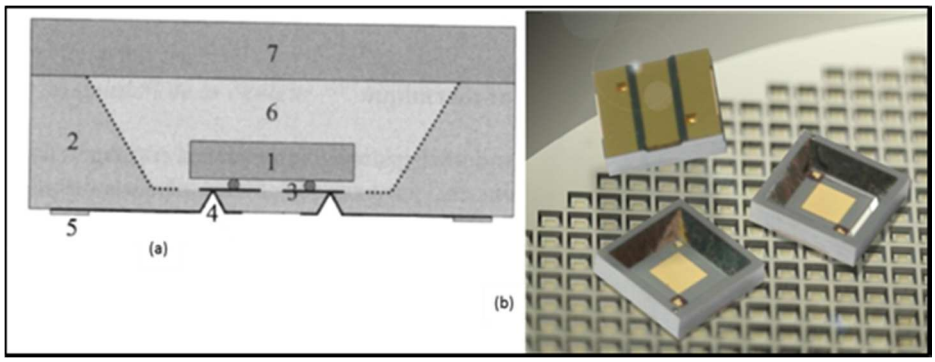


Figure 18 : Architecture d'un boîtier Si (a) [30] et photographie associée (b) [53]

3.2.3 Protection ESD

La partie active d'une puce LED n'est pas conçue pour supporter des décharges électrostatiques. Or, pendant la manipulation, montage sur carte ou via l'environnement de fonctionnement, les composants LEDs peuvent subir de très fortes tensions lors d'un ESD (pour *ElectroStatic Discharge*). Les conséquences peuvent être catastrophiques (circuit ouvert par fusion de connectique, claquage de jonction, avalanche précoce…) [54]. La plupart des composants LEDs de puissance sont munis d'une « protection ESD » qui consiste à câbler en inverse et en parallèle de la puce LED, un circuit suppresseur de tension transitoire (TVS pour « *Transient Voltage Suppressor* ») [54] [49] [29]. Le but de la protection ESD est de drainer le courant de décharge et ainsi protéger la puce LED. Le circuit de protection doit aussi être plus rapide que la puce LED en termes de temps de commutation pour ne pas solliciter la puce LED lors de l'évacuation du courant de décharge.

L'intégration du composant constituant la protection ESD peut se faire selon différents modes (Figure 19) :

- La protection peut être reportée sur le même substrat que la puce LED et connectée par câblage en Au (Figure 19-a) [29].
- Elle peut être intégrée sans câblage filaire (type CMS) de la même façon qu'une puce LED reportée en configuration FC (Figure 19-b) [51].
- Enfin, elle peut être construite et intégrée directement dans le substrat de la LED, la puce LED est montée sur sa protection ESD (Figure 19-c) [29].

Les différents types de boîtier dédiés aux LEDs de puissance se répartissent donc en deux catégories : les boîtiers *leadless* et *leadform*, largement utilisés, et les boîtiers plus avancés qui permettent des montages à plus hautes valeurs ajoutées. Nous allons nous pencher à présent sur les différentes techniques de montage de puce ; le montage dépendant directement de la configuration de puce adoptée.

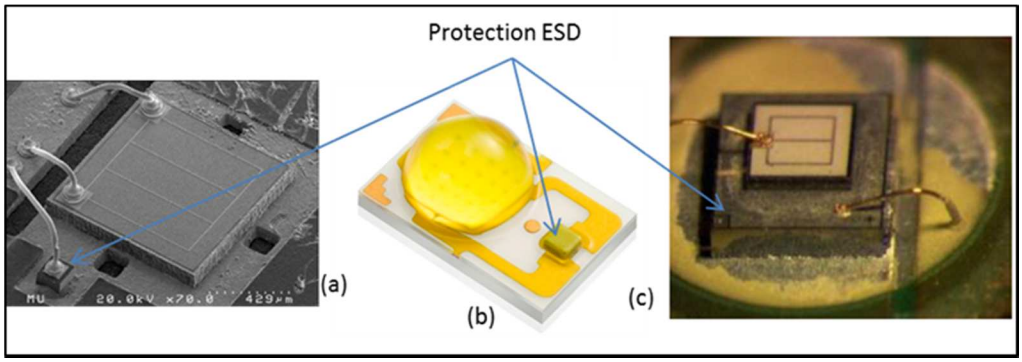


Figure 19 : Illustration de trois différentes technologies d'intégration des protections ESD appliquées au cas des LEDs : Câblée (a), intégrée sans câblage (b), en tant que support de puce LED (c). Sources respectives [55] [56] [29].

3.3 Techniques de montage des puces sur embase

3.3.1 Report de puces LEDs VTF et câblage

Nous allons aborder ici le procédé de montage de puce type VTF sur embase. Le principe de fixation reste le même que pour le montage de composants sur carte : un alliage de brasure ou colle conductrice va assurer la continuité électrique, thermique, et mécanique entre la puce et son embase. Dans un deuxième temps, nous détaillerons la technique de câblage filaire permettant de connecter l'anode de la puce (face supérieure) au circuit extérieur.

a. Fixation des puces LEDs

La puce LED VTF est montée sur embase par l'intermédiaire de la prise de contact P (« *P-electrode* »). Dans le cas présenté en Figure 20, c'est un alliage Au_{80}-Sn_{20} eutectique qui est utilisé pour fixer la puce. Contrairement au montage de composants sur carte, l'alliage n'est pas apporté sous forme de pâte mais déposé directement sur une des deux ou les deux surfaces à assembler par des techniques classiques de la microélectronique comme la pulvérisation cathodique (PVD pour *Physical Vapour Deposition*). Ce peut être également par une préforme d'épaisseur égale à 7-8 µm. Un alliage RoHS (*Restriction of the use of certain Hazardous Substances*) Sn-3.0Ag-0.5Cu est également utilisé pour le montage de puces. Il est mis en œuvre sous forme de pâte à braser [57].

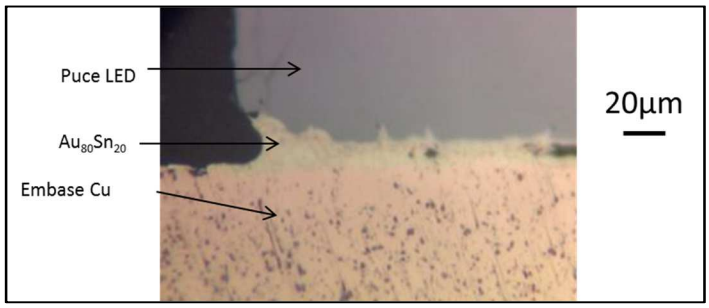


Figure 20 : Vue en coupe de la brasure d'une LED en configuration VTF [58]**.**

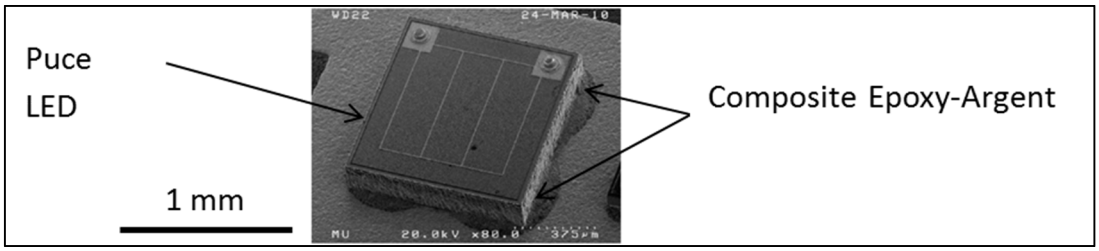


Figure 21 : Image MEB d'une vue globale d'une puce LED collée par un matériau composite Epoxy Ag [59]**.**

A la suite du dépôt de l'eutectique $Au_{80}Sn_{20}$, la puce LED est positionnée sur son emplacement et l'ensemble est porté à une température supérieure à la température de fusion de l'eutectique (280°C) grâce à un recuit adapté, afin de réaliser la brasure de la puce. L'eutectique $Au_{80}Sn_{20}$ présente un coefficient de dilatation thermique de 17.5 $ppm.K^{-1}$ et une conductivité thermique de 59 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [60].

Un autre moyen de fixer une puce LED sur son embase est de la coller grâce à des formulations composites réticulables du type Epoxy-Ag. Comme dans tous les matériaux composites, on tire parti des performances des différents matériaux pris séparément. L'époxy va assurer la cohésion mécanique et les particules d'Ag vont prendre en charge la conduction électrique et thermique du composite final. Un exemple de colle Epoxy-Ag est la colle Epotek H20E-HC, couramment utilisée pour le collage de puce LED [61].

En termes de mise en œuvre, la colle est dispensée sur l'emplacement de la puce LED, par sérigraphie ou seringue. Après report de la puce LED, l'ensemble va subir une étape de réticulation de la colle selon les paramètres temps/température recommandés par le fournisseur. Notons que la conductivité thermique de ce type de matériau composite (10.9 $W.m^{-1}.K^{-1}$) est inférieure à celle de l'alliage du type Au_{80}-Sn_{20} (59 $W.m^{-1}.K^{-1}$). La Figure 21 permet d'apprécier l'aspect d'une fixation de puce LED via un composite Epoxy-Argent. La signature d'une fixation de puce à la colle Epoxy-Argent est facilement reconnaissable (dans la majorité des cas) par de la colle qui « déborde » de la puce.

Une dernière technique de fixation de puce consiste à fritter des particules d'Ag de taille micrométrique ou nanométrique, actuellement en cours de développement chez les fabricants de LEDs [62] [63] [29] [60]. L'Ag est généralement conditionné en encre ou pâte, dispersé dans un véhicule organique à une très forte concentration massique (> 60 % Poids) [62]. Actuellement, on trouve des applications de frittage de puces LEDs en activités recherche [64]. En profitant d'une température de frittage entre 150-225 °C, bien inférieure à la température de fusion de l'Ag massif (961°C), il est possible d'obtenir des couches denses présentant une conductivité thermique de 240 $W.m^{-1}.K^{-1}$ à partir de poudre d'Ag par chauffage et application d'une pression de l'ordre de 8 $N.mm^{-2}$ [63] [64] [65] [66]. La Figure 22 permet d'apprécier les différentes étapes de frittage d'une poudre d'Ag.

On peut ainsi résumer les caractéristiques des méthodes de fixation de puce (brasage, collage et frittage) afin d'analyser les avantages et inconvénients de chacune d'entre elles (Tableau 5). Les alliages présentent une bonne conductivité thermique mais nécessitent un procédé à haute température (>220 °C) tandis que les colles composites présentent des facilités de mise en œuvre à basse température (<150 °C) mais les performances thermiques sont moins intéressantes. Concernant le frittage, cette technique de fixation à fort potentiel est actuellement en développement chez les acteurs du domaine.

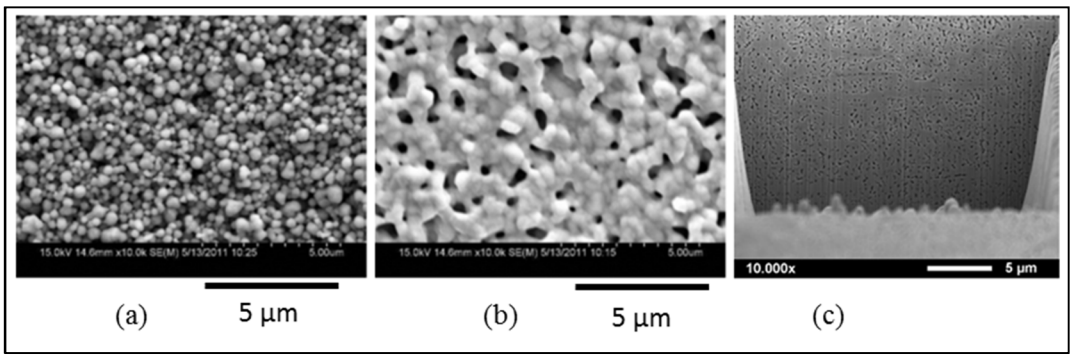


Figure 22 : Images MEB des différentes étapes chronologiques (de a à c) du frittage d'une poudre d'argent [60]**.**

Formulation eutectique / brasure	Formulation organique / colle	Formulation Argent/ Frittage
• Haute conductivité électrique • Haute conductivité thermique ($Au_{80}Sn_{20}$, 59 $W.m^{-1}.K^{-1}$ • Coût matière première élevé • Procédés hautes températures (>220 °C) • Absence de composés volatiles • Nécessite un « flux » ou d'une atmosphère contrôlée • Peut-être rigide et cassant • Certains alliages contiennent du Pb	• Electriquement conducteur ou isolant • Faible conductivité thermique (10,7 $W.m^{-1}.K^{-1}$) • Coût matière première faible • Procédés basse température (< 150 °C) • Dégazage de composés organiques • Pas de « flux » ou atmosphère contrôlée • Mécaniquement flexible • Facile à travailler • Absence de Pb dans les formulations	• Electriquement conducteur • Très bonne conductivité thermique (240 $W.m^{-1}.K^{-1}$) • Procédé haute température (225°C) • Nécessite l'évaporation du liant organique • Coût élevé en matières premières • Absence de Pb dans les formulations • Nécessité d'appliquer une pression (100 $Kg.cm^{-2}$)

Tableau 5 : Caractéristiques des principales techniques de fixation de puces LEDs [67] [66] [63] [64]**.**

3.3.1.1 Câblage filaire : rappels sur les matériaux et les techniques

Les puces LEDs du type VTF ou CC étant fixées par brasure ou collage sur leur embase, il est nécessaire de reprendre le contact supérieur (*i.e.* anode de la jonction, contact N). Le principe du câblage filaire (*Wire Bonding* détaillé en Figure 23) consiste à relier électriquement la ou les connexion(s) supérieure(s) des puces LEDs à l'embase. Le matériau utilisé se présente sous la forme de fil et peut être de différentes natures (Au, Al, ou Cu). Tandis que le Cu présente des avantages mécaniques et de conduction électrique (Tableau 6), l'industrie des LEDs met en œuvre des câblages filaires en Au essentiellement pour des raisons de fiabilité et une très bonne résistance à l'oxydation. En effet, l'assemblage mécanique Au-Au final présente un très bon comportement mécanique dans le temps mais également une très bonne résistance à l'oxydation [67].

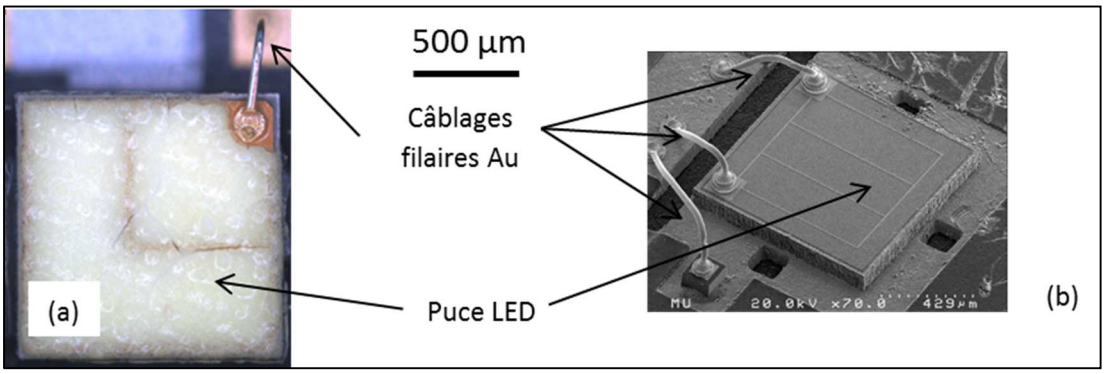


Figure 23 : Image optique (a) et Image MEB (b) d'un câblage filaire appliqué à une puce LED [58]**.**

Propriétés	Al	Cu	Au
Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	237	403	319
Point de fusion (°C)	660	1083	1064
Résistivité électrique (Ω.m)	$2,7.10^{-8}$	$1,7.10^{-8}$	$2,3.10^{-8}$
Module élastique (Pa)	$3,4.10^{10}$	$1,3.10^{10}$	$7,7.10^{10}$
Limite d'élasticité (Pa)	$1,0.10^{7}$	$6,9.10^{7}$	$1,7.10^{8}$
Résistance à la traction (Pa)	$4,5.10^{7}$	$2,2.10^{8}$	$2,1.10^{8}$
Coefficient de dilatation thermique ($ppm.°C^{-1}$)	46	16	14
Pourcentage d'élongation (%)	50	51	4

Tableau 6 : Caractéristiques des matériaux utilisables pour réaliser des câblages filaires [67]**.**

Afin de réaliser un câblage filaire entre puce et embase, il existe trois méthodes pour réaliser correctement le contact électrique coté puce (contact N) et coté embase :

- Connexion par thermocompression : nécessite une élévation de la température et une force mécanique [68].
- Connexion par ultrasons : utilisation d'ultrasons couplés à une force mécanique à température ambiante [68] [67].
- Connexion par thermosonification : association d'une élévation de température, sonification et force mécanique, utilisée pour le procédé dit « *ball bonding* » [68].

La thermocompression présente l'avantage d'avoir peu de paramètres machine à régler tout en n'endommageant pas la puce, mais son inconvénient majeur reste la nécessité d'être réalisée à haute température (> 300 °C). L'assemblage par ultrasons est effectué à température ambiante mais les réglages machine sont complexes et le procédé est difficilement automatisable. L'assemblage par thermosonification quant à lui, permet de coupler les deux techniques précédentes pour obtenir un procédé facilement automatisable à basse température mais reste assez lourd en termes de réglages machine. Les avantages et inconvénients des différentes méthodes d'assemblage sont détaillés respectivement en Tableau 7.

	Avantages	Inconvénients
Thermocompression	• Excellente fiabilité avec fil d'Au sur zone d'accueil en Au • Seulement 2 paramètres machine à optimiser • Connexion omnidirectionnelle avec le « *ball bonding* » • Dommages négligeables sur la puce	• Procédé haute température (>300°C) • Procédé sensible aux contaminants • Connexion unidirectionnelle dans le cas du « *wedge bonding* » • Formation d'intermétalliques avec fil d'Au sur zone d'accueil en Al
Ultrasons	• Peu sensible aux contaminants • Procédé à température ambiante • Pas très fins envisageables • Excellente fiabilité- fil d'Al sur zone d'accueil Al • Possibilité de connecter de gros diamètres (>2 mm) • Longueur limitée de fil	• Connexion uniaxiale seulement • Plus lent que le procédé « *ball bonding* » • Risques de dommages de la puce • Paramètres machine à optimiser • Plus difficile à automatiser que l'ultrason ou la thermocompression
Thermosonification	• Procédé à plus basse température (100-150 °C) contre 300 °C pour la thermocompression • La température permet de réduire la part énergétique apportée par les ultrasons • Réduction des risques d'endommagement des puces • Connexion omnidirectionnelle • Facilement automatisable	• Paramètres machine à optimiser • Procédé sensible aux contaminants

Tableau 7 : Caractéristiques des méthodes d'assemblage par thermocompression, ultrasons, et thermosonification [68]

En combinant les ultrasons et la température, il est alors possible de travailler à température relativement basse (150 °C) sur un procédé facilement automatisable. Cependant, la combinaison de température et ultrasons entraine un nombre de paramètres machine plus conséquent à optimiser. Le procédé « *ball bonding* » utilise cette technique d'assemblage. A l'initialisation du cycle, l'outil forme une bille d'Au par apport thermique, puis réalise l'assemblage de cette bille par thermosonification sur la zone d'accueil. Dans un second temps il réalise le second contact par procédé « *wedge bonding* » avant de former une nouvelle bille d'Au pour la connexion suivante. Cette technique de « *ball bonding* » est la plus utilisée pour la mise en œuvre de câblage de puces LEDs [29].

3.3.2 Report de puces LEDs en configuration FC

Dans cette configuration, les contacts externes de la LED (cathode et anode) sont reportés en face arrière de la puce. Les reprises de contacts se font sur des zones d'accueil métallisées de l'embase céramique. La Figure 24 présente un exemple de motif métallique (finition Au) sur céramique qui permet d'accueillir une puce LED en configuration FC.

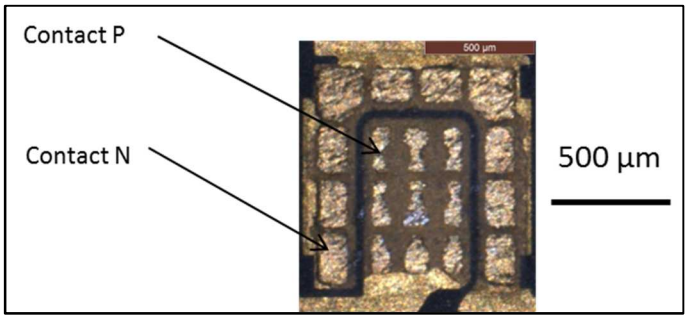


Figure 24 : Observation de motifs métalliques sur céramique, en vue d'un montage de LED en configuration FC. Composant dédié à l'automobile.

Les contacts en face arrière de la puce LED sont également métallisés Au. Après polissage des contacts des deux parties (puce et embase), la puce va être assemblée sur son embase. Cette étape d'assemblage s'effectue par la technique de la thermocompression. Une puce de 1 mm² est plaquée avec une force de l'ordre de 20 $N.mm^{-2}$ sur son embase [69]. L'ensemble, monté en température (300-350 °C), permet une interdiffusion des atomes d'Au de part et d'autre de l'interface aboutissant à la soudure de la puce sur son embase (Figure 25) [70]. La dernière étape technologique est la mise en place d'un matériau de remplissage des espaces vacants entre les plots de connexion FC et la puce (« *under filling* »). Ce matériau est constitué d'une base époxy ou silicone, généralement chargée en particules minérales. Le but est d'obtenir un matériau dont le coefficient de dilatation thermique est intermédiaire entre celui de la puce et celui de l'embase et de présenter une bonne conductivité thermique. De plus, la rigidité diélectrique de ces matériaux époxy ou silicone (respectivement 30 $kV.mm^{-1}$ et 15 $kV.mm^{-1}$) permettent d'augmenter l'isolation électrique entre les plots de connexions FC par rapport à l'air (rigidité diélectrique de 3 $kV.mm^{-1}$) [67].

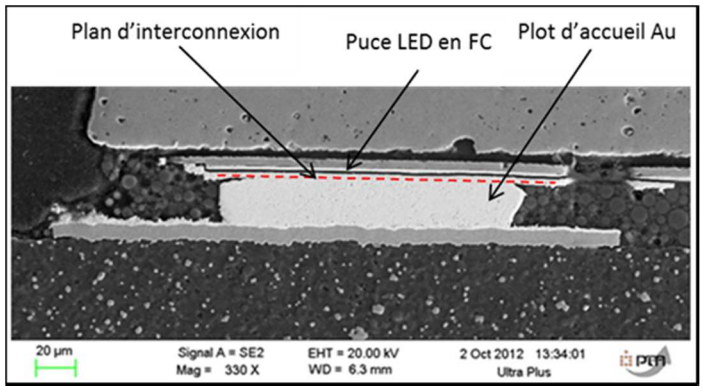


Figure 25 : Observation MEB de la tranche de l'assemblage final FC, puce LED sur son embase pour des applications automobiles.

Les techniques de montage de puces LEDs viennent d'être détaillées. Le type de montage dépend donc de la configuration de puce adoptée lors de sa fabrication. Résumons les points saillants :

- Une puce à structure VTF sera brasée sur son support puis le second contact sera réalisé par câblage filaire.
- Une puce du type FC ou TFFC sera thermocompressée sur des zones accueil métallisées prenant en charge les contacts anode et cathode.

La dernière étape consiste à protéger l'assemblage par un encapsulant silicone ou époxy qui intègre les luminophores dans le cas des LEDs blanches.

Nous allons aborder à présent la suite du procédé d'intégration constitué par le niveau « carte ».

3.4 Les circuits imprimés et leurs performances

Les circuits imprimés utilisés comme support de composants LEDs peuvent être de plusieurs types. Ils utilisent des matériaux et des procédés de fabrication plus ou moins onéreux pour des performances thermiques finales de 1 à 170 $W.m^{-1}.K^{-1}$. On identifie :

- Des circuits imprimés (PCB pour *Printed circuit Board*) à base de résine FR4 (*Flame Resistant serie 4*) et d'autres à base de métal (IMS :*insulated Metal Substrate*).
- Des circuits imprimés flexibles (FPC pour *Flexible Printed Circuit*).
- Des substrats en céramique (DBC pour Direct Bonded Copper) présentant de très bonnes performances dédiées aux applications à hautes valeurs ajoutées.

Après avoir détaillé les différentes technologies de circuits imprimés dédiées aux LEDs, un tableau récapitulatif des différents circuits imprimés utilisables pour les LEDs sera dressé.

3.4.1 Report de composants sur carte

La brasure de composant ou plus généralement « montage de composant » est très largement utilisée en électronique afin de réaliser un montage de composant sur carte. La qualité et les performances de cette fixation sont primordiales car celle-ci prend en charge les fonctions vitales du composant, à savoir :

- La ou les connexion(s) électrique(s) entre la puce et son support.
- La dissipation thermique de la puce.
- Le maintien mécanique entre les deux surfaces métalliques (coté puce et substrat).

Nous verrons qu'il existe de nombreux matériaux utilisables pour réaliser cette fixation. Dans l'automobile, on retrouve les alliages métalliques eutectiques à base de Pb (60Pb-40Sn) ou sans Pb (Sn-3.0Ag-0.5Cu), dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 8.

On peut trouver également les matériaux composites polymère-métal qui présentent des températures de mise en œuvre plus basses.

Les matériaux dédiés à la fixation de composants sur carte se présentent sous la forme de pâte à braser (composite contenant l'alliage et un liant désoxydant) ou colle, ce qui permet aisément des applications sur des surfaces de formes variées. D'autre part, le caractère visqueux de ces matériaux permet de placer les composants et de les maintenir à leur place sans utiliser d'adhésifs supplémentaires avant d'établir les connexions définitives (brasage d'un alliage ou réticulation de la colle).

L'étape de refusion se déroule dans un four à passage permettant d'établir un profil de température donné afin de braser les composants. Ce profil de température est généralement divisé en trois phases :

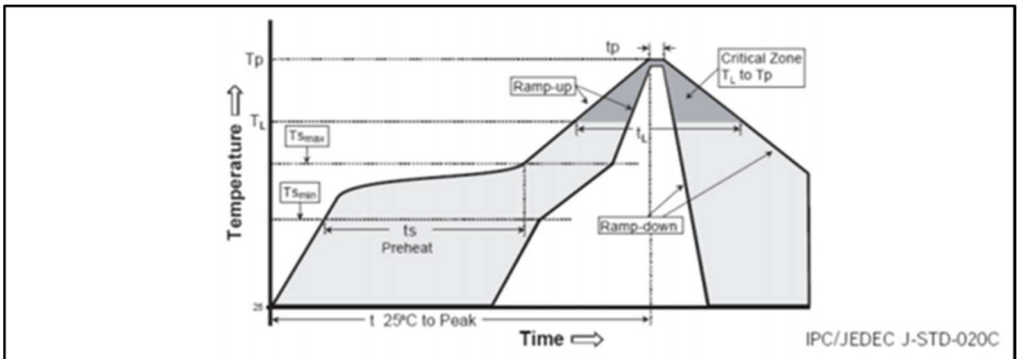
- Le préchauffage, qui permet d'homogénéiser la température des composants et de la carte.
- Le pic de refusion, au cours duquel l'alliage de brasure est fondu.
- Le refroidissement contrôlé pour un retour progressif à température ambiante.

Cette étape de refusion est cruciale et conditionnera en partie la durée de vie du composant. En effet, un profil de refusion non optimisé pourra endommager d'un point de vue thermomécanique certains matériaux du composant ou de la carte et laisser de fortes contraintes mécaniques dans l'assemblage final.

L'exemple type de profil de refusion applicable à des composants LEDs [71] est illustré en **Figure 26**.

Composition de l'alliage	Sn-3.0Ag-0.5Cu « SAC 305 »	60Pb-40Sn
Point de fusion	217-219 °C	183 °C
Etalement (mouillabilité) de l'alliage	79 %	92 %
Allongement	46 %	56 %
Résistance à la traction	53,5 $N.mm^{-2}$	56 $N.mm^{-2}$
Module d'Young	41,6 GPa	25,8 GPa
Gravité spécifique	7,4	8,4

Tableau 8 : Principaux alliages de brasure utilisés en automobile [65] [72].



Profile Feature	Lead-Based Solder	Lead-Free Solder
Average Ramp-Up Rate (Ts_{max} to Tp)	3 °C/second max.	3 °C/second max.
Preheat: Temperature Min (Ts_{min})	100 °C	150 °C
Preheat: Temperature Max (Ts_{max})	150 °C	200 °C
Preheat: Time (ts_{min} to ts_{max})	60-120 seconds	60-180 seconds
Time Maintained Above: Temperature (T_L)	183 °C	217 °C
Time Maintained Above: Time (t_L)	60-150 seconds	60-150 seconds
Peak/Classification Temperature (Tp)	215 °C	260 °C
Time Within 5 °C of Actual Peak Temperature (tp)	10-30 seconds	20-40 seconds
Ramp-Down Rate	6 °C/second max.	6 °C/second max.
Time 25 °C to Peak Temperature	6 minutes max.	8 minutes max.

Figure 26 : Caractéristiques d'un profil de refusion préconisées pour des LEDs [71]**.**

3.4.2 Les technologies de substrat

a. Le substrat PCB

Les substrats PCB peuvent avoir plusieurs appellations, mais on les trouve plus couramment sous le nom de « *FR4 based board* », la résine FR4 étant le matériau classiquement utilisé pour les circuits imprimés [65] [67].

Comme le montre la Figure 27, ils sont structurés selon une configuration sandwich intégrant la résine FR4 (composite époxy/fibres de verre) entre deux couches de Cu. Cette technologie de substrat est la solution qui offre une dissipation thermique très modeste (1-2 $W.m^{-1}.K^{-1}$) pour un faible coût de production, autour de 5 $\$.dm^{-2}$ [73].

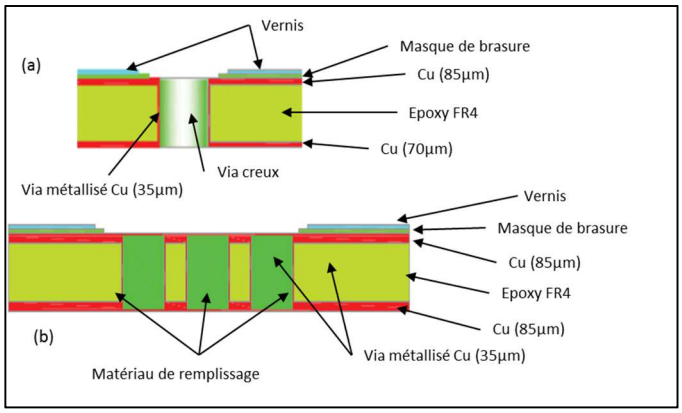


Figure 27 : Structure de deux circuits imprimés et métallisés double face avec simple via (a) et via rempli (b) [74]

b. Le substrat IMS

Un substrat IMS est constitué d'un cœur métallique généralement en alliage Cu ou Al ou à bas coefficient de dilatation) recouvert d'une mince couche d'isolation électrique polymère (polyimide, époxy…) [74]. La structure globale est présentée en Figure 28. La couche d'isolation électrique

polymère est souvent chargée en particules minérales pour augmenter la conductivité thermique et réduire le coefficient de dilatation thermique [65]. Enfin, un réseau de pistes en Cu permet l'interconnexion entre les puces LEDs. Les meilleures performances thermiques en conductivité sont de l'ordre de 5 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Ce type de substrat est actuellement utilisé pour le montage de composants LEDs CMS (généralement mono-puce) pour les applications de puissance en automobile.

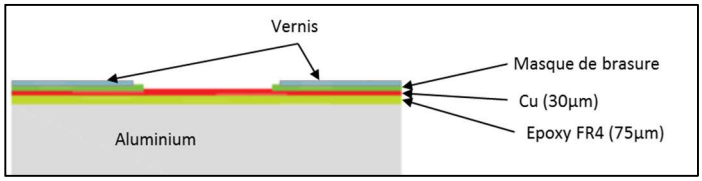


Figure 28 : Structure d'un substrat IMS sur une base Al.

c. *Le substrat FPC*

Le substrat FPC se caractérise par son caractère mécaniquement souple. La structure de ce type de substrat se résume à un substrat IMS sans sa base métallique [75]. Il est constitué d'une base polymère de type polyimide avec un réseau de pistes Cu pour l'interconnexion des puces LEDs. L'ensemble est ensuite laminé ou collé sur le produit final. Une variante de ce type de substrat intègre la base métallique mais de manière discontinue pour avoir une chaine de substrats IMS reliés mécaniquement par la nappe flexible, constituée de pistes en Cu sur polyimide (PI).

Cette solution est généralement utilisée pour faciliter l'intégration des composants LEDs dans le produit final. L'application typique en automobile se focalise sur les sources qui sont intégrées en volume (Figure 29). L'optique d'accueil des LEDs ne permet pas l'intégration d'un substrat plan. Les performances en termes de conduction thermique sont cependant assez médiocres (1-3 $W.m^{-1}.K^{-1}$).

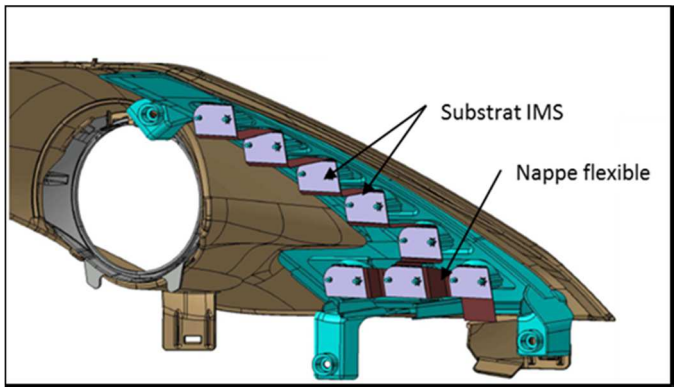


Figure 29 : Application automobile d'un substrat FPC : Schéma d'un DRL de véhicule [75].

d. *Le substrat DBC*

Les substrats céramiques DBC permettent d'obtenir les meilleures performances thermiques. On peut trouver des substrats à base d'alumine (Al_2O_3) permettant d'atteindre une conductivité thermique voisine de 25 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Avec le nitrure d'Al (AlN), on peut obtenir des conductivités thermiques de l'ordre de 170 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [65]. La structure de ce type de substrat est simple. De par le caractère isolant électrique des céramiques, le report des composants LEDs nécessite uniquement la présente d'un réseau de pistes conductrices électriquement en surface de la céramique. Une image de ce type de substrat est présentée ci-dessous (Figure 30).

Notons que dans le domaine automobile, les substrats DBC sont très majoritairement utilisés en électronique de puissance [67] mais ne sont pas envisagés dans la dissipation thermique des LEDs.

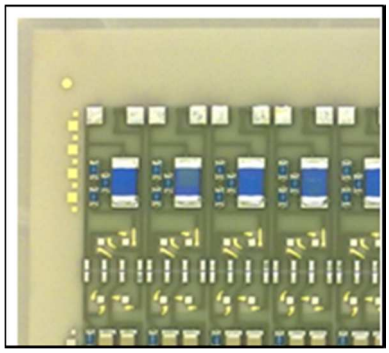


Figure 30 : Exemple de substrat DBC avec composants montés en surface [73].

3.4.3 Performances des différents substrats

Le Tableau 9 résume et confronte les principales caractéristiques des substrats utilisables pour des composants LEDs. On constate que les meilleures performances thermomécaniques (conductivité thermique et coefficient de dilatation thermique) sont atteintes en se tournant vers les substrats en céramique (faible coefficient de dilatation thermique et forte conductivité thermique). Cependant, ils sont très onéreux (50-70 $.dm^{-2}), et seront réservés aux applications spécifiques [73]. De plus, les applications nécessitant une certaine conformabilité du substrat devront se tourner vers les substrats FPC (Figure 29).

En résumé, si des besoins de conformabilité sont identifiés par le design, on s'orientera vers une solution FPC. Si la compacité est prioritaire, un substrat du type DBC sera utilisé, alors que pour les autres besoins, les substrats IMS et PCB classiques seront mis en œuvre.

Ce bref aperçu des performances des différents substrats utilisables pour le montage de composants LEDs permet de clôturer la description approfondie sur le procédé de fabrication et d'intégration d'une source lumineuse solide, de l'état de l'art des technologies LEDs GaN pour des applications automobiles à forte puissance jusqu'aux structures des composants et des assemblages associés à ce domaine. Nous allons à présent décrire les possibles évolutions des caractéristiques de ces composants au cours du temps ainsi que les principaux modes et mécanismes de défaillance des LEDs blanches.

Type	Conductivité thermique (W.m^{-1}.K^{-1})	Coefficient de dilatation thermique (ppm.K^{-1})	Coût ($.dm^{-2})	Conformabilité
PCB classique	1-2	18	5	nulle
IMS	5	30	10	nulle
FPC	1-3	30 (avec substrat métallique), 20 (Polyimide seul)	5	Bonne (avec substrat métallique) voire excellente (sans substrat métallique)
Céramique (DBC)	25-170	5-7	50-70	nulle

Tableau 9 : Comparaison des caractéristiques physiques des différents types de substrats [73] [67] [65]**.**

4 Modes de défaillance des LEDs blanches et mécanismes associés

A ce stade, un bilan des différents mécanismes de défaillance au sein des structures de base émissives d'une part et des modules d'autre part doit être effectué. En parallèle, les techniques d'analyses de défaillance les plus utilisées, permettant d'identifier et de localiser les défauts, seront rappelées brièvement. Cet ensemble d'informations permettra de positionner notre travail en s'attachant à démontrer que les analyses thermiques et électro-optiques peuvent être des outils d'évaluation pertinents des défaillances de composants multi-puce.

Avant de détailler les mécanismes de défaillances possibles, il est important de présenter les différents modes de défaillance d'une LED blanche. Il existe deux catégories de modes de défaillance possibles : le mode catastrophique et le mode graduel. Chacun d'entre eux présentant plusieurs typologies caractéristiques de défauts :

- Défaillance catastrophique :
  - Composant en circuit ouvert.
  - Composant en court-circuit partiel ou global.
- Défaillance graduelle :
  - Dégradation du flux lumineux.
  - Dérive colorimétrique.
  - Dérive des paramètres électrique ou thermique.

4.1 Mécanismes de défaillance et facteur d'aggravation des LEDs de puissance

4.1.1 Mécanismes intrinsèques

Un des points clés de la durée de vie et des performances des LEDs blanches réside en la qualité des couches épitaxiées. Des défauts générés lors de la croissance des couches sont généralement de deux types : les défauts d'interface et les défauts de volume [54]. A. UDDIN a montré par des caractérisations fines au microscope électronique en transmission (TEM), que les défauts cristallins sont généralement concentrés au niveau des contacts N et P, ainsi que dans la zone active de LED [76]. **La présence ou la formation de défauts cristallins** va conduire à une diminution du rendement quantique interne de la puce. De par leur présence, un déséquilibre local des paires électron-trou va s'établir, et la génération de phonons va être facilitée notamment pour des sollicitations à fortes densités de courant. Ce point a été mis en lumière par G. MENEGHESSO et Al. [77]. L'émission de phonons entraine des vibrations atomiques dans le cristal telles qu'elles peuvent aboutir à des migrations d'éléments et/ou la création ou déplacement de dislocations.

Le mode de défaillance associé va être une réduction du flux lumineux de la LED suite aux recombinaisons non-radiatives plus nombreuses [38]. En termes de caractérisations électriques, ce mécanisme pourra être mis en évidence par une augmentation du courant de fuite de la LED en polarisation inverse, en relation avec une augmentation de la concentration de défauts. Par ailleurs, une augmentation de la résistance série R_s de la puce pourra être constatée en association à une dégradation des contacts (N ou P).

La diffusion des dopants est également un mécanisme qui aboutit à une réduction des performances de la puce. Classiquement, pour le P-GaN, le Mg est utilisé en tant qu'accepteur d'électrons afin de faciliter l'injection du courant dans la puce LED. L'influence du dopage a été étudiée par K. KOHLER et Al. à travers une étude de profil de dopage de Mg au voisinage d'une structure à puits quantiques [78]. Ils ont montré que le Mg au voisinage des zones actives améliorait

le rendement quantique. Cependant, un trop fort dopage aboutissait à des recombinaisons non radiatives et une baisse du rendement quantique. Coté N-GaN, c'est le Si qui est introduit durant le procédé d'épitaxie en tant que dopant N. Lorsque le Mg diffuse dans la région active de la puce LED (puits quantiques) durant la croissance de la couche P-GaN, sa présence peut entraîner une diminution du rendement quantique interne de la LED en jouant le rôle de centre de recombinaisons non-radiatives [78].

En fonctionnement, ce phénomène de diffusion des dopants va être activé thermiquement, par une forte densité de courant ou une mauvaise répartition du courant, résultant en une température moyenne de jonction élevée.

Le mode de défaillance associé sera donc une dégradation du flux lumineux, préférentiellement près des points chauds (câblage filaire ou via). Il sera possible de mettre ce phénomène en évidence par une perte d'efficacité de la LED et l'augmentation de la tension de seuil V_{th} par des caractérisations I(V).

4.1.2 Mécanismes extrinsèques

Un composant LED étant un assemblage de couches présentant des différences de coefficients de dilatation thermique (CTE pour *Coefficient of Thermal Expansion*) plus ou moins prononcées, les chocs thermiques et/ou les cycles thermiques appliqués à un composant LEDs peuvent aboutir à une **fissuration de la puce LED**. Une fissuration peut être facilitée par des dislocations et divers défauts cristallins ou défauts aux interfaces [79]. Ces cycles thermiques sont appliqués au cours de la vie du composant mais également lors de sa fabrication (croissance des couches par épitaxie). En effet, les désaccords de paramètres de maille entre les différentes couches peuvent aboutir à des dislocations voire des fissures lors des cycles thermiques en utilisation, mais également lors du retour à température ambiante des couches actives épitaxiées depuis les hautes températures de croissance autour de 1000°C [80] [34]. E. SUHIR a montré que les contraintes résiduelles dues aux désaccords de paramètre de maille entre le GaN et un substrat de croissance (SiC) étaient supérieures aux contraintes thermomécaniques lors du retour des couches à température ambiante [81]. En fonctionnement, compte tenu de la différence des propriétés thermomécaniques des matériaux utilisés (CTE principalement, mais également module de Young et coefficient de poisson), la puce LED peut être sujette à une contrainte mécanique forte sous forte densité de courant. Une mauvaise répartition du courant peut entrainer de forts gradients de température et ainsi solliciter thermo-mécaniquement la structure. En fonction du matériau utilisé en tant que substrat d'épitaxie, la puce GaN peut être sollicitée différemment. Deux exemples sont illustrés en Figure 31, sur Si et Saphir.

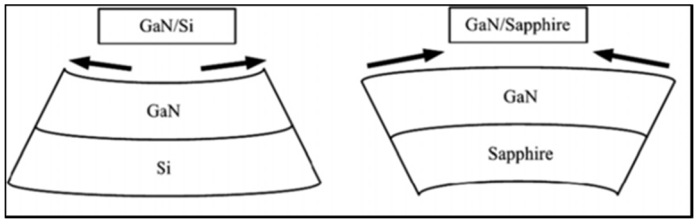


Figure 31 : Illustration des comportements thermomécaniques appliqués aux assemblages par hétéroépitaxie GaN/Si et GaN/saphir [54].

Généralement, le mode de défaillance associé à une fissure de puce GaN est une dégradation du flux lumineux et/ou une défaillance complète de la LED. La propagation d'une fissure dans la puce GaN pourra isoler électriquement une partie de la surface de la puce. Ce mécanisme de défaillance sera mis en évidence par une observation MEB (présence de fissure) ou une analyse optique sur le composant en fonctionnement (présence d'une zone à émission réduite). D'autres techniques non

destructives pourront être proposées comme l'évolution du R_s par mesure I(V) si une partie de la puce est isolée électriquement. R_s augmentera si la surface disponible pour le passage du courant diminue. La qualité de la découpe des puces lors du procédé de fabrication sera capitale afin de réduire la probabilité d'avoir une amorce de fissure, notamment en bord de puce.

Une sur-sollicitation électrique (EOS pour *Electrical Over Stress*) est une utilisation électrique anormale d'un composant. Il en existe deux types :

- Une ESD se caractérise par l'application d'une décharge électrique très brève sur le composant. Cette décharge peut atteindre plusieurs kV. Dans le sens direct, elle peut ne pas avoir de conséquences immédiates sur le bon fonctionnement d'une LED, mais la structure peut être endommagée. L. TREVISANELLO a mis en évidence la dégradation du contact N sur une structure verticale suite à un ESD [82]. En inverse, les caractéristiques électriques inverses d'une LED sont dépendantes des matériaux. Les dégâts infligés par un stress ESD seront dictés par l'énergie contenue dans la décharge, et les géométries adoptées [54] [83]. La solution de protection est de placer un organe nommé « protection ESD » en parallèle de la LED comme explicité en partie 3.2.3.
- Une sur-sollicitation électrique continue de la LED. L'exemple type est une densité de courant supérieure à la densité de courant admissible par la puce et appliquée en continu. Dans ce cas, une partie du chemin électrique va jouer le rôle de fusible (câblage filaire dans le cas d'une puce VTF) suite à un échauffement local intense et le mode de défaillance est généralement un circuit ouvert [84].

4.2 Mécanismes de défaillance et facteur d'aggravation des assemblages à LEDs de puissance

4.2.1 Electromigration

L'électromigration est un phénomène lié au mouvement d'atomes métalliques activé électriquement par un flux d'électrons. Les valeurs typiques de densité de courant permettant l'électromigration sont difficiles à estimer. Dans les LEDs, il se situe majoritairement au niveau du contact électrique de la puce (contacts N et P) et lorsque la répartition du courant n'est pas optimisée (fort courant). Physiquement, ce mouvement est activé par le passage du courant, fonction de la densité de courant et de la thermique engendrée. Au cours du fonctionnement de la LED, les atomes métalliques diffusent depuis le contact P à travers la jonction créant progressivement une avancée d'atomes métalliques selon la même direction que celle du courant. D. L.BARTON et al. ont montrés par analyses électroniques et comparaisons que l'électromigration se propage majoritairement le long des dislocations de la structure GaN [85].

En termes de mode de défaillance, l'électromigration peut aboutir dans un premier temps à une diminution du flux lumineux de la LED et à terme, conduit à la mise en court-circuit de la puce. H. KIM a mis en évidence le développement de taches sombres à la surface de l'électrode supérieure suite à l'électromigration des composés métalliques provenants du contact P de la structure [86]. D'un point de vue électrique, la caractéristique I(V) mettra en évidence une augmentation des courants de fuite en direct et en inverse jusqu'à un court-circuit potentiel de la puce.

4.2.2 Interdiffusion des contacts électriques

C'est un phénomène thermiquement activé. Ce phénomène se différencie de l'électrodiffusion par le fait que le contact électrique se dégrade au cours du temps soit par perte ou apport de matière.

Différentes études ont été menées sur la fiabilité de contact P-GaN se traduisant par une mise en évidence de modifications des caractéristiques I(V) de jonctions dues à une interdiffusion dans les contacts électriques [77] [87]. La diffusion des espèces métalliques (apport ou déficit) conduit à une augmentation des résistances de contact (moins de métal) ou formation de composés intermétalliques dans le cas d'un apport de matière. Une réduction de l'efficacité lumineuse sera observable.

En termes de caractérisation du mécanisme, l'interdiffusion dans les contacts électriques sera mise en évidence par une diminution de la tension de seuil du composant V_{th} et à terme, d'une augmentation de la résistance série R_s de la puce.

4.2.3 Fracture du câblage filaire

Le câblage filaire est une des solutions pour connecter une puce LED VTF ou CC fixée sur son boîtier. Lorsque les LEDs sont exposées à de forts courants ou des courants transitoires, le câblage filaire peut agir comme un fusible [84]. Ce mécanisme aboutit à l'ouverture du câblage filaire et la cause peut être un EOS.

Un autre mécanisme est la fatigue mécanique du contact terminal à savoir la bille du câblage filaire pour un câblage du type « ball bonding ». Des cycles thermiques de grande amplitude appliqués à un composant LEDs peuvent rapidement aboutir à une défaillance. La dilatation thermique des encapsulants placés sur la puce LED peut exercer une force de traction sur la bille de contact (Figure 32-a). Cette force exercée dépendra bien sûr du coefficient de dilatation thermique de l'encapsulant, de sa reprise d'humidité, de son module d'Young, de la dureté de la puce et également de la qualité de l'adhérence de la bille de contact sur la puce LED.

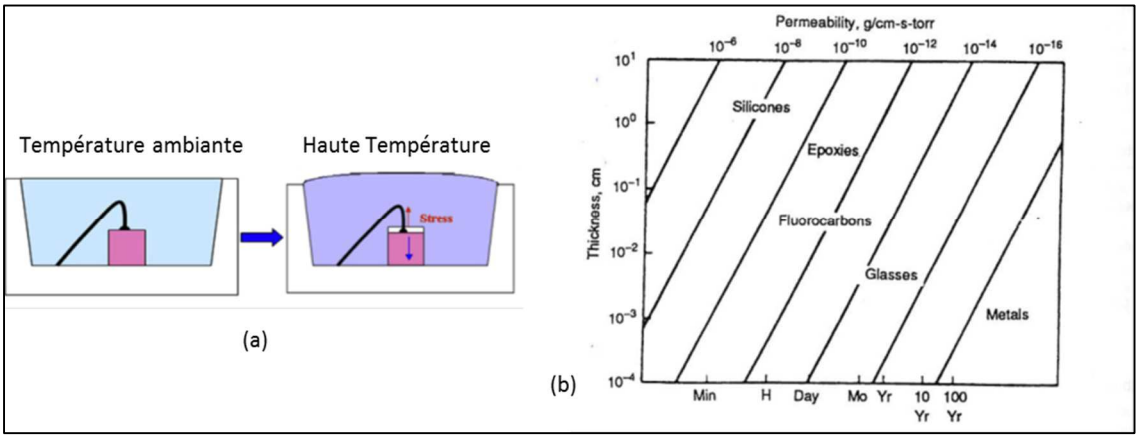


Figure 32 : Illustration de la contrainte appliquée au câblage filaire d'une LED par dilatation thermique (a) ou reprise d'humidité des encapsulants (b) [54].

La défaillance apparaît lorsque la contrainte thermomécanique est supérieure à la force d'adhérence de la bille de contact. La valeur typique de force à l'arrachement d'un câblage filaire en Au de 38 µm de diamètre par *ball bonding* Au-Au est de 80 g [88]. La plupart du temps, la fracture apparaîtra progressivement par propagation de fissures au cours des cycles thermiques à l'interface bille de contact puce, mais également juste au-dessus de la bille où il peut y avoir un rétrécissement local du diamètre du fil lors de la réalisation du câblage (striction).

Une exposition prolongée à l'humidité des composants LEDs peut également aboutir à une fatigue du câblage filaire. En absorbant l'humidité, l'encapsulant gagne du volume et applique une contrainte mécanique sur le câblage filaire. Les encapsulants du type silicone présentent de fort taux de reprise d'humidité et de perméation à l'humidité (Figure 32-b) [89]. Le mode de défaillance pour

ce type de mécanisme sera donc brutal par ouverture du câblage filaire. Un fonctionnement intermittent peut également être observé pour ce mécanisme de défaillance.

4.2.4 Dégradation de la brasure de puce

Les cycles thermiques appliqués à une LED peuvent entraîner une **délamination ou fissure de la brasure de puce**. La séparation mécanique de deux ou plusieurs couches de matériaux traduit une mauvaise adhérence ou cohésion des matériaux entre eux. Cette délamination peut être constatée entre la puce et le matériau de brasure/collage ou entre le matériau de brasure/collage et le support [54].

Le mode de défaillance relié à une délamination est généralement une perte de flux lumineux de la LED et à terme un circuit ouvert [31]. La délamination va entraîner une augmentation de la résistance thermique globale, donc une hausse de la température de jonction, réduisant ainsi la durée de vie de la LED. La délamination peut être amorcée durant la fabrication de la LED, par une contrainte mécanique, des contaminations aux interfaces ou la présence de poussières lors du report de puce. Une délamination pourra être mise en évidence indirectement par analyse thermique transitoire (T3ster®) permettant de déterminer la résistance thermique globale [90] ou par une cartographie infra rouge (IR) en fonctionnement permettant de visualiser une zone chaude potentiellement délaminée [91].

Lors de l'assemblage de la puce LED sur son boîtier, une mauvaise maîtrise du procédé de refusion peut conduire à des **cavités emprisonnées sous la puce**. Ces cavités auront un impact direct sur les performances thermiques globales de la LED avec une augmentation de la résistance thermique. Une cavité pourra être mise en évidence par microscopie acoustique ou thermographie IR si cette cavité a une influence significative sur la résistance thermique de l'assemblage [54].

Notons que ces types de mécanisme peuvent également avoir lieu au niveau de la brasure sur carte. Un exemple de fissure est donné dans l'épaisseur de la brasure au niveau carte (Figure 33).

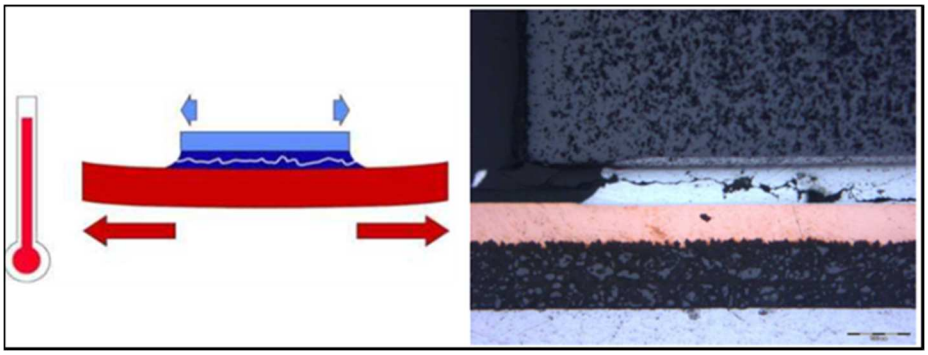


Figure 33 : Mise en évidence d'une fissure de brasure par microscopie optique [18] [64].

4.2.5 Jaunissement de l'encapsulant

Les LEDs sont encapsulées pour les protéger des chocs mécaniques, des contraintes thermiques et de la corrosion par voie humide. Les encapsulants du type époxy ou silicone sont les plus utilisés. Les résines époxy présentent l'avantage d'être très rigides avec une température de transition vitreuse T_g autour de 100 °C, grâce à une forte densité de réticulation au sein du réseau chimique 3D [92]. L'inconvénient majeur de l'époxy est que ce type de résine est sujet à un vieillissement physique assez prononcé face aux radiations et en température. Ce vieillissement physique se traduit par une scission des chaines moléculaires du polymère et une recombinaison des radicaux libres. Cela aboutit à un jaunissement de l'encapsulant époxy par formation de groupement chimique absorbant dans le visible (cycles aromatiques). L'utilisation de silicone en tant qu'encapsulant a été une alternative

efficace à la fois pour améliorer partiellement la stabilité thermique et chimique ainsi que pour donner une certaine souplesse à l'encapsulant. Cependant, les silicones ont d'autres inconvénients comme une T_g basse (-30 °C), un coefficient de dilatation thermique important et une faible affinité chimique avec les polymères des boîtiers classiques [54].

Le mode de défaillance associé à ce mécanisme est une perte du flux lumineux de la LED et une dérive de couleur. Le jaunissement de l'encapsulant pourra être mis en évidence qualitativement par observation visuelle (lors de fort jaunissement, comme illustré en Figure 34) ou par caractérisation chimique du matériau (la spectroscopie IR en réflexion est un exemple) afin de constater l'apparition de nouvelles liaisons chimiques dans le matériau.

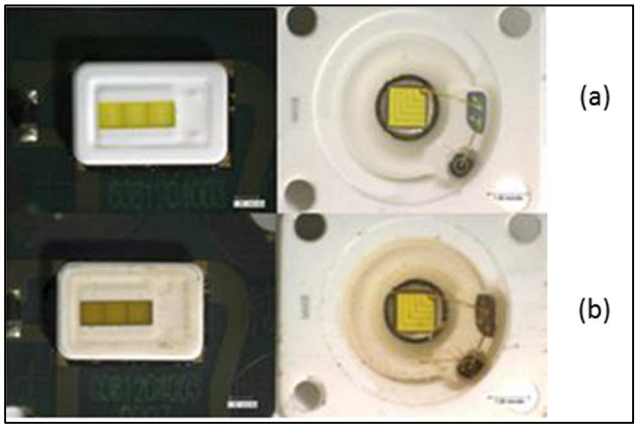


Figure 34 : Exemple de jaunissement de l'encapsulant de deux composants LEDs utilisés en automobile [18].

4.2.6 Carbonisation de l'encapsulant

La carbonisation de l'encapsulant polymère à la surface de la puce LED aboutit à la formation d'un chemin conducteur à la surface de la puce via l'encapsulant dégradé. D'une manière générale, l'encapsulant va se carboniser suite à une sollicitation thermique locale et très intense. Typiquement, cela se situe à proximité d'un câblage filaire. Lors des sollicitations fortes en courant, le câblage filaire peut atteindre des températures de l'ordre de 200 °C, pouvant carboniser localement l'encapsulant [92].

Le mode de défaillance associé sera une perte du rendement lumineux du composant. On pourra mettre en évidence une carbonisation avancée d'encapsulant par observation visuelle (zone sombre). Electriquement, il en résulte des courants de fuite plus importants du fait du chemin électrique créé dans l'encapsulant, et ce, en régime de polarisation directe et en inverse. Dans des conditions sévères, un tel mécanisme de défaillance peut conduire à la mise en court-circuit de la jonction de la LED.

4.2.7 Fissure de la lentille

Les composants LEDs de puissance sont munis d'un encapsulant permettant entre autre, d'intégrer les luminophores de conversion lumineuse. Au-dessus de cet encapsulant, on trouve une lentille formée permettant de réaliser une mise en forme primaire du faisceau (appelée optique primaire). Plusieurs matériaux sont envisageables pour réaliser cette optique primaire (silicone et époxy). Mais on peut également rencontrer le polymethylmethacrylate (PMMA), polymère thermoplastique transparent. Au cours de la vie de la LED, ces matériaux vont subir des contraintes thermomécaniques. Cela pourra aboutir à une fissuration de la lentille de la LED. Philips LumiLEDs a constaté que les chocs thermiques répétés (plus de 200 cycles) appliqués aux composants LEDs (-

40/120 °C) avec un temps de transfert inférieur à 20 secondes pouvaient aboutir à une fissure des lentilles en résine époxy [79].

De manière générale, ce mécanisme de défaillance se traduira par une réduction du flux lumineux due aux multiples réflexions internes dans les fissures. La microscopie optique permettra de mettre en évidence ce type de mécanisme de défaillance.

4.2.8 Diminution du rendement optique des luminophores

La diminution du rendement des luminophores est liée au fait que leur efficacité diminue intrinsèquement avec l'augmentation de la température. Les LEDs blanches pour l'éclairage général, ainsi que pour l'automobile, produisent une lumière blanche par conversion grâce aux luminophores. Il existe une grande variété de luminophores en termes d'efficacité de conversion de longueur d'onde (généralement « up-conversion ») et il est ainsi possible d'obtenir différents types de lumière blanche. On trouvera du blanc froid (>6000 K), blanc neutre (4800 K), ou blanc chaud (<3000 K). Au cours de la vie de la LED, l'efficacité des luminophores va diminuer du fait de leur sensibilité à des températures élevées et à l'humidité [54].

Le mode de défaillance associé à ce vieillissement des luminophores sera une dérive colorimétrique du composant LED et une perte du rendement lumineux. Cette évolution sera mise en évidence par un suivi des paramètres spectrophotométriques.

4.2.9 Délamination de l'encapsulant

Dans cette partie, nous traitons des délaminations possibles à l'échelle du boîtier. Dans ce contexte, les encapsulants utilisés dans les LEDs actuelles sont majoritairement à base de silicone. Comme nous l'avons vu précédemment, le silicone apporte certains avantages vis-à-vis de l'époxy, mais présente généralement une adhésion médiocre sur les boîtiers polymères. Par conséquent, les sollicitations thermomécaniques, pourront entraîner la délamination entre l'encapsulant silicone et le boîtier (Figure 35).

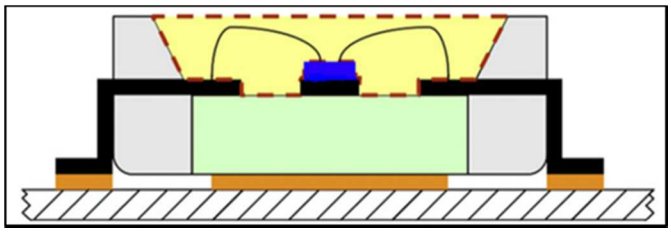


Figure 35 : Encapsulant placé sur la LED (jaune) et surface de délamination envisageable (tracé pointillé) [54].

Le mode de défaillance associé sera une diminution du flux lumineux en sortie du composant LED. La délamination du silicone conduisant à un nombre supérieur d'interfaces optiques vers l'espace libre, les réflexions internes sont alors accentuées. Ce phénomène fait baisser le rendement d'extraction optique. Ce décollement de l'encapsulant pourra être mis en évidence par analyses photométriques et observations au microscope optique.

4.3 Synthèse des mécanismes de défaillance de LEDs

Le tableau bilan ci-dessous permet de résumer l'ensemble des mécanismes de défaillance au sein d'une LED blanche et établit les liens entre les modes et les mécanismes physiques de défaillance possibles. Les moyens d'analyse de défaillance sont également proposés. Notons que dans la plupart des mécanismes de défaillances cités dans cet état de l'art, la puce au sens jonction (couches actives) est rarement la première cause de la défaillance. Les problématiques liées au boîtier (contacts, géométries, encapsulation et matériaux du boîtier) sont responsables de la majorité des mécanismes de dégradation possible au sein d'une LED blanche de puissance à base de GaN.

Localisation de la défaillance	Physique de la défaillance		Mode de défaillance	Mécanisme de défaillance	Mise en évidence/ grandeur physique
	Cause	Conséquence			
Semiconducteur (puce)	Fort courant, effet joule	Contrainte thermomécanique	Perte de flux	Génération de défauts, dislocations et mouvements	caractéristique I(V): augmentation du courants de fuite inverse, augmentation de la résistance dynamique Rs
	Fort courant, effet joule Température ambiante élevée Découpe de puce/ polissage peu soigné	Contrainte thermomécanique	Perte de flux	Fissure de la puce	Une partie de la puce n'est plus fonctionnelle, observation de la fissure (MEB)
	Mauvais procédé de fabrication de jonction Fort courant, effet joule Température ambiante élevée	Contrainte thermique	Perte de flux	Diffusion des dopants	Caractéristique I(V): augmentation de la résistance dynamique Rs, augmentation de la tension de seuil Vth
	Fort courant, forte densité de courant	Contrainte électrique	Court circuit	Electromigration	Présence de tache sombre, augmentation des courants de fuite direct et inverse
Interconnexions (câblage filaire, prise de contact, brasure)	Fort courant transitoire, forte densité de courant	Contrainte électrique	Circuit ouvert	Fusion du cablage filaire	Composant non fonctionnel
	Cyclage thermique, déformation mécanique Matériaux peu compatibles (dilatation thermique, module d'Young)	Contrainte thermomécanique	Circuit ouvert	Fatigue du cablage filaire	Composant non fonctionnel
	Présence d'humidité	Contrainte hydromécanique			
	Fort courant, courant pulsé, transitoire	Contrainte électrique	Perte de flux, court circuit	Interdiffusion dans les contacts	Caractéristique I(V): augmentation de la résistance dynamique Rs, augmentation de la tension de seuil Vth
	Température élevée	Contrainte thermique			
	Mauvaise propriétés thermiques des matériaux (conductivité)	Résistance thermique forte	Perte de flux		
	Haute tension appliquée (tension inverse)	Contrainte électrique	Circuit ouvert	Déchartge électrostatique	Composant non fonctionnel
Boitier (encapsulant, lentille, substrat)	Fort courant, effet joule Température ambiante élevée	Contrainte électrique	Perte de flux	Carbonisation de l'encapsulant	Observation optique, augmentation des courants de fuite direct et inverse
	Matériaux peu compatibles (dilatation thermique, reprise d'humidité) Contamination aux interfaces	Contrainte thermomécanique	Perte de flux, circuit ouvert	Délamination	Analyse T3Ster® ou cartographie IR: augmentation de la résistance thermique et point chaud
	Présence d'humidité	Contrainte hydromécanique			
	Exposition aux UV	Photodégradation	Perte de flux, dérive colorimétrique	Jaunissement de l'encapsulant	Observation visuelle ou spectroscopie IR sur l'encapsulant
	Fort courant, effet joule Température ambiante élevée Présence de luminophores	Contrainte thermique			
	Température ambiante élevée Design thermique peu soigné	Contrainte thermomécanique	Perte de flux	Fissure de lentille	Observation visuelle, fissures
	Présence d'humidité	Contrainte hydromécanique			
	Fort courant, effet joule Température ambiante élevée	Contrainte thermique	Perte de flux, dérive colorimétrique	Perte de rendement des luminophores	Analyse spectrophotométrique
	Matériaux peu compatibles (fort gradient thermique)	Contrainte mécanique Cyclage mécanique et relaxation Fissure dans les intermétalliques	Perte de flux	Fatigue de la brasure	Analyse T3Ster® ou cartographie IR: augmentation de la résistance thermique et point chaud

Tableau 10 : Récapitulatif des liens entre les aspects physiques, les modes et les mécanismes de défaillance des LEDs blanches ainsi que des exemples de moyens de mise en évidence.

5 Positionnement et objectifs du travail de thèse

Après un état de l'art traitant de l'intégration des nouvelles sources d'éclairage à LEDs pour l'automobile, une présentation de la mise en œuvre des LEDs blanches de puissance, depuis l'architecture de puce aux défaillances en passant par les différentes stratégies de boîtier a été réalisée. A ce stade, il convient de positionner l'étude par rapport à l'état de l'art actuel de l'éclairage automobile, mais également en regard des nouveaux composants de puissance dédiés à l'automobile ainsi que leurs caractéristiques annoncées.

5.1 Positionnement du travail de thèse

Nous avons vu que le challenge majeur actuel de l'éclairage automobile de puissance était l'établissement d'une standardisation quant à l'utilisation des LEDs, de la fabrication à l'intégration en projecteur, sans oublier leur qualification et la standardisation des connecteurs. Actuellement, les documents dédiés aux LEDs (tous domaines confondus) sont mal adaptés au profil de mission des composants pour caractériser rigoureusement leur fiabilité en automobile. On relève un certain nombre d'incohérences sur les temps de vieillissement ainsi que l'amplitude des contraintes appliquées (humidité, courant, température,…). La qualification automobile AEC-Q101, modifiée pour les LEDs, présente également des manques de cohérence dans le déroulement des tests.

L'état de l'art des technologies LEDs de puissance a permis de détailler l'architecture globale des sources à LEDs, les différentes configurations de puce envisageables (CC, FC, VTF, et TFFC) en vue d'un montage sur boîtier et les stratégies d'assemblage au niveau module : boîtier mono-puce ou multi-puce, composant CSP ou montage COB. Le domaine de l'automobile demandant de fortes puissances lumineuses par source, de nouveaux assemblages multi-puce apparaissent et comportent souvent de 2 à 5 puces en série, conduisant à des structures à forte puissance dans un espace réduit : environ 15 W électrique et des densités de puissance de l'ordre de 400 $W.cm^{-2}$. Ces architectures présentent des comportements en vieillissement assimilables à ceux des systèmes (possibilité de défaillance partielle, déséquilibre entre les puces,…), qui seront détaillés dans la suite du mémoire.

L'état de l'art actuel de la connaissance de la fiabilité des LEDs blanches est basé sur des travaux et analyses menés à une échelle mono-puce. Cependant, la fiabilité des LEDs à une échelle multi-puce n'est pas encore traitée. Si l'on s'intéresse aux composants LEDs multi-puce pour l'éclairage général, des travaux de caractérisation de systèmes sont réalisés mais rares sont ceux qui abordent l'aspect fiabilité. On peut trouver des travaux sur des luminaires complets, à la fois sur les aspects thermiques, électriques et optiques [93] [94]. Si l'on s'intéresse au domaine automobile, certaines équipes travaillent sur les aspects multi-puce mais leurs études sont orientées sur la thermique et l'optique [95] [96] [97]. Les problématiques électriques ne sont que peu traitées actuellement. De plus, les aspects comportementaux en vieillissement de modules multi-puce ne sont pas abordés, encore moins dans le domaine automobile.

L'étude va donc porter sur deux sources à LEDs multi-puce présentant des architectures de boîtier différentes (VTF et TFFC). Elle s'appuiera sur une méthodologie axée sur une campagne de robustesse permettant d'analyser les comportements de ces nouveaux composants ainsi que de dégager des tendances en défaillance, puis une campagne de fiabilité, préparée par la robustesse. L'étude de fiabilité permettra d'estimer la durée de vie de ces deux types de composants en environnement automobile, tout en caractérisant les défaillances observées (d'un point de vue non destructif et destructif) ; il sera possible d'établir des liens entre les modes et les mécanismes physiques de défaillance mis en œuvre dans ces nouveaux composants multi-puce. Enfin, les analyses

croisées des paramètres suivis au cours des vieillissements permettront de définir des indicateurs précoces de défaillance, transverses aux deux architectures étudiées. Cette étude est donc positionnée à la frontière entre la recherche et l'industrie et permettra de mieux spécifier les systèmes ou solutions intégrant des composants LEDs.

La Figure 36 permet d'avoir une vue globale de la position de la thèse par rapport aux différentes contraintes actuelles de l'éclairage automobile. Les contraintes résident dans le fait que l'on se retrouve avec un système de forte puissance multi-puce, qui peut intégrer des puces de différentes configurations (VTF, FC, CC…) réglementé par un cadre normatif qui présente des lacunes.

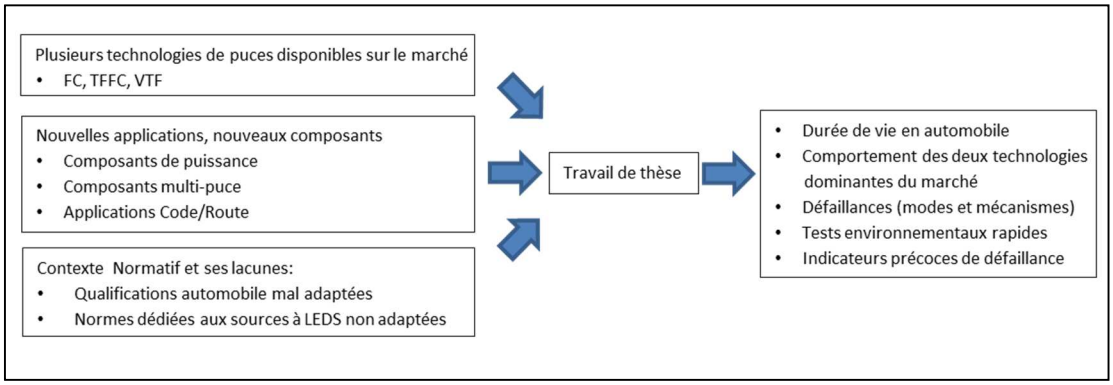


Figure 36 : Articulation du travail de thèse autour des problématiques « composants », « technologies », et « normes », ainsi que les données de sortie de la thèse

5.2 Objectifs du travail de thèse

Après avoir sélectionné et approvisionné les composants sur des critères ciblés (disponibilité, technologie de puce, architecture composant), le premier travail sera de caractériser les paramètres optiques, thermiques et électriques puis de réaliser une analyse de construction des modules de LEDs retenus. Ces caractérisations seront détaillées en chapitre 2.

Comme explicité dans le paragraphe 5.1, le travail de thèse va s'articuler autour de deux grands volets, à savoir une étude de robustesse puis une étude de fiabilité. L'étude de robustesse aura pour but de solliciter les composants au-delà des spécifications en température et courant sous contraintes échelonnées jusqu'à leur défaillance. Ainsi, en suivant les paramètres optiques électriques et thermiques durant ces tests, il sera possible de comparer les tendances, caractériser les limites fonctionnelles des modules (SOA pour *Safe Operating Area*) et analyser les défaillances afin d'identifier les faiblesses des deux technologies. La finalité de l'étude de robustesse inscrite dans ce travail de thèse permettra de dimensionner les niveaux de contrainte adaptés pour la future étude de fiabilité.

L'étude de fiabilité aura pour but de solliciter les composants à des niveaux comparables au profil de mission automobile et en accord avec les spécifications constructeurs. Les niveaux de contrainte seront ajustés par la robustesse et deux axes seront étudiés : d'une part une étude de fiabilité en température, et d'autre part un vieillissement en cyclage sous humidité. L'ensemble des tests sont ciblés sur les risques principaux de l'utilisation de LEDs en automobile :

- Le fonctionnement à haute température.
- L'allumage en environnement humide. Les résultats de cette dernière étude ne seront pas présentés dans le manuscrit, et valorisés dans une publication.

Lors des reprises de mesures, les paramètres optiques, thermiques et électriques seront enregistrés afin de suivre l'évolution des performances des modules dans le temps.

Afin d'optimiser et de faciliter la mise en œuvre des mesures et vieillissements, un banc de caractérisations a été spécifiquement développé pour ces composants. Ce banc permet de mesurer les caractérisations électro-optiques et thermiques initiales et en reprise de mesure, mais également de permettre les mesures *in-situ* lors des phases de robustesse et fiabilité. Ainsi, cette démarche permet d'éviter les montages et démontages successifs des composants, garantissant une standardisation et une bonne répétabilité/reproductibilité des mesures. De manière complémentaire à ces deux campagnes de tests, des moyens et méthodes supplémentaires dédiés aux architectures multi-puce (modèles électriques et thermiques équivalents) seront mise en place afin d'établir des liens entre les modes et les mécanismes physiques de défaillance mis en œuvre.

La finalité de ce travail de thèse permettra tout d'abord d'évaluer la fiabilité de deux technologies disponibles commercialement dédiées à l'automobile, et d'extraire des résultats collectés un maximum d'informations permettant de comprendre le comportement de ces nouveaux types de composants en vieillissement. Nous pourrons ainsi contribuer à la compréhension de ces nouvelles architectures de composants vis-à-vis de l'état de l'art actuel. Le suivi des paramètres électro-optiques et thermiques de ces nouveaux composants multi-puce dans le temps, permettra de caractériser le ou les comportement(s) typique(s) de ces nouvelles architectures. Les caractérisations de composants défaillants aboutiront à une localisation et identification de défauts, mises en lien avec des mécanismes de défaillance précis, dépendant de la configuration de puce utilisée.

Enfin, par une comparaison des tendances en vieillissement et des paramètres à t_0, des indicateurs précoces de défaillance au sein d'une population initiale de composants pourront être identifiés, indépendants des architectures étudiées.

6 Conclusion

Ce premier chapitre présente un état de l'art des technologies LEDs blanches de puissance dédiées au marché automobile en se focalisant sur trois points principaux :

L'éclairage automobile en tant que domaine. Cette partie a porté sur les applications de puissance, par un descriptif du fonctionnement d'un projecteur automobile, puis les fonctions code et route. L'état de l'art normatif a révélé des lacunes qui soulèvent des interrogations quant à la pertinence du test de qualification AEC-Q101, le standard de qualification dédié aux composants discrets automobiles et utilisé pour les LEDs. La pluralité des stratégies d'assemblage des modules disponibles commercialement pour l'automobile a pointé la nécessité d'établir rapidement une standardisation des sources à LEDs au même titre que les technologies halogène ou xénon.

Le marché des LEDs et les architectures technologiques. Cette partie s'est inscrite dans une approche multi-niveaux depuis la fabrication des couches actives jusqu'à l'intégration du composant sur carte ou support. Quatre configurations de puce sont possibles en vue de l'intégration en boîtier. On trouve les configurations CC, FC, VTF, et TFFC. Chacune présente des avantages et limites, qui aboutissent à un compromis entre complexité de fabrication, extraction optique, injection du courant et dissipation thermique, avec des densités de puissance pouvant atteindre 400 $W.cm^{-2}$. Hormis la configuration CC qui a rapidement montré ses limites, aucune des trois autres ne se détache en termes de performances.

Les défaillances des LEDs blanches. L'étude bibliographique a montré un grand nombre d'étapes de fabrication et d'assemblage pour la réalisation d'une LED de puissance. La diversité des matériaux engagés dans un tel assemblage multiplie les risques de défaillances. Les défaillances des LEDs blanches se divisent en deux niveaux : D'une part une diminution de la puissance optique de la puce due à une dégradation des couches actives par migration de dopants ou augmentation de la concentration de défauts, par exemple, et d'autre part des pertes de performances provoquées par des dégradations de l'assemblage : modification des brasures, délamination, prises de contacts, dégradation des encapsulants et luminophores.

Ce chapitre a permis de positionner précisément les travaux de thèse à la rencontre de trois entités : le contexte normatif automobile et ses limites, les nouvelles architectures multi-puce, et plusieurs configurations de puces disponibles sur le marché (FC, VTF, et TFFC).

Le prochain chapitre aura pour objectif de développer les bases nécessaires à l'évaluation de la fiabilité de sources à LEDs multi-puce. Dans un premier temps, les architectures de deux modules de LEDs multi-puce identifiés seront analysées. Ensuite, les moyens de caractérisation électro-optiques et thermiques mis en place pour l'étude seront décrits. Enfin, le banc de test spécifiquement développé pour l'étude sera explicité, accompagné de ses caractérisations métrologiques et de la création de lots représentatifs de composants pour les campagnes de vieillissements.

7 Bibliographie

1. **M. SMITH.** *Demand-Led Growth Theory: An Historical Approach.* Sraffa Conference, Roma Tre University, 2010.
2. **Wikitionnaire.** *http://fr.wiktionary.org/wiki/multi-.*
3. **Yole Development.** *Status of the LED Industry, rapport technique.* 2012.
4. **P. ALBOU.** *L'éclairage automobile.* Journées 3EI, 2003.
5. **K. EICHFORN et al.** *LEDs in Automotive Lighting.* Proc. of SPIE, 2006.
6. **P.POHLMANN et al.** *High Performance LED Lamps for the Automobile, Needs and Opportunities.* EPIC conderence, Berlin, 2007.
7. **Europe, UNECE United Nations Economic Commision for Europe.** *UNECE Regulation 112.* 2006.
8. http://en.wikipedia.org/wiki/ECE_Regulations. *Wikipedia.* [En ligne]
9. **Europe, UNECE United Nations Economic Commision for Europe.** *UNECE Regulation R99.* 2006.
10. **F. BEDU et al.** *support de formation sur l'éclairage automobile.* Renault, 2012.
11. http://www.educauto.org/. *Centre national de ressources pour la formation automobile.* [En ligne]
12. **S.GROETSCH et al.** *Novel Chip size LEDs in a combined High/Low Beam headlamp demonstrator based on a single reflector optic.* ISAL conference, Darmstadt, 2013.
13. **OSRAM.** *Fiche technique du produit OSLON Compact CL.* 2013.
14. **E.F. SCHUBERT.** *Light Emitting Diodes, chapitre 1.* Cambridge University Press, 2006.
15. **OSRAM.** *Reliability of the OSLON Product Family.* 2012.
16. **M. MAI.** *Lighting systems at Mercedes-Benz, a symbiosis of innovation and safety.* ISAL Conference, Darmstadt 2011.
17. **PHILIPS Lumiblade.** *Fiche technique du produit Philips Lumiblade OLED Panel GL350.* 2012.
18. **W. POLHMANN et al.** *Miniaturization in LED-Technology-Opportunities and risks.* ISAL conference, Darmstadt, 2013.
19. **RENAULT.** *Rapports de déconstruction de projecteurs automobile.* centre d'analyse de la concurrence, Guyancourt, 2012.
20. **K. KIKOUCHI.** *Thermal simulation of LED unit for Headlamp and Rear lamp.* ISAL conference, Darmstadt, 2011.
21. **Hella.** light source for the future, technical document. *www.hella.com.* [En ligne]
22. **IESNA.** *norme LM80: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources, www.ies.org.* 2009.
23. **IESNA.** *norme TM21: Technical Memorandum of LED Light Sources, www.ies.org.* 2009.
24. **X. FAN et al.** *Effect of Temperature Gradient on Moisture Diffusion in High Power Devices and the Applications in LED Packages.* Electronic Components & Technology Conference, 2013.
25. **ANSES.** *Systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED) : des effets sanitaires à prendre en compte.* Rapport d'expertise, 2010.
26. Diode électroluminescente, informations généraliste sur la technologie LED. *www.wikipedia.org.* [En ligne]
27. **E.F. SCHUBERT.** *Light Emitting Diodes, chapitre 4.* Cambridge University Press, 2006.
28. **S. SUGAHARA et al.** *Direct Evidence that Dislocations are Non-Radiative Recombination Centers in GaN.* J. Appl. Phys. Vol 37, L398, 1998.
29. **Yole Development.** *LED Packaging 2011 A comprehensive survey of LED packaging covering main technologies and market metrics.* 2011.
30. **A.GASSE.** *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage. Chapitre 5 : le packaging, Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage, pages 125-127.* Lavoisier, isbn 9782746220973, 2008.

31. **A. DUSSAIGNE.** *Manuscrit de thèse: Les Diodes électroluminescentes blanches monolithiques.* Nice Sophia Antipolis, 2005.
32. **P. DE MIERRY.** *Les diodes electroluminescentes pour l'éclairage, substrats pour LEDs à base de Nitrures-III.* Hermes Editions 2008.
33. **Z.Z. CHEN.** *Ohmic contact formation of Ti/Al/Ni/Au to N-GaN by two steps annealing methods.* Materials science and Engineering B, no.111, p.36-39, 2004.
34. **J-Y. DUBOZ.** *matériaux semi-conducteurs à grands gap III-V à base de GaN.* Techniques de l'Ingénieur, Electronics series, E 1 995-1-24, 1995.
35. **C. ZELLWEGER.** *Manuscrit de thèse: Realization of GaN-based light emitting devices.* École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, n° 2852, 2003.
36. **C.S. LEE et al.** *Investigation of oxidation mechanism for ohmic formation in Ni/Au contacts to p-type GaN layers.* Applied Physics, no. 79, p3815, 2001.
37. **E.F. SCHUBERT.** *Light Emitting Diodes.* Cambridge University Press, chapitre 9, 2006.
38. **P. GILET.** *Les diodes électroluminescente pour l'éclairage, chapitre 4 : le process des diodes.* Hermes Editions, 2008.
39. **SEOUL SEMICONDUCTOR.** *fiche technique du composant SPW08F0C.* 2011.
40. **PHILIPS LUMILEDS.** *Fiche technique produit Luxeon K2.* 2010.
41. **CREE.** *Fiche technique puce direct attach DA1000.* 2013.
42. **PHILIPS LUMILEDS.** *Fiche technique du produit Luxeon Flip Chip.* 2013.
43. **CREE.** *Fiche technique de puce LED EZ 1000.* 2012.
44. **W. WONG.** *Excimer laser liftoff and processing of GaN thin films and light-emitting heterostructures.* EECS, UC Berkeley, 1999.
45. **M.S. MINSKY et al.** *room-temperature photo enhanced wet etching of GaN.* Applied Physics Letters, n°68, p.1531, 1996.
46. **Y. FANG et al.** *High efficiency and output power of near-ultraviolet light-emitting diodes grown on GaN substrate with back-side etching.* Phys. Scr. 85 045703, 2012.
47. **Osram.** *fiche technique du produit série Topled LD G5AP.* 2011.
48. **R.BAILLOT.** *Manuscrit de thèse: METHODOLOGIE D'ANALYSE DE DEFAILLANCE POUR L'EVALUATION DE LA FIABILITE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES GAN.* Université de Bordeaux 1, 2011.
49. **E.F. SCHUBERT.** *Light Emitting Diodes, Chapitre 11.* Cambridge University Press, 2006.
50. **A. CORFA.** *Manuscrit de DRT: Simulation et caractérisation thermique de modules d'éclairage a LEDs en intégration Chip On Board.* CEA/DRT/LETI/DOPT/STM/LPA, 2009.
51. **PHILIPS LUMILEDS.** *fiche technique des produits de la série Luxéon F.*
52. **ENFIS.** *solutions d'éclairage à LEDs, www.enfis.com.* 2011.
53. **HYMITE.** *www.hymite.com, fabricant de composant LED.*
54. **M.H. CHANG et al.** *Light emitting diodes reliability review.* Microelectronics Reliability, Volume 52, Issue 5, Pages 762-782, 2012.
55. **OSRAM.** *Fiche technique du produit LED Golden dragon, www.osram-os.com.* 2011.
56. **PHILIPS.** *LED Lighting Explained, Understanding LED sources, fixtures, applications, and opportunities.* Philips Solid-State Lighting Solutions, 2010. 9780615360614.
57. **PARLEMENT EUROPÉEN.** *DIRECTIVE 2000/53/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL, par l'amendement 2008/689/CE.* 2008.
58. **S. HALLEREAU.** *Reverse costing analysis, composant CREE Xlamp XP-E White LED, Yole development.* 2010.
59. **R. FRAUX.** *Reverse costing analysis, composant Seoul Z power Z5 White LED, Yole développement.* 2010.

60. **K.MULLER.** *Low Rth die Attach for High Brightness LEDs, Osram.* ISAl conference, Darmstadt 2011.
61. **EPOTEK.** *Fiche technique, Colle conductrice Epotek H20E-HC.* 2012.
62. **Alpha industries.** *Fiche technique du produit Argomax 2020.* 2012.
63. **Suntronic.** *Fiche technique d'encre argent, Suntronic® Silver ink for inkjet printing process.* 2011.
64. **R. JORDAN .** *Advanced Packaging for High Power LEDs, Fraunhofer IZM Berlin.* 2013.
65. **C.A. HARPER.** *Electronic packaging end interconnection Handbook, second edition.* electronic packaging interconnection series, 1997.
66. **G. CHEN et al.** *Transient Thermal Performance of IGBT Power.* IEEE TRANSACTIONS ON DEVICE AND MATERIALS RELIABILITY, VOL. 12, NO. 1, 2012.
67. **W. J. GRIEG.** *Integrated Circuit Packaging, assembly and Interconnections.* Springer Science Business Media, 2006.
68. **G. HARMAN.** *Wire Bonding in Microelectronics, second edition.* McGrawHill edition, 1997.
69. **T. NSHANIAN et al.** *Effect of residual stress on the electrical activity of dislocations in GaN light emitting diodes.* Microeectronics Reliability, Volume 52, Issues 9–10, Pages 2039–2042. 2012.
70. **J.D. REED et al.** *High density interconnect at 10µm pitch with mechanically keyed Cu/Sn-Cu and Cu-Cu bonding for 3-D integration, ECTC.* 2010.
71. **JEDEC J-STD-020C.** *Normes relative au montage de composants LEDs sur carte électronique .* 2007.
72. **P. DUMONTET.** *Support de formation: Evaluation de la qualité d'un procédé électronique.* RENAULT SAS, 2012.
73. **PHILIPS LIGHTLAB.** *LED substrates technology, Philips Lighting/Lightlab.* 2011.
74. **PHILIPS LUMILEDS.** *Luxeon rebel board design and assembly application brief.* 2008.
75. **N. SABRAN.** *Led System for Signal functions Technical description, Valeo.* 2010.
76. **A. UDDIN et al.** *Study of degradation mechanism of blue light emitting diodes.* Thin Solid Films 483:378–81. 2005.
77. **G. MENEGHESSO et al.** *Failure modes and mechanisms of DC-aged GaN LEDs.* physica status solidi, Volume 194, Issue 2, pages 389–392, 2002.
78. **K. KOHLER et al.** *Control of the Mg doping profile in III-N light-emitting diodes and its effect on the electroluminescence efficiency.* J. Appl. Phys. 97, 104914, 2005.
79. **PHILIPS LUMILEDS.** *Reliability Datasheet RD25.* 2006.
80. **E.SUHIR .** *New approach to the high quality epitaxial growth of lattice-mismatched materials.* Applied Physics Letters, Volume: 49 , Issue: 3 pages 140 – 142, 1986.
81. **E. SUHIR.** *Stresses in bi-material GaN assemblies.* Journal of Applied Physics (Volume:110 , Issue: 7), 2011.
82. **L. TREVISANELLO.** *Manuscrit de thèse: Analysis of the Temperature impact on Reliability on GaN - based LEDs.* Université de PADOVA, 2008.
83. **JEDEC, Document normatif.** *Document JEP157 - Recommended ESD-CDM Target Levels.* 2009.
84. **CREE .** *Cree® XLamp® Electrical overstress, CREE LED Light, www.cree.com/xlamp.* 2009-2010.
85. **D.L. BARTON et al.** *Degradation of blue AlGaN/InGaN/GaN LEDs subjected to high current pulses.* ieee international reliability physics symposium; 1995.
86. **H. KIM.** *Electromigration-induced failure of GaN multi-quantum well light emitting diode.* Electron Letters, 36:908–10. 2000.
87. **M. MENEGHINI et al.** *Reversible degradation of ohmic contacts on p-GaN for application in high brightness LEDs.* IEEE Trans Electron Dev; 54:3245–51. 2007.
88. **Laboratoire de Packaging et Assemblage, CEA.** *Rapport interne du laboratoire.* 2014.
89. **R.K.TRAEGER.** *Hermeticity in polymeric lid sealants.* 25th Electronic Components, conf. p.361, 1976.

90. **G. ELGER et al.** *Thermal transient testing of high power LED modules for solder joint quality control, Philips technology.* ECTC, 2011.
91. **B. LIOU et al.** *Improvement of thermal management of high-power GaN-based light-emitting diodes.* Microelectronics reliability, Volume 52, Issue 5, Pages 861–865, 2012.
92. **G. MENEGHESSO et al.** *Reliability of visible GaN LEDs in plastic package.* Micro electron Reliab, Volume 43, Issues 9–11, Pages 1737–1742, 2003.
93. **X. LONG et al.** *Numerical Simulation on electrical thermal properties of gallium nitride based emitting diodes embedded in board.* Advances in Opto-electronics, Volume 2012, Article ID 495981, 2012.
94. **H. TANG et al.** *Multi-physics Simulation and Reliability Analysis for LED Luminaires underStep Stress Accelerated Degradation Test.* 13th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE, 2012.
95. **F. CHEN et al.** *High-efficient Optics for Different LED Packaging Types in Forward-lighting Application.* Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE 62nd, 2012.
96. **F.CHEN et al.** *Application Specific LED Packaging for Automotive Forward-lighting Application and Design of Whole Lamp Module.* Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE 62nd, 2012.
97. **E. GORDON et al.** *High Power LED Subassemblies for Automotive Front Light Application.* Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE 62nd, 2012.

Chapitre II : Présentation des composants étudiés, et outils et méthodes d'analyses mises en œuvre

Chapitre II : Présentation des composants étudiés, et outils et méthodes d'analyses mises en œuvre

1 Introduction ..... - 63 -

1.1 Choix des composants étudiés ..... - 63 -

1.2 Analyse de construction des composants retenus ..... - 64 -

2 Caractérisations déployées et principe des mesures physiques ..... - 70 -

2.1 Caractérisations physico chimiques ..... - 71 -

2.2 Mesures des paramètres électriques d'un module à LEDs ..... - 73 -

2.3 Mesures des paramètres optiques d'un module à LEDs ..... - 85 -

2.4 Mesures des paramètres thermiques d'un module à LEDs ..... - 92 -

2.5 Etude paramétrique en vue de l'analyse de défaillance ..... - 107 -

3 Bilan des caractéristiques physiques et fonctionnelles ..... - 108 -

3.1 Caractéristiques physiques ..... - 108 -

3.2 Caractéristiques fonctionnelles ..... - 110 -

4 Présentation du banc de test développé et contraintes associées ..... - 110 -

4.1 Cahier des charges ..... - 111 -

4.2 Conception de la plage d'accueil des composants ..... - 111 -

4.3 Conception de la connexion électrique 4 fils ..... - 112 -

4.4 Conception optique et simulations ..... - 112 -

4.5 Caractéristiques du banc de test final et métrologie ..... - 113 -

5 Définition des lots représentatifs et caractérisations initiales ..... - 115 -

5.1 Mise en place des lots représentatifs ..... - 116 -

5.2 Mesures avant vieillissement ..... - 117 -

6 Conclusion ..... - 117 -

7 Bibliographie ..... - 119 -

1 Introduction

Un état de l'art a été réalisé, au chapitre 1, sur les technologies LEDs blanches de puissance ainsi que leur intégration en projecteur automobile. Nous allons nous attacher maintenant à décrire l'ensemble des outils et moyens développés dans cette thèse pour la caractérisation et le suivi des paramètres électro-optiques et thermiques des LEDs multi-puce. Tout d'abord, le choix de deux composants LEDs pour l'automobile parmi les références du marché sera justifié. Les deux technologies choisies seront décrites à travers une déconstruction complète et les stratégies d'assemblage adoptées seront confrontées. Après une présentation des moyens de caractérisation utilisés pour les analyses de défaillance, les différentes caractérisations électro-optiques et thermiques, mises en place, seront effectuées. Elles seront basées respectivement sur :

- Une caractéristique courant-tension I(V).
- Une mesure du spectre optique émis par les modules.
- Une mesure de résistance thermique.

Deux modèles seront proposés afin de caractériser et diagnostiquer les modules multi-puce en terme de dérives paramétriques :

- Un modèle électrique équivalent sera proposé pour le suivi des paramètres électriques et déséquilibres lors du suivi en vieillissement. Il permettra, entre autres, de détecter la dérive paramétrique d'une puce par une mesure à l'échelle du module (multi-puce).
- Un modèle thermique équivalent sera proposé pour le suivi de la résistance thermique des modules. L'écoulement thermique sera validé par des simulations par éléments finis et permettra de pré-localiser des dégradations ou des modifications matériaux, enregistrées par la mesure thermique transitoire (T3Ster®) lors du suivi en vieillissement.

Enfin, le banc de test spécifiquement développé pour l'étude et dédié aux composants retenus est décrit. Il permet de prendre en charge les deux types de sollicitations (robustesse et fiabilité) ainsi que l'ensemble des caractérisations physiques *in situ*. Ce banc de test garantira une répétabilité et reproductibilité adaptées des mesures, indispensable à la création des lots représentatifs ainsi que le suivi des LEDs en vieillissement.

1.1 Choix des composants étudiés

Lors de la définition et de la mise en place du travail de thèse, l'étude de deux composants commerciaux présentant des technologies différentes en termes de boîtier et de configuration de puce s'est avérée être une valeur ajoutée importante. En effet, ces composants multi-puce étant nouveaux sur le marché de l'automobile, le déploiement de l'étude de fiabilité sur deux technologies de puces permettra d'extraire des conclusions comparatives. Ces technologies présentent des différences fondamentales, représentatives du marché actuel (2012). Les résultats permettront de tirer des conclusions sans être dépendant d'une technologie, structure ou fabricant donné, et pourront s'appliquer à d'autres composants LEDs du marché. Si l'on s'intéresse aux fabricants de modules LEDs de puissance pour les applications automobile, les principaux acteurs sont NICHIA, SAMSUNG, SEOUL SEMICONDUCTOR, OSRAM et PHILIPS. Ce type d'applications automobiles apparait donc comme un marché de niche et les performances annoncées des modules sont équivalentes (caractéristiques physiques et données de fiabilité).

Le Tableau 1 présente les composants disponibles chez les fabricants de LEDs lors du choix des composants de l'étude. Ce tableau constitue une photographie du marché des LEDs multi-puce pour l'automobile au printemps 2012.

Les composants « OSRAM 4 puces »[1] et « PHILIPS 4 puces »[1] présentent des configurations de puce et des architectures différentes. Ils sont représentatifs de la dispersion technologique des sources à LEDs du marché automobile lors de l'approvisionnement (2012). Notre choix s'est arrêté sur ces deux références pour l'étude. Nous allons maintenant détailler les caractéristiques physiques et morphologiques des deux références.

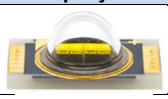
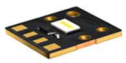
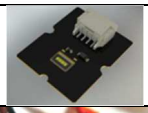
Fabricant	Produit	Aperçu	Caractéristiques principales
NICHIA	Kirameki 4 puces		Configuration FC 700 lm à 1000mA (T_j = 25°C)
SAMSUNG	10W AH534A (4 puces)		Configuration VTF 700 lm à 1000 mA (T_j = 25°C)
SEOUL SEMICONDUCTOR	Module 4 puces		Configuration VTF 700 mA (T_j = 25°C)
OSRAM	Ostar 4 puces		Configuration VTF Technologie ThinGaN® 700 lm à 1000 mA (T_j = 25°C)
PHILIPS	Altilon 4 puces		Configuration TFFC 700 lm à 1000 mA (T_j = 25°C)

Tableau 1 : Photographie du marché des composants multi-puce dédiés à l'automobile au printemps 2012 [1] [2] [3] [4] [5].

1.2 Analyse de construction des composants retenus

Avant de détailler l'analyse de construction des composants retenus, on précise que les caractérisations morphologiques ont été menées par microscopie optique et électronique à balayage sur échantillons préparés par micro-section (finition par usineur ionique). Concernant les caractérisations matériaux, des analyses EDX nous ont permis de confirmer la nature des matériaux pré-identifiés lors de la phase bibliographique. La technique de caractérisation par EDX sera détaillée dans la suite du manuscrit.

L'analyse de construction a été menée en trois niveaux de détail comme suit :

- Architecture verticale niveau module (vue globale).
- Architecture verticale niveau céramique (boîtier et report des puces TFFC).
- Analyse de construction niveau puce (configuration de puce et détail des contacts).

[1] Ces composants ont été approvisionnés en Juin 2012. Les références des lots des deux composants sont en annexe 2. Afin d'alléger la lecture du manuscrit, nous adopterons dès à présent les dénominations « structure TFFC » et « structure VTF », respectivement pour les modules de PHILIPS et OSRAM. Les résultats présentés dans ce manuscrit ne peuvent être détachés du contexte de l'étude.

1.2.1 Module TFFC

Le composant TFFC présente quatre puces LED connectées en série et probablement assemblées par thermocompression (assemblage Au-Au) sur une embase en nitrure d'Al (AlN) avec une métallisation de 480 µm d'épaisseur [6]. L'ensemble est brasé par alliage $Au_{80}Sn_{20}$ (20 µm) sur un plot en Cu (4,1 mm d'épaisseur) qui assure le maintien mécanique du dispositif en vue de l'assemblage final en projecteur. Ces différentes parties sont décrites en Figure 1.

Si l'on s'intéresse maintenant au niveau céramique et report de puce, on constate que les puces en configuration TFFC sont assemblées sur des plots d'accueil en Au. La technique de report est la thermocompression Au-Au comme décrite en chapitre 1. En partant du substrat en AlN, une métallisation Ni-Au (10 µm) permet d'acheminer le courant vers les puces et accueille les plots en Au (25 µm d'épaisseur) permettant le report des puces TFFC. Une fois assemblées, les puces sont surmontées d'un luminophore fritté (120 µm d'épaisseur, technologie « *lumiramic* ») reporté sur les puces par collage. Un matériau de remplissage époxy-silice (« *underfilling* ») est placé dans l'espace libre sous les puces afin d'assurer une bonne cohésion mécanique et une certaine dissipation thermique. L'ensemble est protégé par un encapsulant en silicone de couleur blanche.

Concernant le niveau puce et configuration TFFC, une première approche globale de la puce permet de comprendre et détailler la structure de ces puces. Cela comprend la localisation des vias, du diélectrique séparant les contacts N et P, ainsi que les reprises de connexion vers la céramique AlN. Nous aborderons ensuite par micro section, les différents matériaux constituant la puce ainsi que les structures des vias circulaires et périphériques.

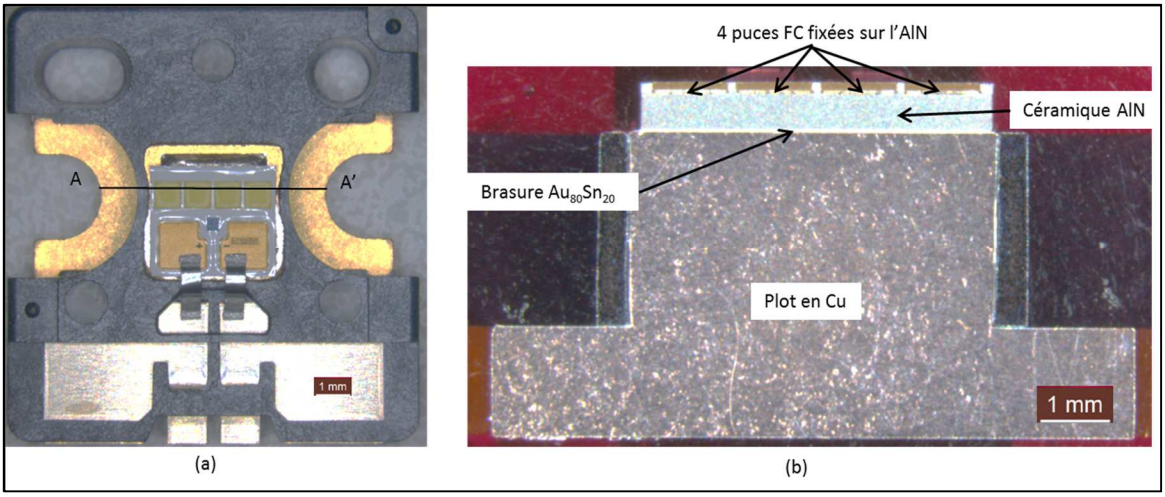


Figure 1 : Vue de dessus (a) et coupe selon la coupe verticale A-A' (b) présentant l'architecture globale du module TFFC.

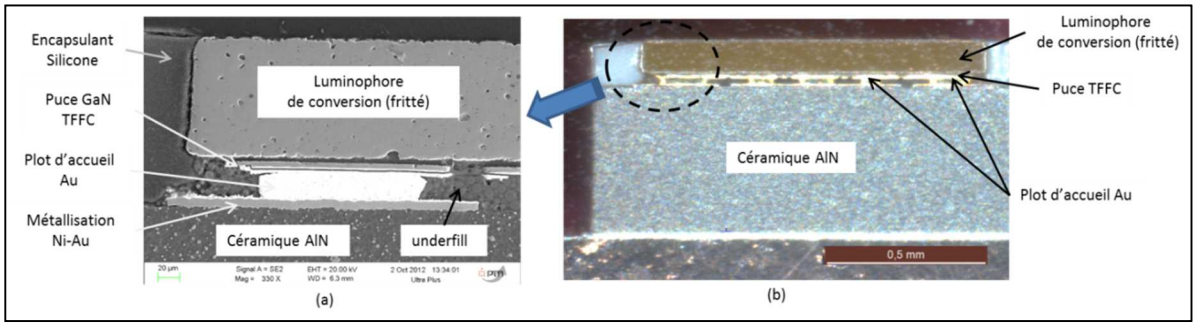


Figure 2 : Détail du composant au niveau céramique et report de puce TFFC. Image MEB (a) Image visible (b) associée.

Les puces TFFC sont constituées d'une couche fine (5 µm de GaN et 5 µm de métallisation), ainsi qu'une prise de contact N et P face arrière, pour l'assemblage FC final. Dans cette architecture, deux types de via sont mis en œuvre au niveau de la puce : 16 vias situés au centre de la puce (circulaires de 50 µm de diamètre) dont la structure est détaillées en Figure 5 et un via périphérique (en bord de puce), détaillé en Figure 6. Ces vias assurent la prise de contact sur le GaN-N. Le contact P est établi sur le reste de la surface de la puce (zone claire, Figure 3-a). Le fonctionnement électrique de la structure TFFC peut s'avérer complexe à première vue. La Figure 4 présente une vue en coupe simplifiée de la structure TFFC.

Concernant la structure interne de la puce TFFC, l'observation des structures des vias circulaires ainsi que le via périphérique permet d'avoir l'ensemble des informations (excepté la zone des puits quantiques) relatives aux différentes couches assemblées. Au niveau procédé de fabrication, les deux types de via sont construits de la même manière et probablement en même temps : une fois la métallisation du contact P déposée, le GaN-N est ouvert par gravure, puis le diélectrique est déposé, et enfin, la prise de contact sur le GaN-N est réalisée. Les deux figures suivantes permettent d'identifier ces différentes zones, respectivement sur le via circulaire, et pour le via périphérique.

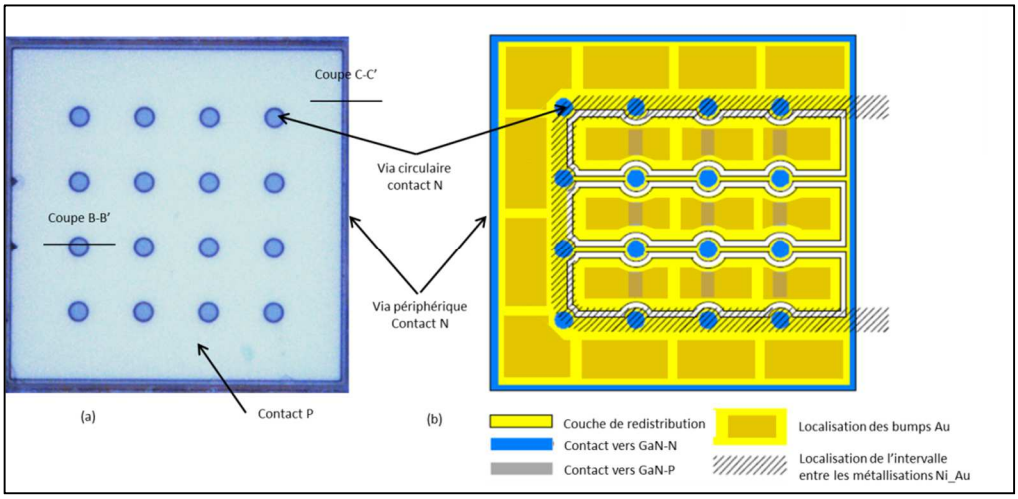


Figure 3 : Image d'une puce de 1mm² PHILIPS nue (a) et représentation schématique de sa structure (b), permettant de localiser les différents sous-éléments.

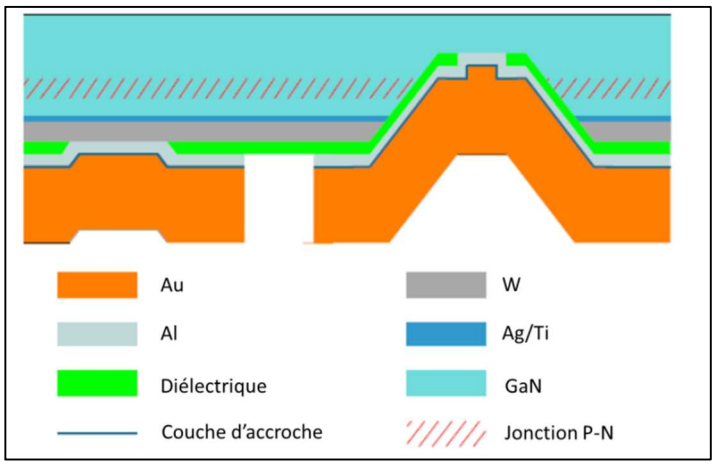


Figure 4 : Vue en coupe simplifiée de la structure de la technologie TFFC étudiée [6].

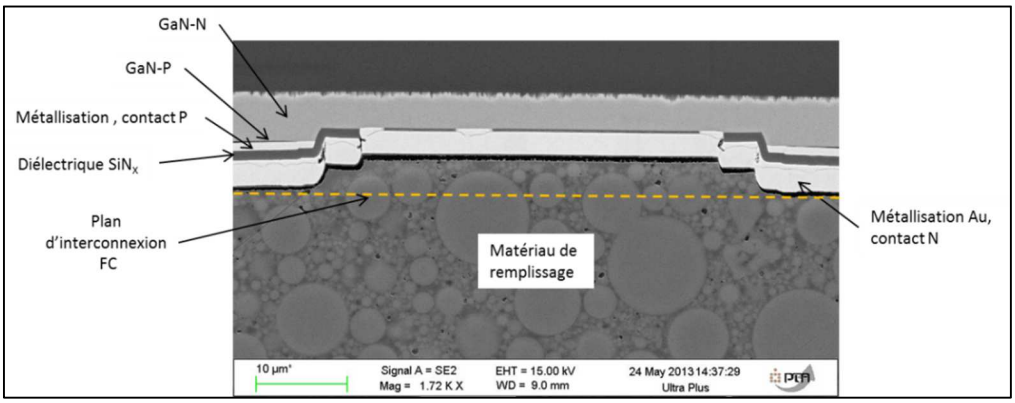


Figure 5 : Visualisation par image MEB de la structure du via circulaire des puces TFFC (coupe B-B').

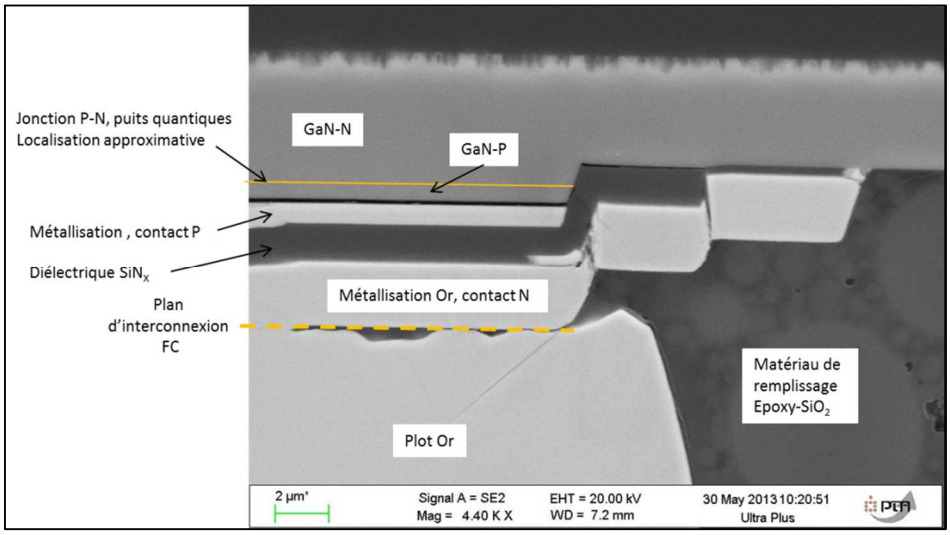


Figure 6 : Visualisation par image MEB de la structure du via périphérique des puces TFFC (coupe C-C').

Pour finaliser la présentation des puces TFFC, les prises de contacts N et P ont été caractérisées afin de définir la nature précise des contacts. Côté N, le contact est de type Al (280 nm)/Ni (70 nm)/Au (3,2 µm). Côté P, le contact est de type Ag (50 nm)/Ti (100 nm)/W (680 nm). L'Ag joue un rôle capital de réflecteur optique (un des points clés de l'extraction optique). Le détail est illustré en Figure 7.

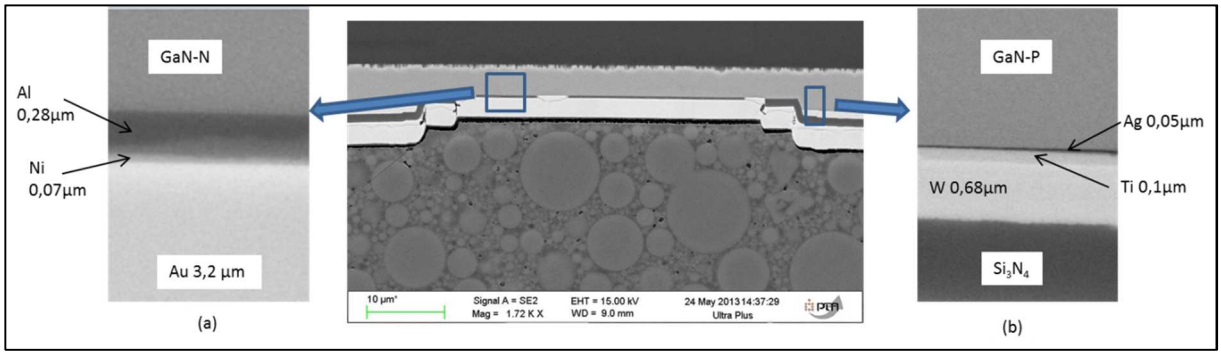


Figure 7 : Détail de la nature des contacts N (a) et P (b) dans la structure de puce TFFC.

1.2.2 Module VTF

Le composant VTF identifié présente quatre puces LEDs VTF connectées en série et assemblées par brasure $Au_{80}Sn_{20}$ sur une embase en nitrure d'aluminium (AlN) métallisée de 570 µm d'épaisseur. L'ensemble est collé (45 µm) sur un support Al du type substrat IMS (2 mm d'épaisseur) qui assure le maintien mécanique du dispositif en vue de l'assemblage final en projecteur ainsi que les connexions électriques externes. Le composant est ensuite surmonté d'une protection en verre, fixée sur un cadre en Si (cf. Figure 8).

Si l'on s'intéresse maintenant au niveau céramique et report de puce, on constate que les puces en configuration VTF sont brasées sur une céramique métallisée. En partant du substrat en AlN, une métallisation Ni-Au (4 µm) permet d'acheminer le courant vers le contact P des puces. La fixation est réalisée par une brasure $Au_{80}Sn_{20}$ de 10 µm environ. Chaque puce est constituée de l'empilement actif (couches actives et reprises de contacts) reporté sur un substrat de Ge dégénéré conducteur électrique (180 µm d'épaisseur) afin d'assurer le maintien mécanique et une bonne conduction thermique. Un câblage filaire assure la prise de contact côté N. Enfin, les luminophores sont disposés sur la puce via une matrice silicone, formant un matériau composite luminophore/silicone d'environ 50 µm d'épaisseur. La Figure 9 présente la structure de puce selon la coupe A-A' de la Figure 8-a.

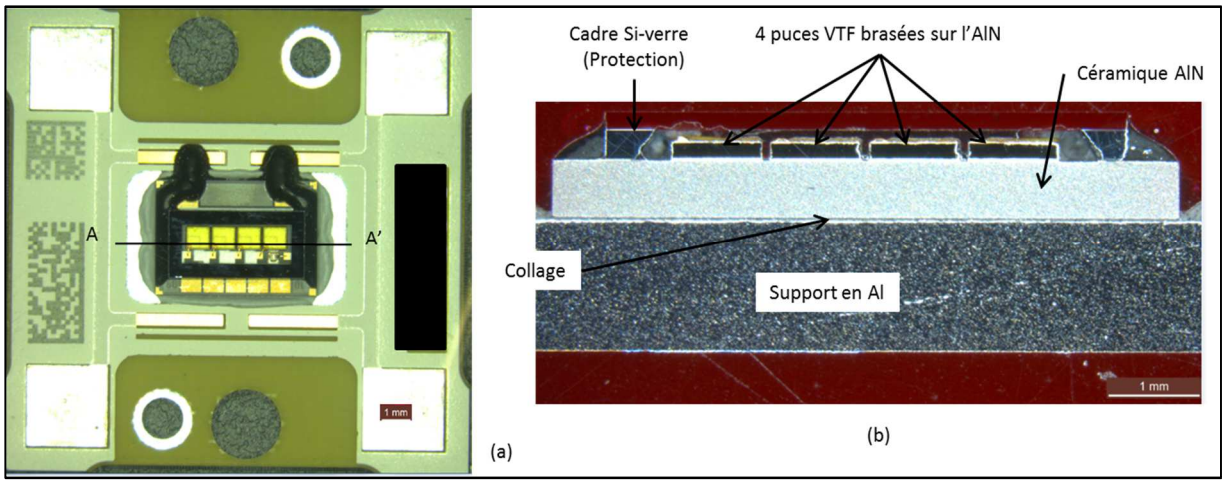


Figure 8 : Vue de dessus (a) et coupe selon la verticale A-A' (b) présentant l'architecture globale du module VTF.

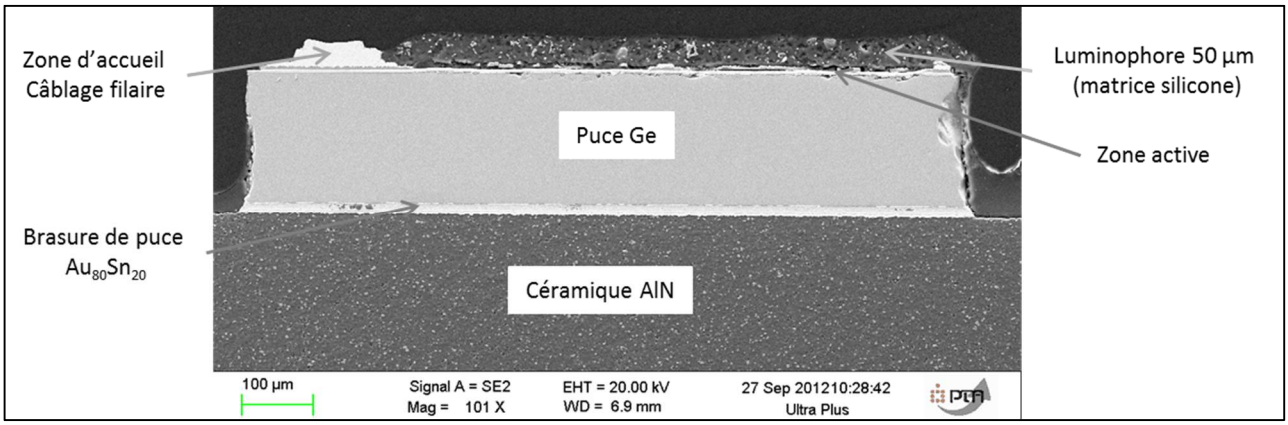


Figure 9 : Détail au niveau céramique et report de puce de structure VTF.

Les puces VTF sont constituées d'une zone active mince avec une structure verticale nécessitant une prise de contact inférieure (P côté brasure) et supérieure (N côté câblage filaire). Comme nous l'avons vu en chapitre 1, le contact N est constitué d'une grille métallique déposée sur le GaN-N dont la géométrie est optimisée pour une bonne répartition du courant dans la puce. La brasure de puce, côté GaN-P, présente l'avantage d'une prise de contact pleine puce. La Figure 10 permet d'apprécier en vue de dessus, les géométries et la localisation des contacts N et P. une représentation de la structure de la technologie VTF étudiée en coupe est présentée en Figure 10.

Pour finaliser la présentation des puces VTF, les prises de contacts N et P ont été caractérisées afin de définir la nature précise des contacts. Côté N, le contact est de type Ti (70 nm)/Au (4 µm) et côté P, le contact est de type Ag (290 nm)/W (435 nm)/Ti (90nm). L'Ag joue le rôle de réflecteur optique. La structure VTF est issue d'une épitaxie sur substrat de croissance suivie d'un report par brasage $Au_{80}Sn_{20}$ sur un substrat, dit d'accueil, en Ge. La couche d'Au est épaisse (2 µm), bornée par deux dépôts Au-Sn (200 nm). La jonction proprement dite a lieu à l'une des deux interfaces $Au/Au_{80}Sn_{20}$. Enfin, le substrat d'accueil (Ge) a été préparé en surface afin de garantir une bonne cohérence mécanique de l'assemblage final (Pt-Ti 50 nm, Ti-W 380 nm, et W-Au 80 nm). La structure complète est illustrée en Figure 12.

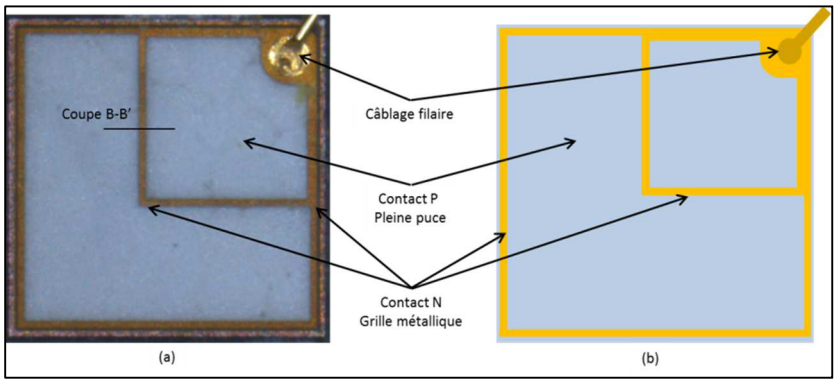


Figure 10 : Image d'une puce VTF nue (a) et représentation schématique de sa structure (b), permettant de localiser les différentes prises de contact.

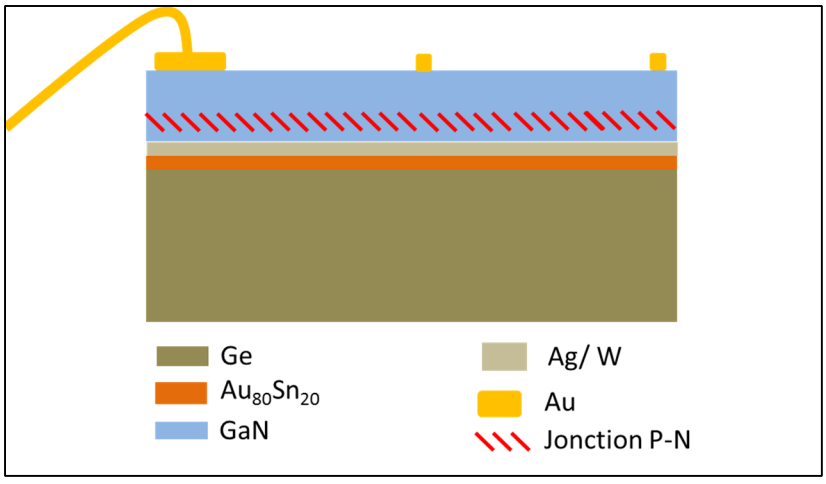


Figure 11 : Vue en coupe simplifiée de la structure de la technologie VTF étudiée.

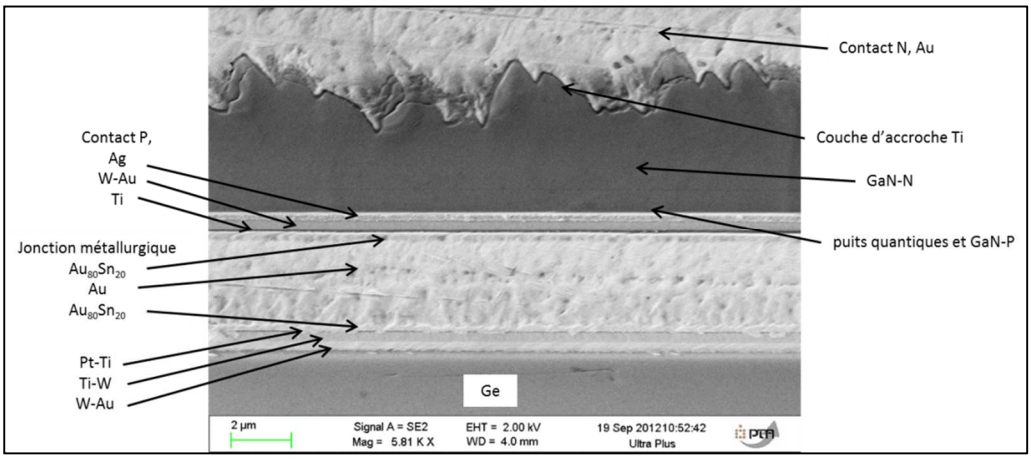


Figure 12 : Image MEB de la structure complète VTF selon la coupe B-B'. Détail des prises de contacts N et P ainsi que du report sur Ge.

Les différences majeures entre les deux références analysées sont présentées en Tableau 2.

	TFFC	VTF
Puce	5 µm de GaN	5 µm de GaN sur 180 µm de Ge
Fixation de puce	Thermocompression Au-Au	Brasure $Au_{80}Sn_{20}$
Luminophore	Fritté de 120 µm d'épaisseur	Dispersé dans du silicone d'épaisseur 50 µm
Fixation de céramique	Brasure $Au_{80}Sn_{20}$	Collage souple
Embase mécanique	Cu de 4,1 mm d'épaisseur	Al de 2 mm d'épaisseur

Tableau 2 : Différences majeures constatées entre les technologies TFFC et VTF identifiées.

Nous venons de détailler l'architecture des deux références de LEDs identifiées pour l'étude. Les caractérisations déployées ainsi que les mesures physiques associées vont être abordées.

2 Caractérisations déployées et principe des mesures physiques

La caractérisation physique des composants multi-puce à LEDs GaN constitue, aujourd'hui, une réelle avancée en termes de résultats scientifiques. En effet, un grand nombre de recherches académiques se sont fortement intéressées au modèle de base mono-puce mettant en jeu les paramètres électro-optiques et thermiques des différentes structures de composants. Ces études ne sont pas orientées sur la fiabilité et ont généralement pour but une implémentation en simulateur (SPICE par exemple). Il est assez rare de trouver des modèles complets de dispositifs à LEDs multi-puce. L'état de l'art n'a répertorié aucune étude traitant de modèle électrique équivalent applicable aux LEDs multi-puce. Dans le cadre de cette étude, une stratégie spécifique visant à extraire un modèle compact et industriellement interprétable est mise en place. Côté thermique, et à titre d'exemple, les travaux de A. CORFA ou Y.S. MUZYCHKA s'intéressent aux comportements thermiques de structures à LED mono-puce sans aborder une possible extension au multi-puce, et les conséquences éventuelles en fiabilité [7] [8]. Le challenge est donc de déterminer très précisément le modèle physique mono-puce par une préparation spécifique des échantillons. On découplera donc les différentes puces du dispositif afin d'en extraire un modèle fin. A partir de ces résultats et des mesures globales multi-puce, une stratégie de construction d'un modèle compact à finalité industrielle sera proposée afin d'extraire les paramètres fonctionnels clés. Ces paramètres seront donc intensivement utilisés dans les chapitres 3 et 4 pour déterminer les indicateurs de qualité et de fiabilité. La construction d'un modèle physique pertinent passe par l'analyse physico-chimique de la construction du composant, que nous venons de présenter. La détermination de la structure, mais

également des matériaux constituant le dispositif, permet d'affiner et de justifier les modèles analytiques mono-puce et multi-puce.

2.1 Caractérisations physico chimiques

Les caractérisations physico-chimiques permettent d'aider à comprendre l'évolution des paramètres des modèles thermiques, électriques, et optiques. Nous avons principalement utilisé des analyses de types électroniques et optiques. Pour l'étude, ces moyens nous ont permis d'effectuer les analyses de construction des composants, mais également les analyses de défaillances. Cela a permi de donner des informations structurelles, comportementales mais également sur les compositions chimiques de l'ensemble des matériaux du composant.

L'ensemble des moyens mis en œuvre peuvent se répartir en deux catégories :

- Les analyses destructives fonctionnelles : le composant peut être modifié (décapsulation par exemple) mais l'émission de lumière est encore possible (blanche ou bleue).
- Les analyses destructives : Le composant subit généralement une découpe (micro section) irréversible qui entraîne la rupture de la fonction.

Cette partie décrit la méthodologie pour réaliser une analyse de défaillance couplée aux différentes analyses physico-chimiques. On présentera succinctement les différents types d'analyses réalisées dans cette étude.

2.1.1 Analyses non destructives et destructives fonctionnelles

Ces analyses permettent généralement de caractériser l'ensemble du composant. Dans notre cas, et comme précisé précédemment, elles autorisent une modification de l'intégrité des composants mais l'émission de lumière est encore possible (blanche ou bleue). Les techniques d'analyse sont les suivantes :

- **Imagerie par microscopie optique**. Elle permet d'observer les échantillons avec un grossissement allant de 600 x jusqu'à 4000 x. Le macroscope utilisé est un modèle Leica MZ16APO, et le microscope utilisé est un modèle LEICA DM6000.
- **La thermographie Infra Rouge (IR)**. Elle permet d'observer un objet dans le domaine de l'infrarouge de largueur spectrale s'étendant de 5 à 5,1 µm. Son but principal pour le travail de thèse, est une pré-localisation des défauts. La caméra IR utilisée dans l'étude est une caméra FLIR SC 7000. La résolution des analyses thermiques réalisées avec la caméra est de 3,12 µm.
- **La technique de luminescence à bas courant** a été spécifiquement développée dans cette étude pour les modules de LEDs multi-puce connectées en série. Les modules sont alimentés dans le sens direct à un courant de l'ordre de 50 à 100 µA. A cette valeur de courant, le niveau d'injection de courant est bien inférieur au courant de seuil. Ce niveau d'injection de courant active une émission de lumière mais reste extrêmement sensible au courant de fuite au niveau mono-puce. Ainsi, nous pourrons identifier des modules de LEDs dit « équilibrés » et « déséquilibrés » en termes de fuites. Ces informations seront qualitatives mais précieuses pour l'analyse comparative du comportement des modules avant et après vieillissement. A titre d'exemple, la Figure 13 présente deux modules neufs dont l'un est dit « déséquilibré » (b) et l'autre, « équilibré » (a).

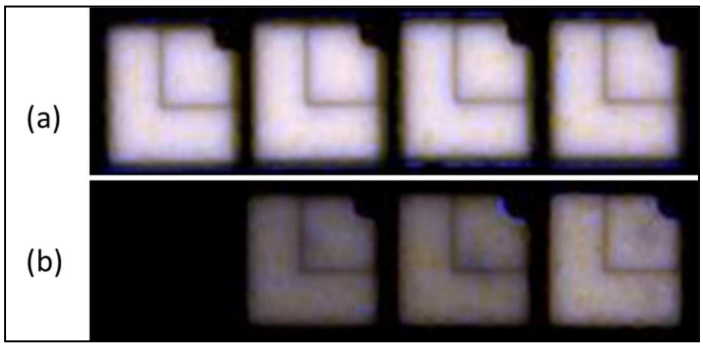


Figure 13 : Images visible de deux modules de LEDs multi-puce en série alimentés à 60µA : (a), module « équilibré » et (b), module « déséquilibré ».

- **La profilométrie mécanique** permet d'accéder aux paramètres géométriques de surface d'un échantillon, comme des différences de marche, rugosité, planéité. Dans notre cas, cette technique a été appliquée aux puces LED afin de caractériser leurs planéités de surface. Le profilomètre à stylet utilisé a été le modèle DEKTAK XT. Le pas du stylet est de 1,66 µm et la résolution verticale est de 40 nm. Un exemple de mesure de planéité d'une puce TFFC est présenté en Figure 14. Cette mesure met clairement en évidence la non planéité des puces TFFC, principalement située au niveau des vias. La différence de hauteur entre les centres des vias et le plan de base de la puce est évaluée à 250 nm. Cela permet d'estimer un rayon de courbure moyen de 0,89 mm à l'échelle d'un via.

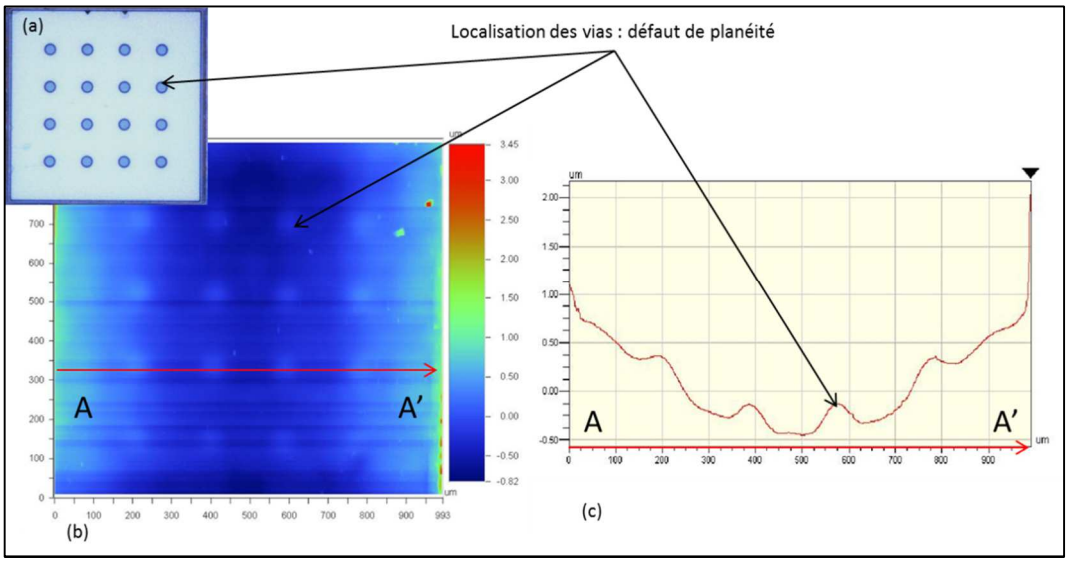


Figure 14 : Exemple de mesure de planéité sur une puce GaN TFFC neuve décapsulée. Image optique (a), profilométrie mécanique (b) et profil de surface selon A-A' (c).

- **Décapsulation des modules LEDs**. C'est typiquement ce que l'on définit dans ce mémoire comme une analyse destructrice fonctionnelle. Elle permet d'accéder aux zones d'intérêts des composants. L'étape de décapsulation peut être de deux natures :
    - La décapsulation mécanique : elle correspond au retrait d'une protection « dure » (boîtier inorganique).
    - La décapsulation chimique : elle correspond à la dissolution d'une protection organique (gel ou silicone réticulé) par un solvant adapté.

2.1.2 Analyses destructives

Les caractérisations destructives permettent de détailler l'architecture de l'assemblage des dispositifs mais également de préciser la composition chimique des éléments les constituant. On peut diviser la préparation en deux étapes principales : la décapsulation et la micro-section. La première est une étape critique dans l'analyse d'un module multi-puce. En effet, cette première préparation garde la fonctionnalité première du dispositif – l'émission de lumière – mais permet de préciser le fonctionnement de chaque puce. Les résultats de cette première manipulation seront utilisés pour bâtir un macro-modèle multi-puce à partir de la caractéristique de chaque puce. L'étape suivante consistant en la micro-section qui permet de finaliser l'analyse physico-chimique de tous les éléments constituants l'assemblage mais également au niveau mono-puce. On peut, selon la précision du plan de micro-section aller jusqu'à la détermination des couches au voisinage de la zone active. Dans ces conditions, nous utiliserons des moyens d'analyse tels que la microscopie électronique à balayage ou l'EDX pour définir précisément la structure des puces LEDs et de leur assemblage. Ces analyses seront également menées dans le cadre d'analyse de défaillance de composant afin de proposer des pistes quant aux mécanismes de défaillance mis en jeu. Les techniques d'analyse sont les suivantes :

- **La micro-section** d'échantillon se déroule en deux étapes : la découpe puis le polissage. la technique de polissage ionique permet d'ajuster la zone d'observation de quelques µm (10 µm). La découpe a été effectuée avec l'équipement Struers ACCUTOM-50 et le polissage ionique par le LEICA TIC 3X.
- **La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)** est une technique adaptée autant à la puce nue qu'à son assemblage. Le principe de l'imagerie MEB est de collecter les électrons en retour à l'aide d'un champ électrique de faible intensité et ainsi reconstruire une image par balayage d'un faisceau d'électrons.
- **La spectroscopie électronique à rayons X** permet d'identifier de manière qualitative les éléments présents à la surface d'un échantillon irradié par un faisceau d'électrons. L'émission qui découle du retour à l'équilibre est une émission de rayons X. L'analyse de l'énergie des photons X captés permet d'identifier la nature des éléments présents. L'équipement utilisé dans l'étude a été le MEB Zeiss ultra +.

2.2 Mesures des paramètres électriques d'un module à LEDs

La caractérisation électrique fait partie des outils principaux pour l'analyse d'une LED encapsulée. Elle permet d'identifier et d'extraire des paramètres électriques dépendants de l'architecture de la puce ainsi que de la stratégie d'assemblage. Ces paramètres peuvent être reliés à des paramètres électriques fonctionnels de la diode (courant, tension de seuil, résistances internes). La mesure courant-tension I(V), à partir de laquelle sont extraits les paramètres principaux, permet de construire les modèles électriques équivalents et de mettre en évidence les phénomènes de transport.

2.2.1 Banc de mesure courant-tension I(V)

Le principe est de mesurer la variation du courant en fonction de la tension appliquée aux bornes d'une LED régulée en température. Le schéma bloc du banc est représenté par la Figure 15. Idéalement, c'est la température de jonction (T_j) qui devrait être régulée en température. Or, il est très difficile de connaitre précisément la température de jonction d'une LED en fonctionnement car d'une part elle n'est jamais uniforme sur toute sa surface et d'autre part, il faudrait mettre en place

une régulation asservie en fonction de la puissance thermique injectée dans le système. Les composants étudiés dans cette étude sont des composants multi-puce, ce qui rajoute une difficulté supplémentaire à la régulation précise de chaque T_j. En effet, chaque puce aura donc sa T_j moyenne propre. On pourrait également utiliser une source de courant impulsionnelle permettant d'éviter l'auto-échauffement du composant (en particulier pour I_f > 100 mA). La puissance thermique est directement liée au courant de mesure qui varie entre 10^{-12} A et 1 A. Dans ce contexte, le T_{case} est maîtrisé et imposé par une plaque chauffante. Lors des mesures, l'ensemble du banc est placé dans l'obscurité afin d'éviter les effets photoélectriques des puces LEDs pouvant induire un décalage en tension de la caractéristique I(V).

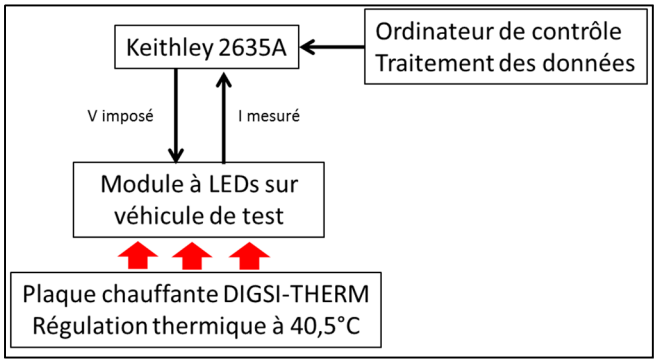


Figure 15 : Schéma de principe du banc de mesures I(V).

Le matériel utilisé est constitué :

- D'un source-mètre KEITHLEY 2635A connecté par un bus IEEE relié à l'unité centrale de l'ordinateur de contrôle. Cet appareil est constitué d'une source de courant avec une plage allant de 10^{-12} A à 1 A avec une résolution de 0,03 à 0,15% suivant les calibres de mesure. La source de tension (0-20 V) présente une résolution de 0,02%.
- D'un ordinateur de contrôle pour l'acquisition des données via une interface Labview dédiée permettant de piloter le 2635A pour réaliser un I(V).
- D'une plaque chauffante DISGI-TERM de 35x35 cm² assurant la régulation thermique de la face arrière des modules de LEDs à 40 °C afin de s'affranchir de la température ambiante.

Les modules à LEDs sont câblés en mesure 4 fils pour s'affranchir de la résistance des câbles électriques.

2.2.2 Modèle électrique d'une LED GaN mono-puce

Les LEDs GaN présentent aujourd'hui des contacts non ohmiques du type métal/semi-conducteur. Les modèles électriques utilisés pour les LEDs GaN intègrent donc cette particularité. Nous verrons lors de l'extraction des paramètres du modèle que ce type de contact masque certains effets de transports électroniques classiques. Ainsi, l'effet Schottky, est généralement composé d'un effet tunnel et d'un effet thermoélectronique à faible et moyen niveau d'injection de courant. Ces effets sont en série avec les phénomènes classiques de recombinaisons. Il est donc impossible d'extraire ces derniers phénomènes liés aux fonctions principales d'une zone active d'une LED GaN [9] [10] [11]. Dans le cadre de cette étude, nous avons fait le choix de concentrer l'étude sur la particularité liée à l'effet Schottky, afin de valider ce comportement électrique aux faibles niveaux d'injection de courant dans les modules de LEDs étudiées et ainsi bâtir un modèle électrique équivalent.

La caractéristique I(V) typique d'une LED GaN mono-puce est représentée par la Figure 16.

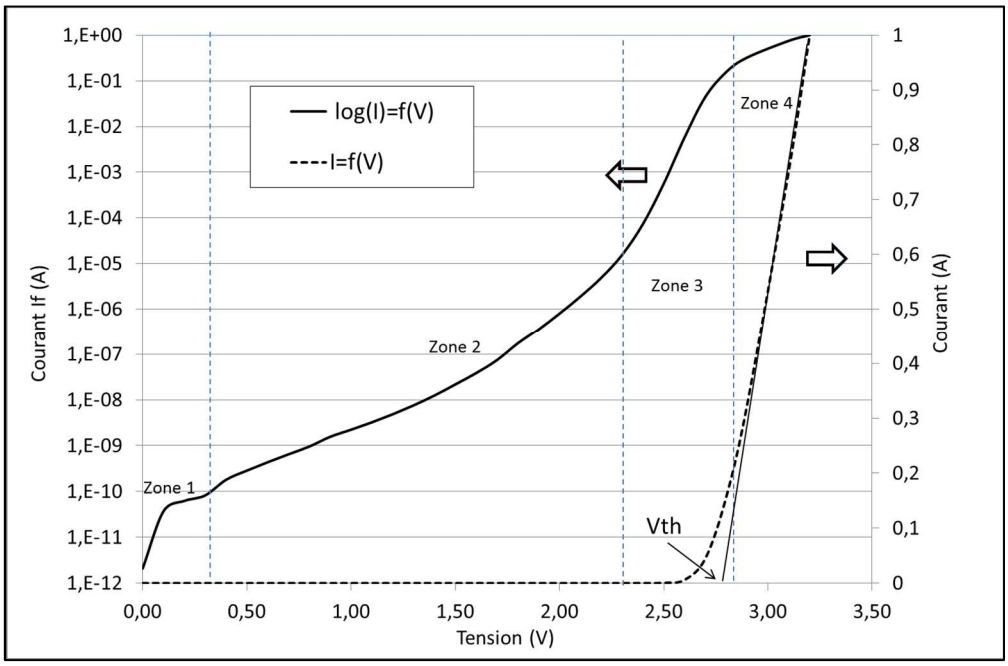


Figure 16 : Caractéristique typique d'une LED GaN mono-puce à T_{case}= 40 °C.

Le premier tracé I(V) en échelle linéaire montre une tension de seuil et deux zones principales. Le comportement est celui d'une diode mais avec une tension de seuil d'environ 2,8V.

La seconde caractéristique électrique I(V) en échelle semi-logarithmique permet de distinguer quatre régimes en fonction du niveau d'injection de courant:

- Très faible niveau d'injection : résistance de fuite (zone 1) : $I_f \leq 100$ pA.
- Faible niveau d'injection : effet tunnel (zone 2) : 100 pA $\leq I_f \leq$ 10 µA.
- Moyen niveau d'injection : effet thermoélectronique (zone 3) : 10 µA $\leq I_f \leq$ 100 mA.
- Fort niveau d'injection : résistance série (zone 4) : $I_f \geq$ 100 mA.

Le régime de très faible injection (<100 pA) se modélise par un courant de fuite en **zone 1**. Les porteurs n'ont pas une énergie suffisante pour franchir la barrière de potentiel $qV_\varphi \approx qV_{th}$ et restent donc piégés dans les zones neutres. Dans ce cas, le semi-conducteur se comporte comme une structure à très forte résistivité électrique. On considère en général que les bords de la puce, de résistivités plus faibles, contribuent de façon prépondérante à la conduction d'un courant de fuite. Ce comportement est souvent non linéaire mais, dans le cas présent, nous le modéliserons par une loi ohmique donnée par l'équation 1:

$$I_{fuite} = \frac{V_d - R_s I}{R_{fuite}} \approx \frac{V_d}{R_{fuite}} \qquad \textbf{Équation 1}$$

V_d représente la tension de diffusion ou tension de polarisation de la LED.

Concernant le régime de faibles et moyens niveaux d'injection (**zone 2 et 3**), L'extraction des paramètres en utilisant les modèles de recombinaisons radiatives ou de Shockley-Read-Hall (SRH) ne suivent pas la courbe expérimentale. Cela est dû à la présence de la barrière Schottky. Il faut faire l'investigation des phénomènes de transport pour en extraire un modèle adapté. Il existe plusieurs phénomènes de transports parasites induits par l'interface métal semi-conducteur [12] [13]. Nous

allons nous intéresser aux phénomènes de transports prépondérants représentés par l'Effet Tunnel (ET) et l'Effet Thermoélectronique (ETE). Ces deux effets sont illustrés en Figure 17.

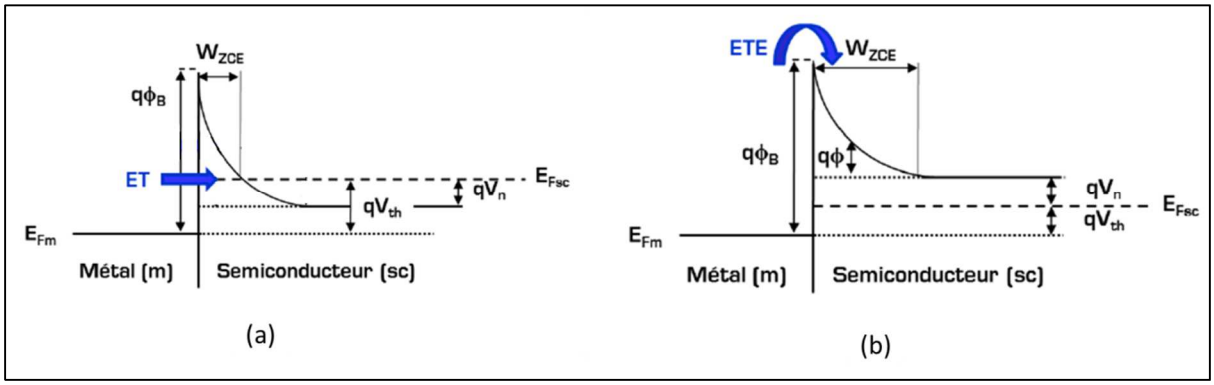


Figure 17 : Schéma de bande d'un contact métal / semi-conducteur créant une barrière Schottky : Effet Tunnel (a) et Effet Thermoélectronique (b).

- L'effet tunnel relatif à la zone 2 de la Figure 16 est favorisé lors de la présence de semi-conducteurs à forts niveaux de dopage ($N_a > 10^{18}$ .cm^{-3}). La Zone de Charge d'Espace (ZCE) est dans ce cas suffisamment étroite pour que les porteurs puissent passer directement à travers (Figure 17-a).
- L'effet thermoélectronique, correspondant à la zone 3 de la Figure 16, est privilégié pour les semi-conducteurs faiblement dopés ($N_a \leq 10^{17}$ .cm^{-3}). La zone de déplétion est alors relativement vide car sa largeur (W_{ZCE}) est grande. Cependant, les porteurs peuvent passer la hauteur de barrière ($q\Phi_B$) si la tension d'alimentation (qV) est supérieure à cette dernière (Figure 17-b). Pour les composants GaN étudiés ici, c'est à partir de ce régime d'injection que l'émission de photons sera possible mais la contribution photonique est minoritaire devant l'effet thermoélectronique.

La hauteur de barrière $q\Phi_B$ peut se calculer à partir des propriétés électroniques du métal et du semi-conducteur sous la forme de l'équation :

$$q\Phi_B = q\chi_{SC} + E_{g\,SC} - \Phi_{métal} \qquad \textbf{Équation 2}$$

Avec $\Phi_{métal}$, hauteur de barrière de la couche de métal, X_{SC} l'affinité électronique du semi-conducteur et E_{gsc}, bande interdite (ou *gap*) du semi-conducteur.

La largeur de la zone de charge d'espace W_{ZCE} peut s'exprimer sous la forme :

$$W_{ZCE} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qNa}\left(\Phi_B - \Phi\right)} \qquad \textbf{Équation 3}$$

Φ : hauteur de barrière du semi-conducteur, ε_s constante diélectrique du semi-conducteur, N_a la concentration en atomes accepteurs (trous). Les effets ET et ETE vont donc s'activer en fonction de la variation de la largeur de la ZCE, régie par la tension V_d appliquée à la LED.

- L'Effet Tunnel domine le flux de courant dans le contact métal-semi-conducteur à faible niveau d'injection et correspond à la **zone 2** de la Figure 16. La densité de courant par effet tunnel a été présentée F.A. PADOVANI et S. STRATTON sous la forme de l'équation [14] [15]:

$$J_{ET} = A^{*}T^{2}\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)^{2}\frac{\Phi_B - V_d}{\Phi_B}.e^{\left(\frac{-2(q\Phi_B)^{3/2}}{3E_{00}\sqrt{q\Phi_B - qV_d}}\right)}$$ **Équation 4**

A* est la constante de Richardson, E_{00} correspond à l'énergie caractéristique décrite par la relation :

$$E_{00} = \frac{q\hbar}{2}\sqrt{\frac{N_a}{\varepsilon_s m_h^{*}}}$$ **Équation 5**

avec N_a la densité de dopants, m_h^{*} la masse effective réduite et $\hbar$ la constante de Planck réduite. L'énergie caractéristique est donc déterminée en effectuant un tracé donnant $I/q(\Phi_B - V_d)$ en fonction de $\sqrt{q(\Phi_B - V_d)}$. Dans le cas de mesures I(V) en température, la dominance de la barrière Schottky se traduira donc par des courbes parallèles entre elles, avec un niveau de courant dépendant de la température. Ce comportement sera vérifié uniquement à l'échelle multi-puce. En effet, avec la décapsulation des modules multi-puce, l'intégrité des composants est perdue et il est difficile d'entreprendre des mesures mono-puce en température. Ce comportement est confirmé en Figure 18. Si les courants non radiatifs et/ou photoniques avaient été visibles sur l'I(V), les pentes auraient été dépendantes de la température selon qV/kT.

En prenant en compte l'influence de la thermique sur l'effet tunnel, H. MORKOC a proposé une expression réduite sous la forme de l'équation [16] :

$$J_{ET} = J_{ET_0}\left[e^{\left(\frac{qV_d}{\eta_1 kT}\right)} - 1\right]$$ **Équation 6**

avec η_1, facteur d'idéalité.

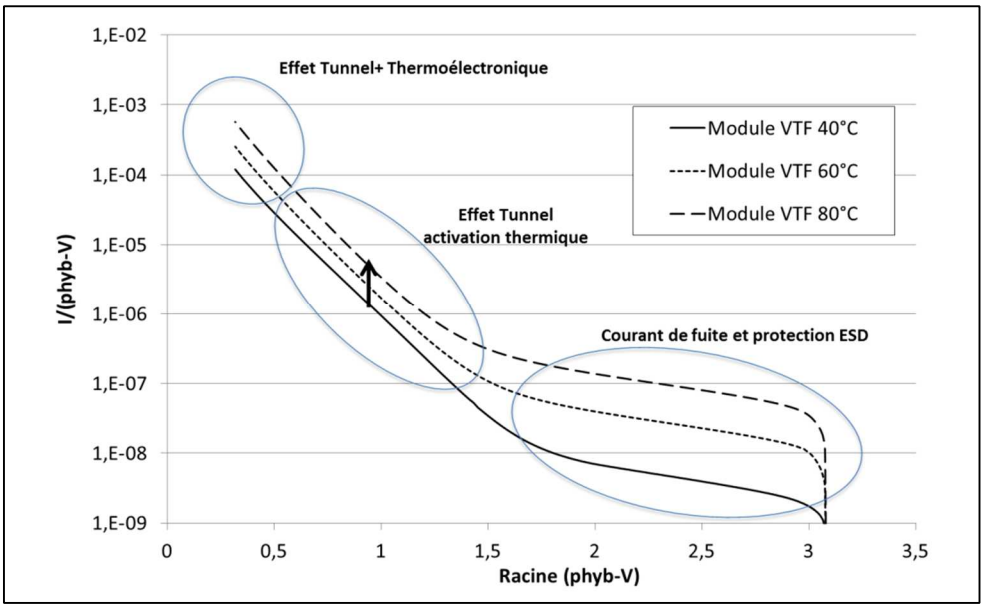


Figure 18 : Mise en évidence de l'effet tunnel par mesures en température sur la technologie VTF. Φb= 9eV.

C'est cette expression réduite que nous retiendrons comme modèle « compact » afin de modéliser la zone 2 des caractéristiques I(V).

- Dans la **zone 3** de la caractéristique I(V) présentée en Figure 16, c'est l'Effet Thermoélectronique qui prend le relais et prédomine le flux de courant dans le contact métal/semi-conducteur. C'est à partir de cette zone que les recombinaisons radiatives sont possibles, grâce à un niveau d'injection suffisant. En émettant l'hypothèse que la ZCE est assez large, l'expression traditionnelle de densité de courant liée au régime ETE est réduite à une loi exponentielle décrite par l'expression suivante :

$$J_{ETE} = J_{ETE_0}\left[e^{\left(\frac{qV_{th}}{kT}\right)} - 1\right] \qquad \textbf{Équation 7}$$

J_{ETE0} étant la valeur de la saturation de la densité de courant s'écrivant sous la forme :

$$J_{ETE_0} = A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\Phi_B - \Delta\Phi}{kT}\right)} \qquad \textbf{Équation 8}$$

avec $\Delta\Phi$ la hauteur de barrière entre le niveau du vide et $q\Phi_B$ décrite par l'équation :

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\varepsilon_s}} \qquad \textbf{Équation 9}$$

E est le champ électrique présent à l'interface métal semi-conducteur.

Nous retiendrons pour la zone 3 le modèle ETE exponentiel simplifié avec l'introduction d'un facteur d'idéalité η_2 conduisant à l'expression :

$$J_{ETE} = J_{ETE_0}\left[e^{\left(\frac{q(V_d - R_s I)}{\eta_2 kT}\right)} - 1\right] \qquad \textbf{Équation 10}$$

- Pour un fort régime d'injection de courant, correspondant à la **zone 4** de la Figure 16, la limitation du courant n'est due qu'à la résistance équivalente des différentes couches de la puce. L'équation suivante modélise la tension V_d aux bornes de la LED.

$$V_d = V_{th} + R_s I_d \qquad \textbf{Équation 11}$$

L'origine physique de la résistance série, R_S, provient de la résistivité ρ des différentes couches constituants la structure. Chaque couche, dopée ou non, présente une résistivité dont l'expression est donnée par l'équation :

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \qquad \textbf{Équation 12}$$

avec μ_n : mobilité des électrons et μ_p : mobilité des trous.

2.2.3 Paramètres électriques d'une LED GaN mono-puce

Le Tableau 3 résume les paramètres électriques extraits lors des analyses de la caractéristique I(V) d'une LED mono-puce. Grâce à ces paramètres électriques, il est possible d'en déduire un modèle mono-puce équivalent, présenté en Figure 19. Ce modèle consiste en une résistance de fuite, une résistance série et deux diodes, prenant en charge le courant par effet tunnel d'une part et l'effet thermoélectronique d'autre part. Ces deux diodes, relative à l'effet Schottky, sont en série avec les phénomènes classiques de recombinaisons non-radiatives et radiatives (respectivement notés I_{nrad} et I_{rad}). Ces derniers, masqués électriquement par les contacts Schottky seront négligés pour le modèle électrique multi-puce.

Ces paramètres ont été caractérisés sur LED mono-puce et vont nous permettre à présent de construire un modèle multi-puce simplifié que nous allons aborder maintenant.

Paramètre-zone de fonctionnement	Expression théorique	Localisation dans le composant	Valeur typique mono-puce mesurée sur puce de 1mm².
R_{fuite} - zone1	$\frac{V - RsI}{I_{fuite}} \approx \frac{V}{I}$	Bords de puce et boîtier	$10^{10}\Omega$
Φ_B -zone 2-3	$q\chi_{SC} + Eg_{SC} - \Phi_{métal}$	Contacts	3,0- 3,2 eV
E_{00} -zone 2-3	$\frac{q\hbar}{2}\sqrt{\frac{Na}{\varepsilon_s m_h^*}}$	Contacts	80 à 100 meV
V_{th} - zone 4 R_s -zone 4	$V_{th} - R_s I_d$ $\frac{V - V_{th}}{I_d}$	Résistance du chemin électrique	2,7-3,0 eV 0,4 Ω

Tableau 3 : Paramètres électriques correspondants aux modèles équivalents des différentes zones d'une LED GaN, I_d=1A, T_j=40°C [16] [17].

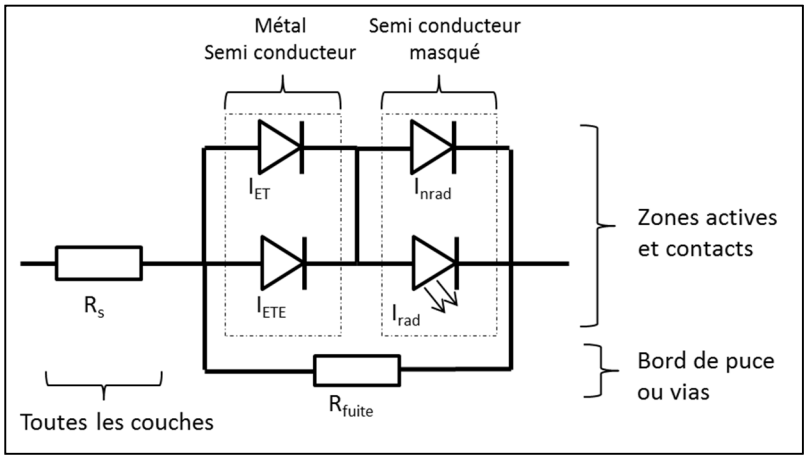


Figure 19 : Schéma électrique équivalent complet d'une LED GaN mono-puce et localisation des contributions sur la puce.

2.2.4 Modèle électrique d'un module de LEDs GaN multi-puce

Contrairement à un composant mono-puce, pour lequel on peut facilement modéliser chaque régime d'injection de courant, les modèles électriques multi-puce sont développés en supposant qu'un module est constitué de quatre puces parfaitement identiques d'un point de vue des paramètres électriques. C'est pourquoi certaines imperfections pourront apparaître sur les

ajustements graphiques au niveau multi-puce. Cette hypothèse est importante à souligner mais est indispensable pour faciliter le suivi des paramètres électriques et les éventuels déséquilibres entre puces lors des vieillissements. Les modèles développés ici tiennent compte du niveau de connaissance des composants acquis grâce aux analyses de construction, et sont susceptibles de dépendre de spécificités technologiques dont nous n'avons pas connaissance.

Afin de construire un modèle facilement exploitable au niveau multi-puce, nous avons choisi de simplifier le modèle mono-puce à un modèle « compact » afin de pouvoir l'étendre à une structure multi-puce et d'en extraire des comportements en vieillissement. Le modèle mono-puce simplifié comporte toujours quatre zones définies ainsi :

- La **zone 1** reste inchangée, le courant de fuite est défini par l'équation 1.
- La **zone 2** utilise l'expression simplifiée de l'effet tunnel :

$$I_{ET} = I_{ET_0}\left[e^{\left(\frac{q(V_d - R_s I)}{\eta_1 kT}\right)} - 1\right] \qquad \textbf{Équation 13}$$

Avec η_1 facteur d'idéalité, généralement supérieur à 2, et I_{ET_0} valeur de saturation du courant par effet tunnel.

- La **zone 3** utilise l'expression réduite de l'effet thermoélectronique :

$$I_{ETE} = I_{ETE_0}\left[e^{\left(\frac{q(V_d - R_s I)}{\eta_2 kT}\right)} - 1\right] \qquad \textbf{Équation 14}$$

avec η_2 facteur d'idéalité, généralement compris entre 1 et 2, et I_{ETE_0} valeur de saturation du courant par effet thermoélectronique.

- La **zone 4** reste inchangée pour le V_{th} et la définition de R_s.

Si l'on assemble maintenant un modèle multi-puce constitué de quatre modèles mono-puce compacts, connectés en série, la loi de Kirchhoff impose que les contributions énergétiques de chaque puce s'additionnent (tension) et que les contributions de charge soient mutualisées (courant). La Figure 20 présente le modèle équivalent générique d'un module de LEDs GaN multi-puce. La mise en série de plusieurs puces impose d'avoir un support matériel (boîtier) mais qui apporte également des contributions électriques (fuites). Une résistance de fuite sera donc placée en parallèle du modèle multi-puce. A l'échelle multi-puce, les contributions mono-puce de R_{fuite}, η_1, η_2 et R_s vont s'additionner et I_{ET_0} et I_{ETE_0} vont être conservés. L'addition des paramètres η_i lors de la mise en série de diodes a déjà été constatée par SHAH, mais sur une structure mono-puce en décomposant une LED en plusieurs diodes en série [10].

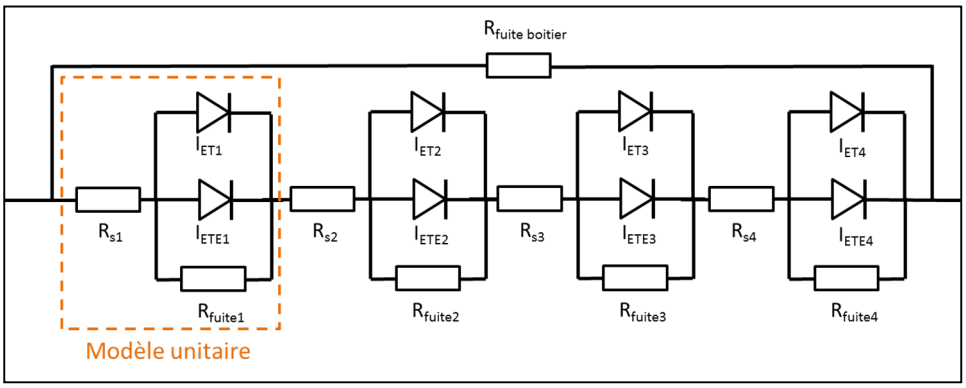


Figure 20 : Modèle équivalent générique multi-puce envisagé (4 puces série) pour le suivi en vieillissement.

Concernant la mesure du paramètre $R_{fuite\ mesuré}$ (à l'échelle module), on constate que cette mesure est la mise en parallèle de $R_{fuite\ boîtier}$ et de la chaine de résistance R_{si} et R_{fuitei}, ce qui aboutit à :

$$R_{fuite_{mesuré}} = \frac{R_{fuite_{boitier}}}{\sum R_{s_i} + \sum R_{fuite_i}} \approx \frac{R_{fuite_{boitier}}}{\sum R_{fuite_i}} \qquad \textbf{Équation 15}$$

Nous considérerons $R_{fuite_{mesuré}} \approx R_{fuite}$ comme paramètre à suivre lors des tests de vieillissements.

Le tableau suivant synthétise les paramètres électriques du modèle « compact » mono-puce et son extension au modèle multi-puce développé pour l'étude.

Paramètre-zone de fonctionnement	Expression théorique	Localisation dans le composant	Valeur typique mono-puce mesurée sur puce de 1mm². I_d = 1 A, T_j = 40 °C	Transfert au multi-puce (mise en série)	Valeur typique multi-puce extraite d'un I(V) I_d= 1 A, T_j= 40 °C
R_{fuite} - zone1	$\frac{V - RsI}{I_{fuite}} \approx \frac{V}{I}$	Bord de puces via boîtier	$10^{10}\Omega$	Somme	10^{10}-$10^{12}\Omega$
I_{ET_0} -zone 2-3 η_1 - zone 2-3	$I_{ET} = I_{ET_0}\left[e^{\left(\frac{q(V_d - R_s I)}{\eta_1 kT}\right)} - 1\right]$	Contacts	10^{-8} 10^{-11} A 6-11	Conservation Somme	10^{-8} 10^{-11}A 24-44
I_{ETE_0} -zone 2-3 η_2 - zone 2-3	$I_{ETE} = I_{ETE_0}\left[e^{\left(\frac{q(V_d - R_s I)}{\eta_2 kT}\right)} - 1\right]$	Contacts	~10^{-27}A 1-1,8	Conservation Somme	~10^{-27}A 4-7,2
V_{th} - zone 4 $R_{s,i}$ -zone 4	$V_{th} - R_s I_d$ $\frac{V - V_{th}}{I_d}$	Résistance du chemin électrique	2,7-3,0 V 0,3-0.4 Ω	Somme	10,8-12,0 V 1,2-2,4 Ω

Tableau 4 : Paramètres électriques du modèle compact mono-puce et son extension au modèle multi-puce développé pour l'étude.

2.2.5 Extraction du modèle électrique du module multi-puce TFFC.

Les paramètres du modèle multi-puce TFFC sont présentés en Tableau 5 et basés sur le modèle présenté en Figure 20. La simulation du modèle multi-puce équivalent a été réalisée avec le logiciel libre QuCS [18]. La réponse électrique du modèle présente un bon accord avec la mesure. La comparaison est effectuée en Figure 21.

Paramètre-zone de fonctionnement	Valeur typique sur module multi-puce TFFC
$R_{fuite-i}$ - zone1	10 GΩ
$R_{fuite-boitier}$ - zone1	100 GΩ
$I_{ET0,i}$ -zone 2-3 η_{1i} - zone 2-3	10^{-11} A 6[1]
$I_{ETE0,i}$ -zone 2-3 η_{2i} - zone 2-3	5.10^{-29}A 1,4
V_{thi} - zone 4 $R_{s,i}$ -zone 4	2,8 V 0,27 Ω

Tableau 5 : Paramètres électriques typiques du modèle développé sur le module multi-puce TFFC. I_f=1 A, T_{case}=40 °C.

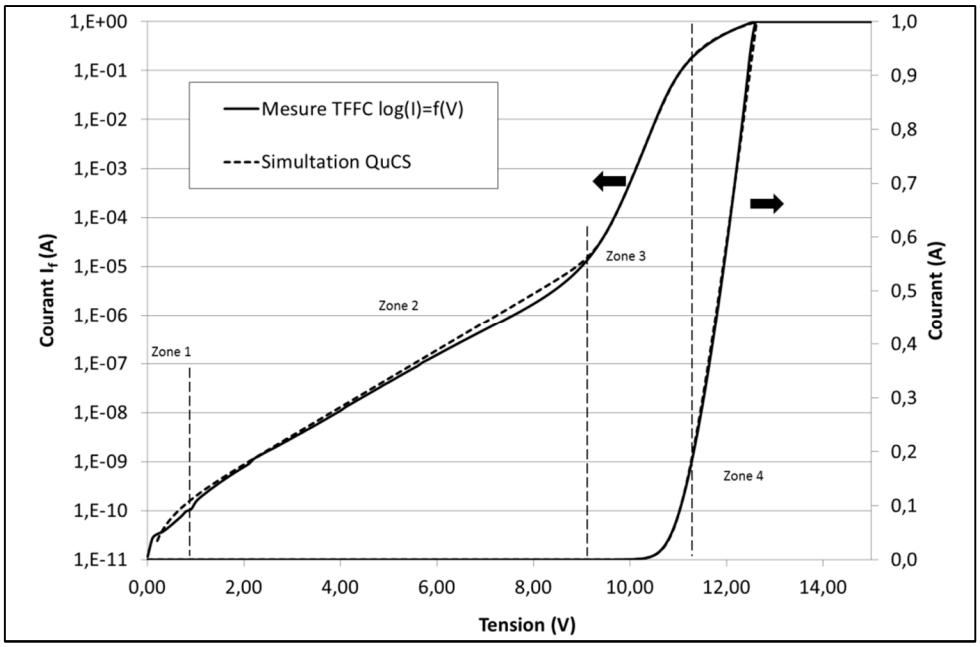


Figure 21 : Comparaison entre caractéristique I(V) mesurée et simulée pour un module multi-puce (quatre puces).

2.2.6 Extraction du modèle électrique du module multi-puce VTF

L'architecture du module multi-puce VTF, présente quelques particularités qui perturbent la mesure I (V) des quatre puces GaN seules. D'une part, une protection ESD est présente sur la plupart des composants commerciaux. Elle peut ne pas avoir de conséquences sur la mesure de l'I(V) (exemple du module TFFC) si elle draine un courant inférieur à celui que l'on veut mesurer. Sur l'architecture VTF, c'est une diode silicium montée en inverse des LEDs, qui assure la protection ESD. Son courant de fuite masque une partie du courant induit par l'effet ET de 0 à 6 V environ mais une mesure de R_{fuite} au niveau module est toujours réalisable. Une mesure I(V) de la protection ESD seule est présentée en Figure 22. Elle a été intégrée dans le modèle équivalent avec un modèle de diode simple $I = I_{dark}\left[e^{(qV/\eta kT)} - 1\right]$ Avec I_{dark}= 1.10^{-8} A et η=4. L'émission de lumière des LEDs du module a lieu à partir de 9 V environ, c'est pourquoi nous utilisons le courant d'obscurité I_{dark} dans le modèle. D'autre part, les puces VTF sont reportées sur un substrat de Ge « dégénéré » d'un point de vue dopage. Il doit être considéré comme conducteur électrique parfait. Cependant nous suspectons que la présence de ce substrat dans le circuit électrique (en série) apporte une barrière Schottky

[1] Le facteur d'idéalité implémenté prend en compte d'intégrité du chemin électrique dans le composant et n'est pas uniquement associé à la jonction.

supplémentaire à l'injection du courant responsable d'une non linéarité de R_s. Nous avons pu caractériser électriquement ce substrat en Ge, il présente un comportement résistif mais non linéaire (Figure 23). Dans ce contexte, nous avons fait le choix d'intégrer une diode supplémentaire par puce en série avec chaque $R_{s,i.}$ Cet ajustement permet une meilleure corrélation de la simulation à la mesure I(V). Nous n'écartons pas l'hypothèse que cette barrière supplémentaire puisse être due au contact N de la structure VTF (Ti/Au). La Figure 24, présente le modèle électrique multi-puce modifié pour la structure VTF.

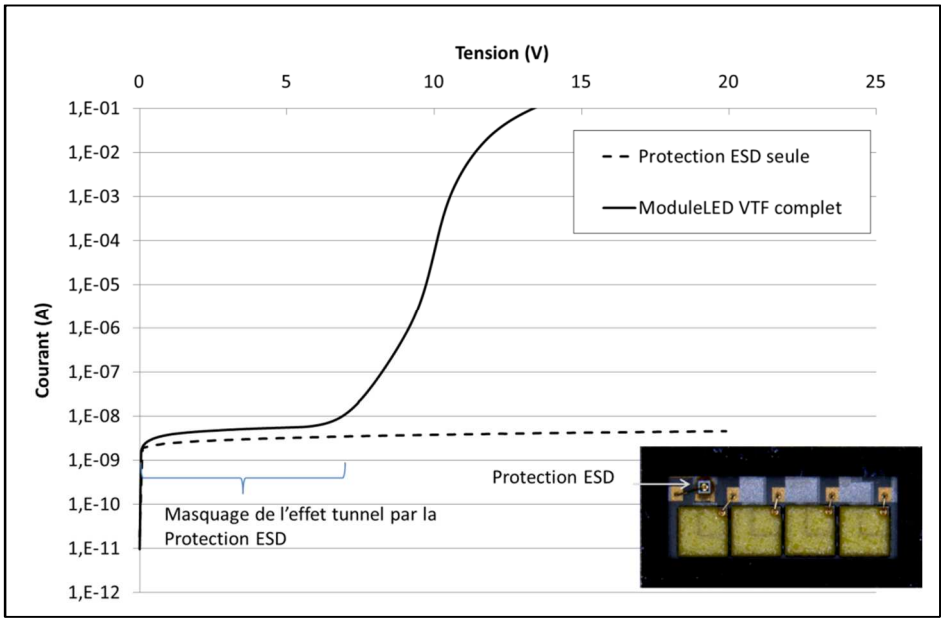


Figure 22 : Comparaison des caractéristiques électriques d'un module VTF et de sa protection ESD.

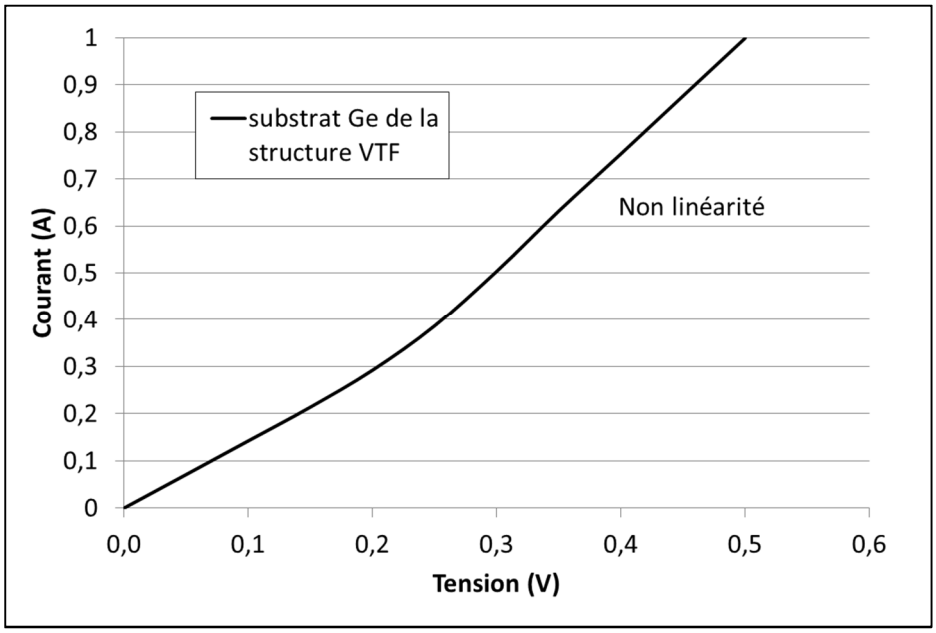


Figure 23 : Caractéristique I(V) d'un substrat Ge dégénéré de puce VTF.

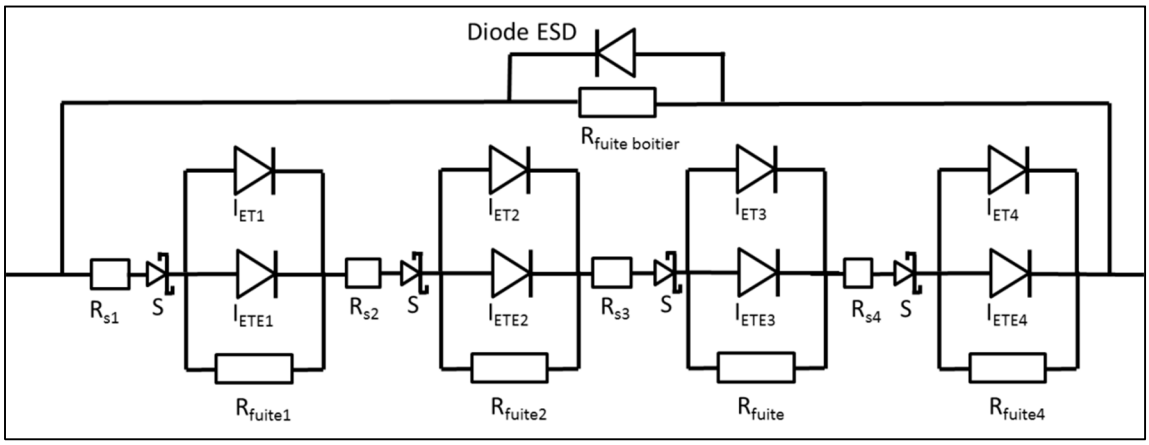


Figure 24 : Modèle équivalent multi-puce envisagé (4 puces série) pour le module VTF.

Les paramètres du modèle multi-puce VTF sont présentés en Tableau 5. Les paramètres sont appliqués sur la base du modèle présenté en Figure 24. La simulation du modèle multi-puce équivalent a été réalisée avec le logiciel libre QuCS avec les ajustements et hypothèses considérés [18]. La réponse électrique du modèle présente un bon accord avec la mesure. L'écart maximal en courant est de 18 % à 11,5 V. La comparaison est effectuée en Figure 25.

Paramètre-zone de fonctionnement	Valeur typique sur module multi-puce VTF
$R_{fuite-i}$ - zone1	10 GΩ
$R_{fuite-boitier}$ - zone1	10 GΩ
$I_{ET0,i}$ -zone 2-3 η_1 - zone 2-3	10^{-14} A 3,8
$I_{ETE0,i}$ -zone 2-3 η_2 - zone 2-3	10^{-38} A 1
$I_{schotthy}$ -zone 4 $\eta_{schottky}$ - zone 4	10^{-5} A 2,8
$V_{th,i}$ - zone 4 $R_{s,i}$ -zone 4	3,03 V 0,43 Ω

Tableau 6: Paramètres typiques du modèle développé sur le module multi-puce VTF. I_f=1 A, T_{case}=40 °C.

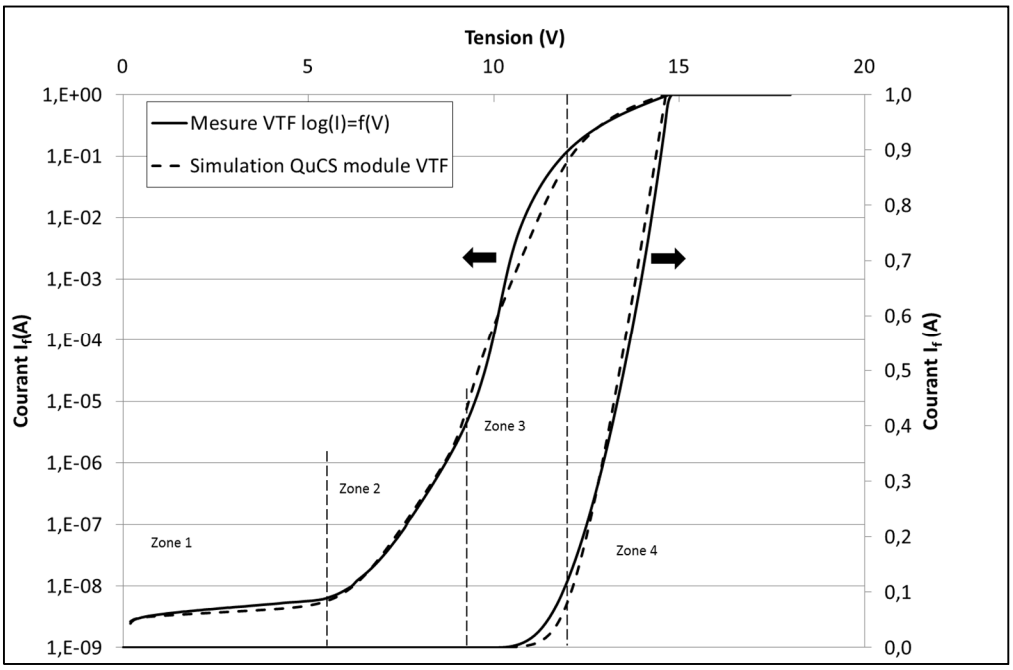


Figure 25 : Comparaison entre caractéristique I(V) mesurée et simulée pour un module multi-puce VTF (quatre puces).

Les modèles électrique des deux structures multi-puce étudiées viennent d'être présentés et sont basés sur un modèle compact mono-puce. Les paramètres électriques ont été extraits des I(V) réalisés à l'échelle module. On notera, qu'à bas niveau, la protection ESD a une forte influence sur la caractéristique globale de la structure VTF. Par ailleurs, la résistance R_s du modèle VTF semble être non linéaire et pourrait s'expliquer par la présence du Ge dégénéré en tant que substrat de puce.

2.3 Mesures des paramètres optiques d'un module à LEDs

Les caractéristiques optiques donnent accès aux paramètres fonctionnels principaux extraits du spectre optique. Elles viennent naturellement en complément des analyses électriques pour construire un modèle électro-optique utilisé pour comprendre le fonctionnement d'une LED alimentée à courant nominal ($V>V_{th}$). Des paramètres peuvent être directement extraits, comme la puissance optique, ou calculés, à l'image du flux optique (lumens) ou de la température de couleur (K). Comme nous l'avons précisé précédemment, la température de jonction (T_j) est difficile à maîtriser, surtout sur des modules multi-puce, c'est la face arrière des composants qui est thermiquement stabilisé dans notre étude. Il permet de garder constant les paramètres reliés aux matériaux. Pour cela, on utilise une régulation thermique identique à celle du banc de mesure électrique.

2.3.1 Banc de mesure de puissance optique

Le principe de cette mesure est d'évaluer la puissance optique en sortie des modules LEDs à un courant donné. Un schéma de principe du banc développé est présenté en Figure 26.

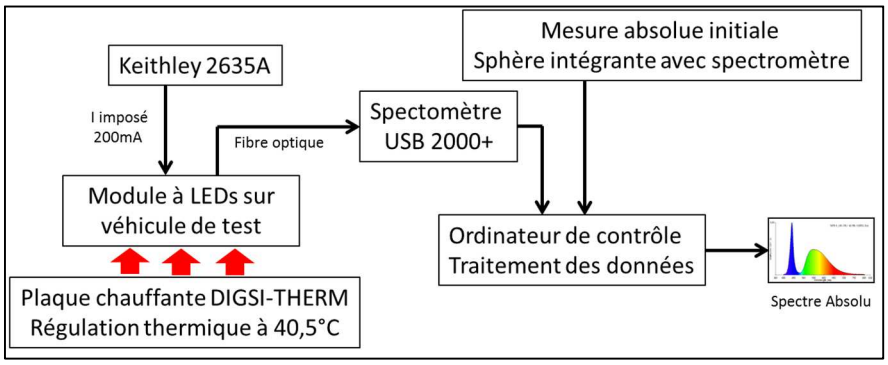


Figure 26 : Schéma de principe du banc de mesure optique.

La mesure en sortie du spectromètre correspond à une mesure relative. L'intérêt de cette démarche est, d'une part un gain de temps vis-à-vis d'une mesure systématique en sphère intégrante, et d'autre part, une meilleure répétabilité des mesures. Néanmoins, une mesure absolue de l'ensemble des composants approvisionnés est réalisée en sphère intégrante avant vieillissement afin d'étalonner les mesures relatives de chaque composant sur ce banc. Ce dernier est constitué :

- D'un source-mètre KEITHLEY 2635A, le même équipement que celui du banc électrique. Il régule ici le courant à 200 mA.
- D'une plaque chauffante DISGI-TERM de 35 x 35 cm² assurant une régulation thermique de la face arrière des modules de LED à 40 °C afin de s'affranchir de la température ambiante,
- D'un spectromètre portable OceanOptics USB2000+ qui enregistre le spectre optique relatif via une fibre optique HCS (pour *Hard Clad Silica*) de 200 µm de diamètre montée avec connecteurs SMA 905 (pour *SubMiniature A*). Gamme spectrale de 200 à 1100 nm, Résolution spectrale de 0,25 nm, résolution optique de 0,1-10,0 nm FWHM (pour *Full Width Half Maximum*).
- L'ordinateur de contrôle qui effectue la gestion des données via une interface dédiée (logiciel Spectra Suite).
- D'une sphère intégrante LabSphere de six pouces qui permet de caractériser de manière absolue les paramètres optiques des modules LEDs avant vieillissement.

2.3.2 Principe de luminescence et génération de lumière blanche

a. Principe de luminescence

L'analyse du spectre de la LED seule (sans luminophore) permet, en confrontant la mesure au modèle, d'extraire des paramètres physiques fondamentaux. La Figure 27 présente schématiquement sur le même graphe un spectre d'une LED GaN (pic bleu) ainsi que les différents modèles [17] :

- L'émission spontanée $R_{spon}(E)$.
- L'effet Stark $R_{stark}(E)$.
- Le gain optique $\gamma(E)$.

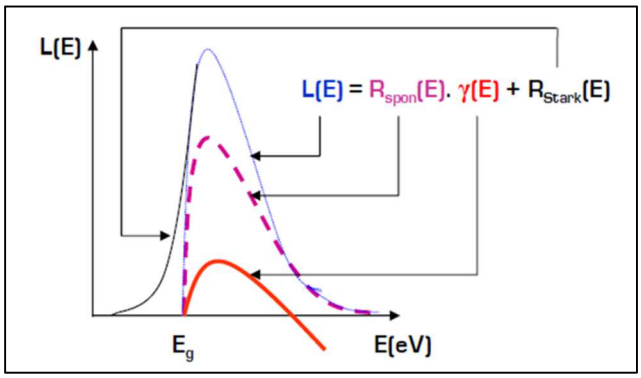


Figure 27 : Différents modèles associés à l'émission d'une LED InGaN/GaN à multi puits quantiques [9].

Le gain optique est très important dans une structure GaN [17]. En effet, dans ce cas, les puits quantiques font partie de la zone active et l'expression du gain est modifiée. Le gain optique est proche d'une fonction « porte » sur une bande d'énergie de l'ordre de 250 meV [17]. Le gain est relativement important car l'émission spontanée représente une amplitude presque 3 fois plus faible par rapport à l'amplitude du spectre total.

Compte tenu du fait que les bandes de valence et de conduction du GaN Wurzite ne sont pas paraboliques et donc le modèle de l'émission spontanée doit être modifié selon l'équation [19] :

$$R_{spon}(h\nu) = K_{spon}.(h\nu - E_g)^{1/2}.e^{\left(-\frac{h\nu - Eg}{kT}\right)} \qquad \textbf{Équation 16}$$

avec K_{spon} une constante définie par l'équation :

$$K_{spon} = \frac{1}{2\pi^2}.\left(\frac{2m_r}{\hbar^2}\right)^{3/2}.\frac{1}{\tau_R}.e^{\left(\frac{\Delta E_F - Eg}{kT}\right)} \qquad \textbf{Équation 17}$$

L'équation 16 permet donc de remonter à la température de jonction de la puce ou bien la température moyenne des puces dans le cas d'un système multi-puce. En traçant le spectre en échelle semi-log, l'émission spontanée se traduit donc par une droite de pente = $-\frac{q}{\alpha kT}$. Le terme α est ajouté afin de compenser l'étendue spectrale du gain optique. Sa valeur typique est comprise entre 1 et 2, nous verrons son application lors des variations paramétriques en fiabilité. On remarque, à partir de la Figure 27, que la détermination directe de T_j à partir de la courbe est extrêmement difficile d'une part par la présence du luminophore et d'autre part du fait que la résistance thermique de nos composant est une résistance thermique « module ». il faut donc se positionner sur une autre méthode. La stratégie développée dans le cadre de cette thèse est de déterminer la température de jonction par une analyse thermique complémentaire (T3Ster®) et de recaler l'analyse spectrale (via α) pour estimer la température de jonction moyenne. Ainsi, avec une mesure relativement simple à mettre en œuvre, on peut déterminer l'évolution de la température de jonction moyenne avant et après vieillissement. On précise que cette méthode ne permettra pas de déterminer une température absolue de jonction mais une évolution. Ce type d'analyse permet de comparer les dispositifs entre eux d'un point de vue de la thermique.

b. Génération de lumière blanche

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, une LED blanche est basée sur le phénomène de « *up-conversion* » d'une partie de l'émission bleue en photons de plus grande longueur d'onde (vert, jaune, rouge) par l'intermédiaire d'un matériau luminescent (luminophore) placé sur la puce bleue. Cela permet de couvrir l'ensemble du spectre visible en sortie du composant. Deux exemples de spectres de LED blanches sont illustrés en Figure 28.

L'ajout du luminophore sur la puce induit plusieurs effets. Le premier est la transformation de la lumière bleue en lumière blanche. Ce phénomène a été expliqué par TOMIKI *et Al.* en soulignant le rôle du Ce^{3+} dans une matrice hôte $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG). La Figure 29 schématise les bandes d'énergie en fonction de la coordonnée de configuration R du Ce^{3+}, les spectres d'émission associés et le diagramme de JABLONSKI de l'atome Ce^{3+} dans un cristal YAG [20].

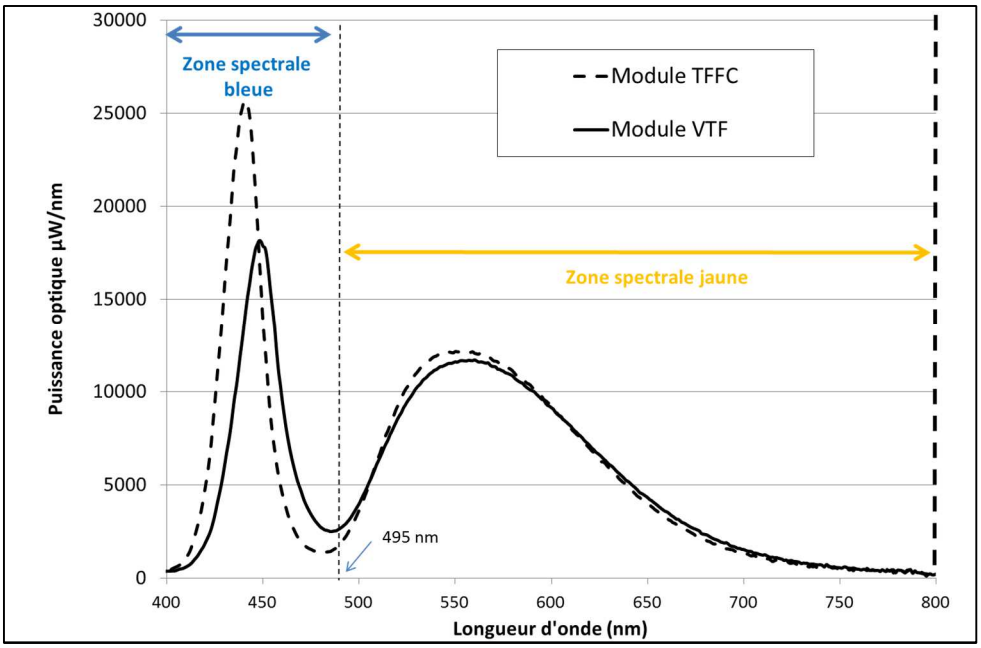


Figure 28 : Exemple de deux spectres de LED blanches multi-puce mesurés à 1000mA et T_j à 60°C.

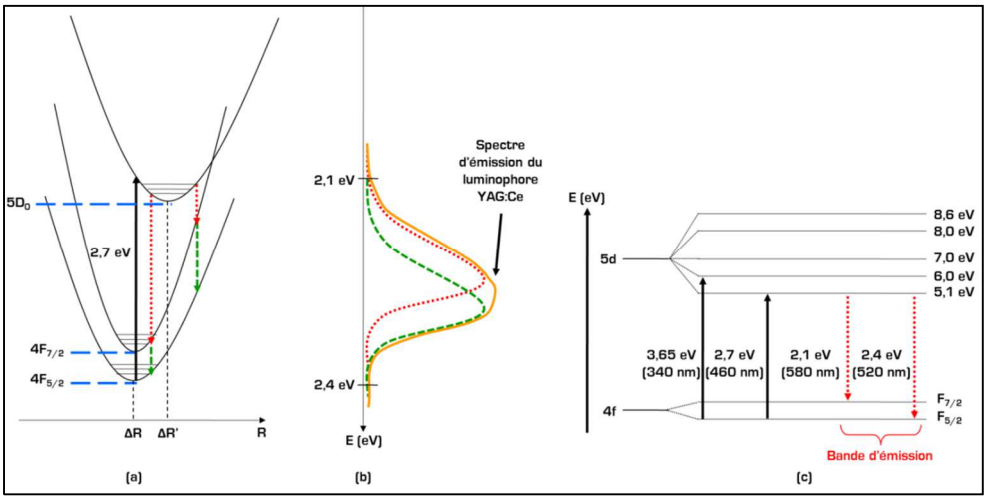


Figure 29 : Niveaux d'énergie du Ce^{3+} dans un cristal YAG : (a) Diagramme de Mott du Ce^{3+} excité à 460 nm, (b) Spectre d'émission du luminophore excité à 460 nm, (c) Diagramme de Jablonski du Ce^{3+} pour deux longueurs d'onde d'excitation (340 nm et 460 nm) [9].

Les atomes de Ce^{3+} viennent remplacer des atomes d'Yttrium dans la matrice hôte $Y_3Al_5O_{12}$. Lorsque le luminophore n'est pas excité, la distance ΔR entre les atomes de Cérium (Ce) et d'Oxygène (0) est nulle. Les niveaux 4f et 5d du luminophore sont donc alignés. Lorsque le luminophore est éclairé, l'excitation de l'atome Ce rend la distance ΔR non nulle (ΔR') et les bandes d'énergies 4f et 5d ne sont plus alignées (Figure 29-a).

Le spectre d'excitation du YAG:Ce à 532 nm permet de mettre en évidence les transitions électroniques des niveaux $^4F_{5/2}$ vers les niveaux excités $^5D_0$ et $^5D_1$. Ainsi, la transition $^4F_{5/2} \rightarrow {}^5D_1$ donne un pic d'absorption centré sur 340 nm et la transition $^4F_{5/2} \rightarrow {}^5D_0$ un pic d'absorption centré sur 460 nm. La forme des pics d'absorption est Lorentzienne d'après la théorie du système à deux niveaux discrets. En excitant le YAG:Ce à 340 nm et 460 nm, les niveaux ^5D du luminophore sont excités et les transitions électroniques $^5D_0 \rightarrow {}^4F_{7/2}$ et $^5D_0 \rightarrow {}^4F_{5/2}$ génèrent deux bandes d'émission qui forment la bande d'émission de 2,1 eV à 2,4 eV (Figure 29 -b et Figure 29 -c). Les LEDs présentées en Figure 28 présentent des longueurs d'onde d'excitation entre 440 nm et 450 nm et une longueur d'onde d'émission autour de 530 nm.

2.3.3 Définition des paramètres optiques retenus

La puissance optique est le paramètre fonctionnel majeur caractérisant une LED. Plusieurs unités sont utilisées dans les documentations techniques des LEDs pour indiquer leur puissance optique, comme le watt ou le lumen. Nous choisirons le watt, unité énergétique, pour caractériser la puissance optique (P_{opt}) des LEDs. Le lumen, quant à lui, est le résultat d'un calcul convoluant le spectre de la source et la courbe de sensibilité de l'œil. A partir d'un spectre décrivant P_{opt} =f(λ), la puissance totale d'une LED s'exprimera par :

$$P_{opt} = \int_{400\,nm}^{800\,nm} P_{opt}(\lambda)d\lambda \qquad \textbf{Équation 18}$$

Le spectre d'une LED blanche est composé principalement de deux pics : un centré sur 450 nm représentant l'émission de la LED GaN précédemment décrite, l'autre représentant l'émission par fluorescence du luminophore centrée sur 560 nm. Le calcul de la puissance de chaque composante est donné par les équations 19 et 20.

$$P_{bleue} = \int_{400\,nm}^{495\,nm} P_{opt}(\lambda)d\lambda \qquad \textbf{Équation 19}$$

$$P_{jaune} = \int_{496\,nm}^{800\,nm} P_{opt}(\lambda)d\lambda \qquad \textbf{Équation 20}$$

Grâce à ces paramètres optiques basés sur l'analyse du spectre, il est possible de différencier les contributions optiques provenant de la puce d'une part, et des luminophores d'autre part. On définit ainsi l'indicateur de dérive de point de couleur (Y/B) :

$$Y/B = \frac{\int_{496\,nm}^{800\,nm} P_{opt}(\lambda)d\lambda}{\int_{400\,nm}^{495\,nm} P_{opt}(\lambda)d\lambda} = \frac{P_{jaune}}{P_{bleue}} \qquad \textbf{Équation 21}$$

Dans le domaine de l'éclairage, ce n'est pas le paramètre Y/B qui est utilisé mais un indicateur équivalent : la température de couleur (exprimée en K) : C'est la température du radiateur de Planck qui présente un rayonnement a la même chromaticité que celle du stimulus donné. De façon usuelle, rares sont les sources à avoir des spectres semblables aux corps noirs. Ainsi, la notion de température de couleur proximale a été définie comme étant la température du radiateur de Planck dont la couleur perçue ressemble le plus, dans les conditions d'observation bien définies, à celle d'un stimulus donné de même luminosité [21]. La température de couleur proximale d'une source lumineuse, notée T_{cp}, évaluée par la méthode de Mc CAMY, à partir de ses coordonnées chromatiques x et y (coordonnées du point de couleur équivalent dans le diagramme CIE XYZ 1931). Ces dernières sont calculées à partir des composantes trichromatiques X, Y, Z, elles-mêmes déterminées à partir de la répartition spectrale énergétique du rayonnement de la source considérée (par exemple sa luminance énergétique L_λ échantillonnées par pas de $\Delta\lambda$) et des fonctions colorimétriques normalisées $\bar{x}_\lambda$, $\bar{y}_\lambda$, $\bar{z}_\lambda$ d'un observateur dit de référence [22].

Les composantes trichromatiques étant définies par :

$$X = \sum_\lambda L_\lambda . \bar{x}_\lambda . \Delta\lambda \qquad \textbf{Équation 22}$$

$$Y = \sum_\lambda L_\lambda . \bar{y}_\lambda . \Delta\lambda \qquad \textbf{Équation 23}$$

$$Z = \sum_\lambda L_\lambda . \bar{z}_\lambda . \Delta\lambda \qquad \textbf{Équation 24}$$

Les coordonnées chromatiques x et y sont données par :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \qquad \textbf{Équation 25}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \qquad \textbf{Équation 26}$$

Le paramètre T_{cp} est finalement déterminé par la relation [23] :

$$T_{cp} = 5520{,}33 - 6823{,}3n + 3525n^2 - 449n^3 \quad \textbf{Avec } n = \frac{x - 0{,}3320}{y - 0{,}1848} \qquad \textbf{Équation 27}$$

La couleur proximale d'une source lumineuse caractérise sa teinte. Les lumières de teintes chaudes (Jaune) ont des températures de couleur autour de 3000 K et les lumières de teintes froides (bleu), des températures comprises entre 5000 K et 10 000 K. Cette constatation peut être appréciée sur le diagramme CIE 1931 (Figure 30). Typiquement, les coordonnées chromatiques des modules de LEDs étudiés dans ce mémoire sont de :

- x=0,32 et y=0,33 pour la technologie TFFC.
- x=0,33 et y=0,35 pour la technologie VTF.

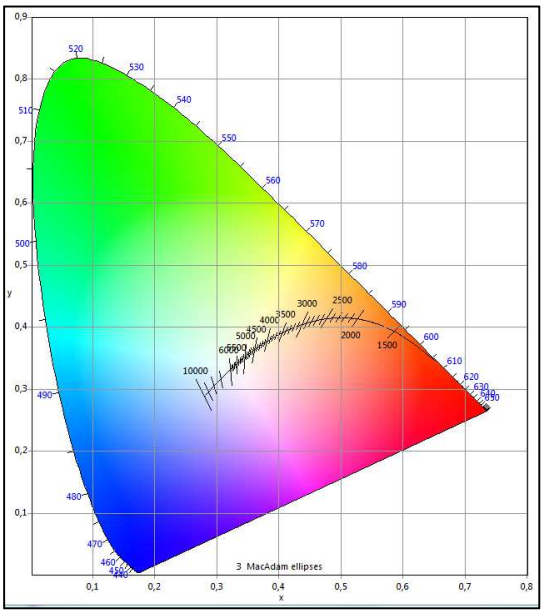


Figure 30 : Diagramme de chromaticité CIE 1931 avec le tracé de la température du radiateur de Planck en fonction de sa température (K) [24].

2.3.4 Bilan des paramètres optiques retenus

Le Tableau 7 suivant résume l'ensemble des paramètres optiques retenus pour le suivi des composants lors des campagnes de vieillissement. Les valeurs typiques sont données pour des modules LEDs multi-puce neufs (quatre puces en série) à un courant de 200 mA et un T_{case} de 40 °C.

La mesure des paramètres optiques des modules multi-puce viennent d'être présentés. Le paramètre fonctionnel principal est la puissance optique totale, qui déterminera, pour un critère de défaillance donné, l'instant de défaillance d'un module. Par ailleurs, le spectre étant composé de deux contributions bleue et jaune, il est impératif de suivre ces puissances optique séparément afin de décorréler la partie intrinsèque à la puce et celle issue de la conversion optique. De plus, les paramètres Y/B et la température de couleur proximale T_{cp} permettront de caractériser la stabilité du point de couleur dans le temps.

Paramètre	Expression théorique/calcul	Valeur typique, composant multi-puce neuf (4 puces)
P_{opt} (W)	$\int_{400\,nm}^{800\,nm} P_{opt}(\lambda)d\lambda$	0,6 W
P_{bleue} (W)	$\int_{400\,nm}^{495\,nm} P_{opt}(\lambda)d\lambda$	0,16 W
P_{jaune} (W)	$\int_{496\,nm}^{800\,nm} P_{opt}(\lambda)d\lambda$	0,46 W
Y/B	$\frac{P_{jaune}}{P_{bleue}}$	2,8-3,2
Température de couleur (K)	$T_{cp} = 5520{,}33 - 6823{,}3n + 3525n^2 - 449n^3$	5460-4970 K

Tableau 7 : Paramètres optiques identifiés sur LED GaN multi-puce ainsi que leurs valeurs typiques mesurées. I_f= 200 mA, T_{case} =40 °C.

2.4 Mesures des paramètres thermiques d'un module à LEDs

Les dispositifs à LEDs de puissance actuels, nécessitent, en priorité, un management thermique très performant. La difficulté dans l'analyse de modules multi-puce réside dans le maintien de la température de jonction des différentes puces durant l'ensemble des manipulations et des vieillissements. En effet, lors d'une caractérisation électrique et optique, le module s'auto-échauffe très rapidement pour des courants supérieurs à 100 mA.

Lors du vieillissement de tels assemblages, la résistance thermique peut s'améliorer dans un premier temps suite à une stabilisation structurelle des matériaux, mais tend ensuite à augmenter reflétant une dégradation pouvant être la fatigue thermomécanique de l'assemblage et/ou des processus d'interdiffusion pouvant aboutir à une dégradation des performances thermiques de certaines couches.

Il est donc incontournable de caractériser le comportement thermique d'un composant lors d'un vieillissement. Différentes techniques permettent de mesurer la température moyenne de jonction d'une ou plusieurs LEDs : caractérisation optique, la mesure impulsionnelle, la thermographie IR ou la méthode transitoire [25]. La caractérisation optique et la thermographie IR ne sont pas adaptées à cause de la présence d'un luminophore. Dans cette étude, les mesures thermiques seront effectuées par méthode transitoire, le T3Ster®. C'est un moyen industriel, adapté à cette étude car il permet de localiser les résistances thermiques internes de l'assemblage d'un composant. Cet équipement étant propriétaire, nous avons confronté les résultats du T3Ster® à d'une part, un modèle analytique, et d'autre part un modèle par éléments finis. Le but n'est pas de développer un modèle numérique optimisé, mais cette démarche permettra de confirmer ou non la cohérence des mesures T3Ster®, afin d'affiner les futures analyses lors des vieillissements et ainsi pré-localiser les défauts d'écoulement thermique dans les structures. La compréhension des modifications thermiques révélées par les vieillissements sera alors facilitée.

2.4.1 Mesure thermique en régime transitoire

Le principe de cette mesure est d'évaluer les grandeurs thermiques et, plus particulièrement, la résistance thermique des modules de LEDs étudiées. L'équipement utilisé (T3ster®) se base sur une technique de mesure thermique transitoire, ce qui permet de caractériser l'écoulement thermique au sein des composants étudiés (caractérisation de la contribution thermique de chaque couche). Cette mesure se déroule en deux étapes :

- La première consiste, à l'aide d'un Keitley 2635A, à déterminer le facteur K du module de LED, qui traduit l'évolution du V_f en fonction de la température à courant faible. Le choix du courant est critique puisqu'il ne doit pas induire d'auto-échauffement du dispositif contrairement à une mesure impulsionnelle qui autorise des niveaux de courant élevés.
- La seconde, utilisant le T3Ster®, s'intéresse à la mesure temporelle de V_f du module de LED lors d'un échelon de puissance ($I_{chauffe}$ =200 mA et I_{mesure} =1 mA). Un schéma du banc de mesure est présenté en Figure 31.

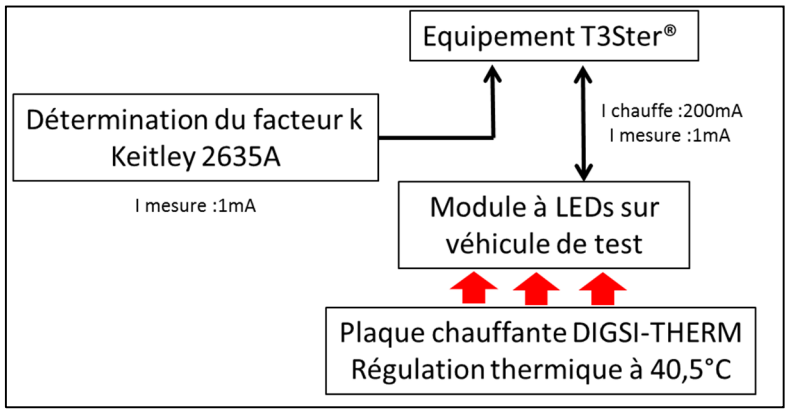


Figure 31 : Principe du banc de mesure thermique transitoire mis en œuvre.

L'équipement T3Ster, développé par la société MicReD propose une méthode de mesure de l'impédance thermique pour la caractérisation de puces et dispositifs packagés. En utilisant une implémentation de la méthode JEDEC (JESD51-1), la méthode consiste à passer le système d'un état chaud ($I_{chauffe}$= 200 mA dans notre étude) à un état froid (I_{mesure}= 1 mA) en utilisant un seul changement dans la puissance injectée. La réponse transitoire du changement de la température de jonction du composant entraine une réponse électrique transitoire, et l'analyse de cette dernière (par une série de déconvolutions) permet d'obtenir une caractérisation thermique complète du système. La première étape est une détermination expérimentale du facteur K du module à LEDs. Nous considérerons une répartition parfaite des lignes de courant électrique dans les structures pour utiliser le facteur K comme paramètre thermosensible représentatif de la T_j. Le principe est présenté en Figure 32. Cette réduction du V_f est due à une réduction du « *band gap* » en fonction de la température, explicitée par la formule de Y.P. VARSHINI [26] :

$$Eg = Eg_{0K} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \qquad \textbf{Équation 28}$$

avec α et β respectivement de l'ordre de 7,7.10-4 eV/K et 600K pour le GaN **[27]**.

La seconde étape consiste en l'application d'une puissance thermique afin d'échauffer le dispositif. Cette première phase permet d'établir la température haute stabilisée. Nous considérons que la puissance thermique est exclusivement dissipée au niveau de la jonction et des contacts Schottky. Après un certain temps de thermalisation, qui dépend non seulement des matériaux en présence (conductivité et capacité thermique) mais également des dimensions du dispositif (200 secondes dans le cas des composants étudiés et du banc de mesure associé), le système est relaxé vers la puissance de référence (I_{mesure}). Le suivi du V_f pendant la phase transitoire permet de calculer la température de jonction moyenne en fonction du temps et ainsi de remonter à la résistance thermique totale du système. Le système de mesure suit donc l'écoulement thermique à travers le dispositif à LEDs. La partie la plus délicate, réside dans l'interprétation de l'écoulement thermique en se basant sur une mesure unique $V_f(t)$ pour en déduire les résistances thermiques internes. Une analyse mathématique par déconvolution de la courbe de refroidissement permet de donner un modèle équivalent de la structure thermique série du système, entre la jonction et le puits thermique par représentation cumulative de type $C_{th}(R_{th})$. Le principe est illustré en Figure 33.

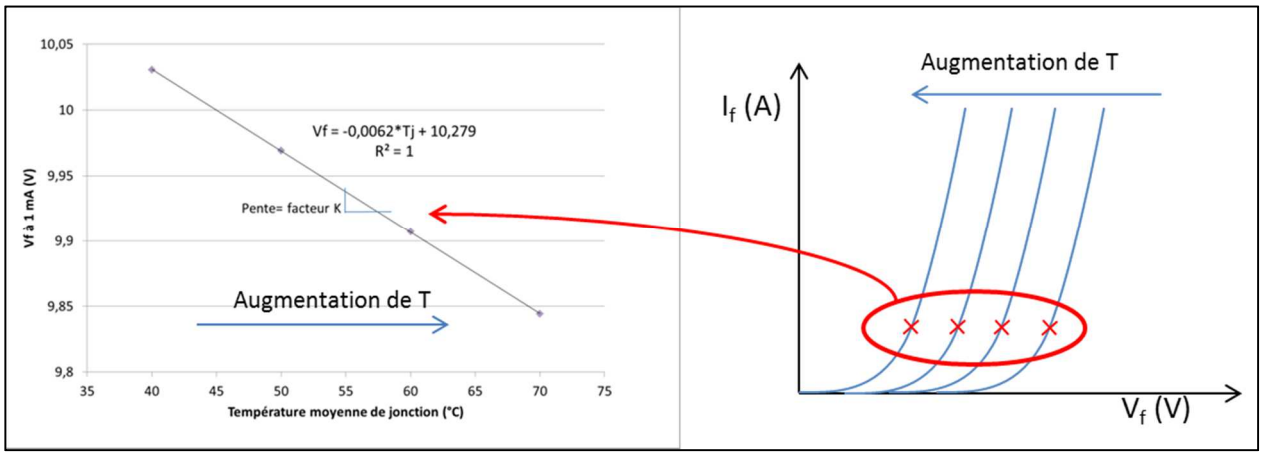


Figure 32 : Principe de détermination du facteur K des modules à LEDs.

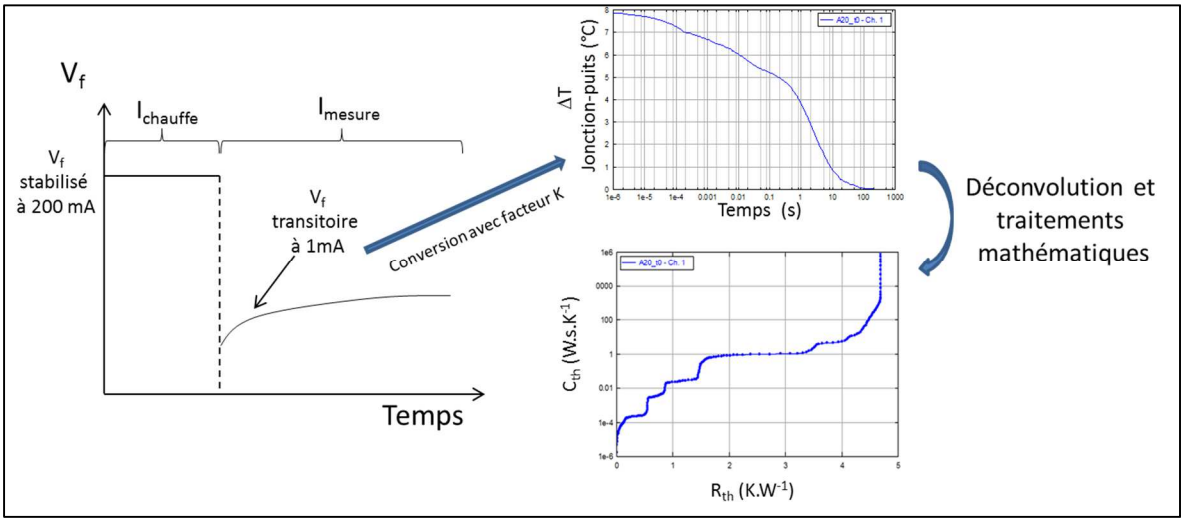


Figure 33 : Principe de la mesure thermique transitoire et de la reconstruction de la courbe cumulative Cth=f(Rth).

La représentation cumulée de $C_{th}(R_{th})$ permet, théoriquement, d'identifier chacune des couches traversées par l'écoulement thermique. Chaque couche doit donc apparaître sous la forme d'une aire présentant une composante capacitive et une composante résistive (C_{th}*R_{th}). Cette représentation étant l'aboutissement de nombreuses opérations mathématiques non détaillées dans ce manuscrit mais dont on trouvera le développement analytique en références [28] [29]. Une dérivée du signal temporel suivie d'une déconvolution numérique permet d'aboutir aux constantes de temps caractéristiques du refroidissement de chaque couche de la structure. Dans un second temps, la réponse temporelle est discrétisée puis identifiée à un modèle thermique équivalent (modèle de Foster) pour être finalement identifiée à un modèle thermique équivalent de Cauer [30]. Ce dernier permet une représentation dans un repère $C_{th}(R_{th})$. Dans ce contexte, nous avons jugé pertinent de reconstruire la caractéristique $C_{th}(R_{th})$ des structures étudiées en considérant deux voies:

- D'une part de manière analytique, en calculant les résistances thermiques équivalentes de chaque matériau. Cette étude comportera deux approches : la première considérant que les lignes de flux de chaleur sont parallèles alors que la seconde tient compte des effets de divergence de flux prenant en compte l'étalement de chaleur (effet de « *spreading* »).
- D'autre part, une modélisation par éléments finis du comportement thermique des structures étudiées.

Ces deux calculs complémentaires nous permettront de confronter les valeurs et tendances à la mesure T3Ster®. Ces deux méthodes sont maintenant détaillées dans le paragraphe suivant.

2.4.2 Modèle thermique analytique équivalent

La résistance thermique d'un système est définie par le rapport de la différence de température entre deux surfaces isothermes (T_1 et T_2) au flux thermique q les traversant (Cf. Figure 34).

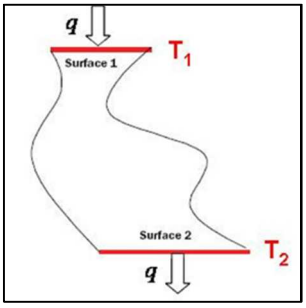


Figure 34 : Illustration de la résistance thermique [31].

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{q} \qquad \textbf{Équation 29}$$

Lorsque le matériau est homogène et que la section à travers laquelle s'écoule le flux thermique q est constante, cela impose que les lignes du vecteur q sont parallèles. Dans ces conditions, la résistance thermique R_{th} d'un matériau ou d'une couche de matériau est liée à sa conductivité thermique (λ, en $W.m^{-1}.K^{-1}$), sa surface (S, en m^2) et son épaisseur (e, en m). C'est ce que l'on définit par la résistance thermique homogène unidimensionnelle (R_{th} en $K.W^{-1}$) par :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \qquad \textbf{Équation 30}$$

Ce modèle est communément appelé « résistance unidimensionnelle » ou « résistance 1D », considère toute la surface S de chaque couche. Nous l'appellerons « résistance 1D » dans la suite du document. Ce modèle s'applique si la surface S à travers laquelle s'écoule le flux de chaleur est constante. Le flux de chaleur est alors perpendiculaire à la surface S. Dans le cas des LEDs et dans la quasi-totalité des composants électroniques, la surface disponible pour le flux thermique est croissante (puce vers boîtier puis dissipateur).

La géométrie a alors une influence considérable sur la dissipation thermique au sein d'un système aussi complexe qu'un assemblage à LEDs multi-puce. La source de chaleur, représentée par la zone active se trouve au sein d'un composant dont le substrat est latéralement de dimension supérieure puis l'ensemble est reporté sur un support de surface plus grande. Par conséquent, la conduction suivant l'axe principal établi la source chaude (zone active) vers la source froide refroidisseur, est perturbée par des effets de bord c'est-à-dire de diffusion latérale de la chaleur. C'est là qu'intervient la notion importante de « résistance de *spreading* » qui permet de caractériser l'influence de la diffusion latérale (ou étalement) de la chaleur et qui vient s'additionner à la résistance principale du système. La Figure 35 schématise le phénomène.

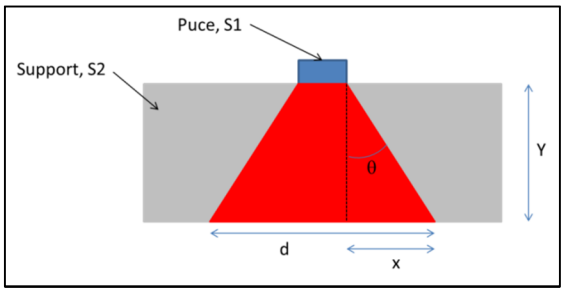


Figure 35 : Illustration de l'étalement de chaleur (phénomène de *spreading*).

La résistance thermique peut s'écrire de cette manière :

$$Rth = Rth_{1D} + Rth_{spreading} \qquad \textbf{Équation 31}$$

Dans la bibliographie, différents modèles de détermination de l'angle d'étalement de la chaleur sont proposés. La solution la plus simple considère que l'angle est constant et égal à 45° quelle que soit la nature des matériaux assemblés [32]. Un second modèle empirique intègre l'influence de la conductivité thermique de l'embase [33] :

$$\theta = 90 \tanh\left[0{,}355\left(\frac{\pi\lambda_{\text{sup port}}}{180}\right)^{0,6}\right] \qquad \textbf{Équation 32}$$

Dans ce manuscrit, le modèle appliqué aux modules de LEDs se base sur celui proposé par Y .S. MUZYCHKA qui caractérise l'écoulement de la chaleur en coordonnées cylindriques dans une structure bi-couche [8]. Ce modèle a été étendu par A.CORFA à n couches et rendu applicable aux structures de LEDs de puissance [7]. Nous déterminerons le rayon équivalent « a » des deux structures par l'intermédiaire de l'équation 33. Le rayon b correspondant au niveau inférieur (céramique ou métal) sera calculé de la même façon.

$$a = \sqrt{\frac{S_{puce}}{\pi}} \qquad \textbf{Équation 33}$$

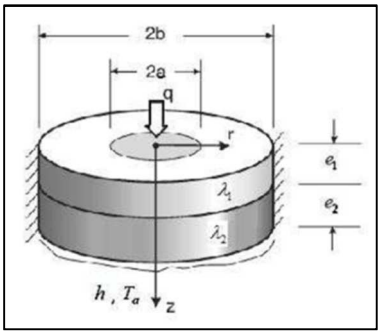


Figure 36 : Modèle thermique de Y .S. MUZYCHKA [8].

Les paramètres suivants sont considérés :

- e l'épaisseur totale du système.
- (e_1, λ_1) respectivement l'épaisseur et la conductivité thermique de la première couche.
- (e_i, λ_i) respectivement l'épaisseur et la conductivité thermique de la $i^{ème}$ couche.
- a le rayon de la puce.
- b le rayon de l'embase.

- q le flux de chaleur généré par la puce.
- h le coefficient de convection sur la face arrière du support, infini dans notre cas (couplage thermique parfait).
- J_0 est la fonction de Bessel de 1ère espèce d'ordre 0.
- J_1 est la fonction de Bessel de 1ère espèce d'ordre 1.
- δ_j est la racine j-ième de J_1 approximée par Stokes :

$$\delta_i = \frac{\beta_j}{4}\left[1 - \frac{6}{\beta_j^2} + \frac{6}{\beta_j^4} - \frac{4716}{\beta_j^6} + \frac{3902418}{70\beta_j^8}\right] \text{ avec } \beta_j = \pi(4j+1) \text{ avec } j \text{ entier naturel.}$$

Ce modèle à n couches permet de calculer la résistance thermique équivalente, par l'équation :

$$Rth = Rth_{1D} + Rth_{spreading} = \frac{1}{\pi b^2}\sum_{k=1}^{n}\frac{e_k}{\lambda_k} + \frac{2}{\pi\frac{a^2}{b}\lambda_1}\sum_{j=1}^{\infty}A_j\left(j,\frac{a}{b}\right)..\left[-\theta_{1,j}\right]\frac{J_1\left(\frac{\delta_j a}{b}\right)}{\delta_j^2.J_0(\delta_j)} \qquad \textbf{Équation 34}$$

$$\text{avec } A_j = \frac{2\frac{a}{b}.J_1\left(\frac{\delta_j.a}{b}\right)}{\delta_j^2.J_0^2(\delta_j)},\ \theta_{i,j} = \frac{\tanh\left(\frac{\delta_j.e_i}{b}\right) + \frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}}\theta_{i+1,j}}{1 + \frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}}\tanh\left(\frac{\delta_j.e_i}{b}\right)\theta_{i+1,j}} \text{ et } \theta_{n,j} = \tanh\left(\frac{\delta_j.e_n}{b}\right)$$

Si l'on applique maintenant cette méthode à l'exemple de la structure caractérisée en Figure 38 (structure TFFC), il est donc possible d'évaluer les contributions thermiques (R_{th} et C_{th}) de chaque couche de la structure. On rappelle que la capacité calorifique massique de la i^{ème} couche est donnée par l'expression :

$$Cth_i = V_i.Mv_i.Cth_{i_{p0}} \qquad \textbf{Équation 35}$$

avec V_i le Volume de matériau (m^3), Mv_i la masse volumique ($Kg.m^{-3}$) et $Cth_{i_{p0}}$ la capacité calorifique à pression constante du matériau ($W.s.Kg^{-1}.K^{-1}$).

La structure de l'assemblage puce-céramique pour la structure TFFC étant assez complexe, une structure équivalente mono-puce a été utilisée pour les calculs de R_{th}. Elle est détaillée en Figure 37. La puce GaN de 1 mm² est reportée selon la technique FC sur des plots d'accueil en Au (couche discontinue). Les plots d'accueil en Au de 30 µm d'épaisseur sont eux-mêmes fixés sur une métallisation en Ni. La géométrie des plots d'accueil a été déterminée par tomographie à rayons X suivi d'un traitement d'image (Figure 37-a). Le rapport de la surface occupée par les plots sur la surface totale de la puce est estimé à 0,5. Ces valeurs géométriques ont permis de déterminer la structure thermique équivalente de l'assemblage puce-céramique en considérant que les espaces entre plots sont parfaitement isolants d'un point de vue thermique. Le modèle équivalent est constitué d'une puce de 0,5 mm² (0,7*0,7 mm) montée sur un plot pleine puce de même dimension. Ce modèle est donc simplifié et ne prend pas en compte l'ensemble des couches présentes, mais permettra d'aboutir à une valeur approchée de résistance thermique. La jonction est considérée sur la face inférieure de la puce GaN et elle sera donc uniquement considérée pour sa contribution capacitive. Cette structure sera répétée géométriquement quatre fois afin d'aboutir à une structure équivalente multi-puce à quatre éléments thermiques en parallèle (Figure 38).

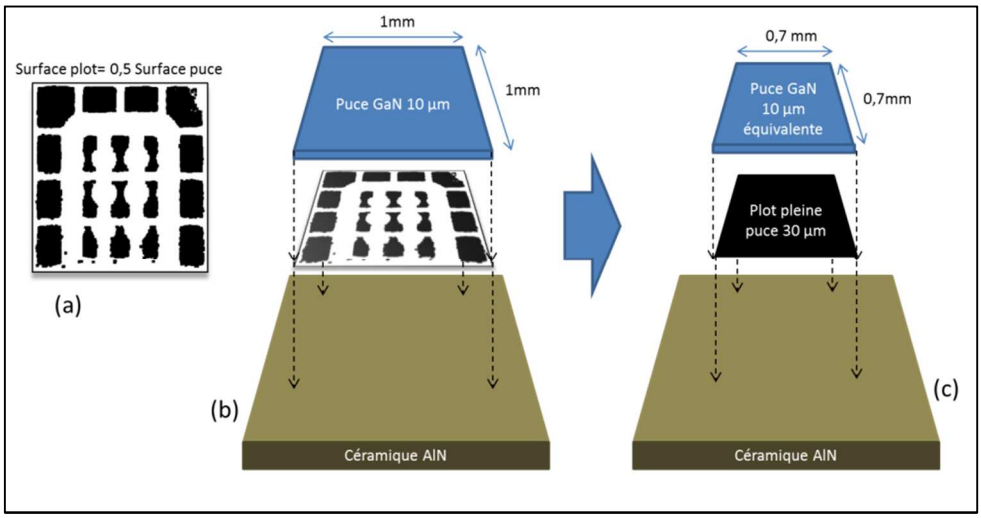


Figure 37 : Simplification et modèle équivalent de l'assemblage puce-céramique pour la structure TFFC.

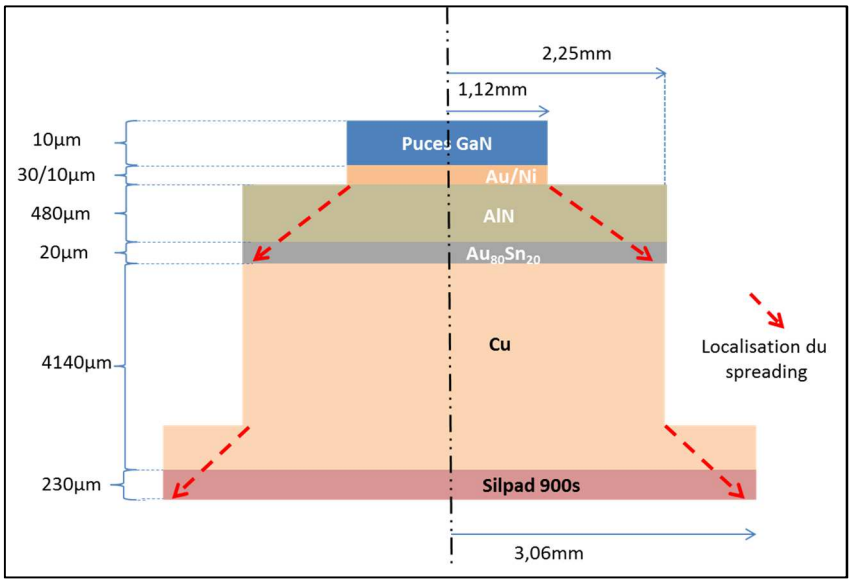


Figure 38 : Représentation schématique équivalente de la structure TFFC dans le repère cylindrique. Calcul des rayons équivalents selon l'équation 33.

La structure VTF étudiée est présentée en Figure 39. La structure élémentaire consiste en une puce brasée sur la céramique AlN, elle-même collée sur un support en Al. Cette structure ne nécessite pas de déterminer un modèle thermique équivalent car l'ensemble des couches sont fixées entre elles sur leur pleine surface. Cette structure élémentaire sera répétée géométriquement quatre fois afin d'aboutir à une structure multi-puce à quatre éléments en parallèle (Cf. Figure 39).

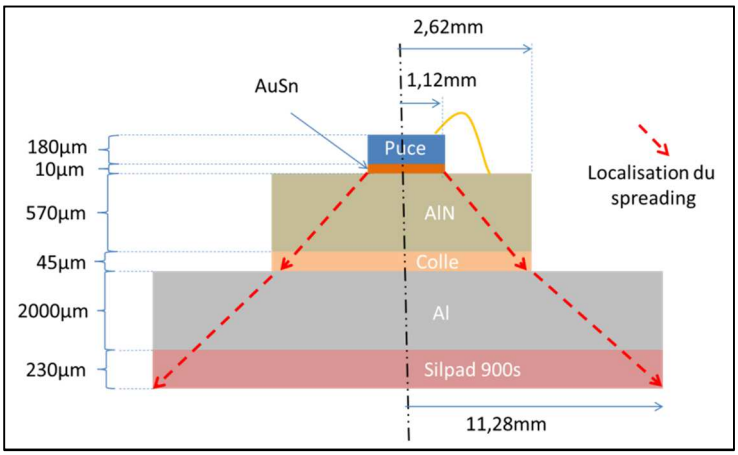


Figure 39 : Représentation schématique équivalente de la structure VTF dans le repère cylindrique. Calcul des rayons équivalents selon l'équation 33.

Chaque zone présentant un phénomène de spreading a été calculée séparément. La structure TFFC a été étudiée en deux temps par deux sous-assemblages :

- les niveaux puce / AlN / brasure
- les niveaux brasure / Cu / Silpad 900S.

il en est de même pour la structure VTF mais avec d'une part les niveaux puce / AlN / colle, et, d'autre part, les niveaux colle / Al / Silpad900S. Les contributions thermiques des différentes couches (R_{thi} et C_{thi}) pour la structure TFFC ainsi que les données matériaux sont listées en Tableau 8 sur la base des géométries présentées en Figure 38. Les données matériaux sont supposées linéaires sur la gamme de température de travail. La valeur du C_{thp0} pour le matériau Silpad 900S a été déterminée par analyse thermique différentielle (DSC pour *Differential Scanning Calorimetry*). On notera que la principale résistance thermique 1D provient du Cu à cause de son épaisseur relativement forte (4,1 mm) par rapport à l'épaisseur totale du composant. D'autre part, le phénomène de *spreading* apparaît essentiellement au niveau céramique, sous l'effet d'une rupture prononcée dans la surface disponible pour l'écoulement thermique.

Il est donc maintenant possible de confronter les valeurs calculées aux mesures T3Ster®. La comparaison graphique permet d'apprécier la cohérence du modèle avec la mesure T3Ster® (Figure 40). Les ordres de grandeur calculés permettent de définir la contribution de chaque matériau (zone R_{thi}*C_{thi}) dans le repère graphique $C_{th}(R_{th})$. La première information est la valeur de la résistance thermique entre la jonction et le puits thermique (R_{th} totale). Cette donnée correspond à la valeur du puits thermique lorsque la pente est infinie. Elle est ici d'environ 4,7 $K.W^{-1}$.

	λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	C_{thp0} ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)	C_{thi} ($W.s.Kg^{-1}.K^{-1}$)	R_{thi} (R_{1D} ;$R_{spreading}$) ($K.W^{-1}$)
GaN	130	490	$2,7.10^{-5}$	-
Au	317	128	$2,9.10^{-5}$	0,04 ; 0
Ni	90	440	$1,7.10^{-5}$	0,06 ; 0
AlN	150	740	$6,5.10^{-3}$	0,1 ; 1,07
$Au_{80}Sn_{20}$	60	160	$3,5.10^{-4}$	0,01 ; 0
Cu	400	380	$1,5.10^{-1}$	0,29 ; 0,09
Silpad 900S	1,6	890 (mesure DSC)	$2,8.10^{-2}$	2,41 ; 0
Total $R_{th\ jonction\text{-}silpad}$				4,25

Tableau 8 : Données matériaux et valeurs des C_{thi} et R_{thi} calculées pour la structure TFFC

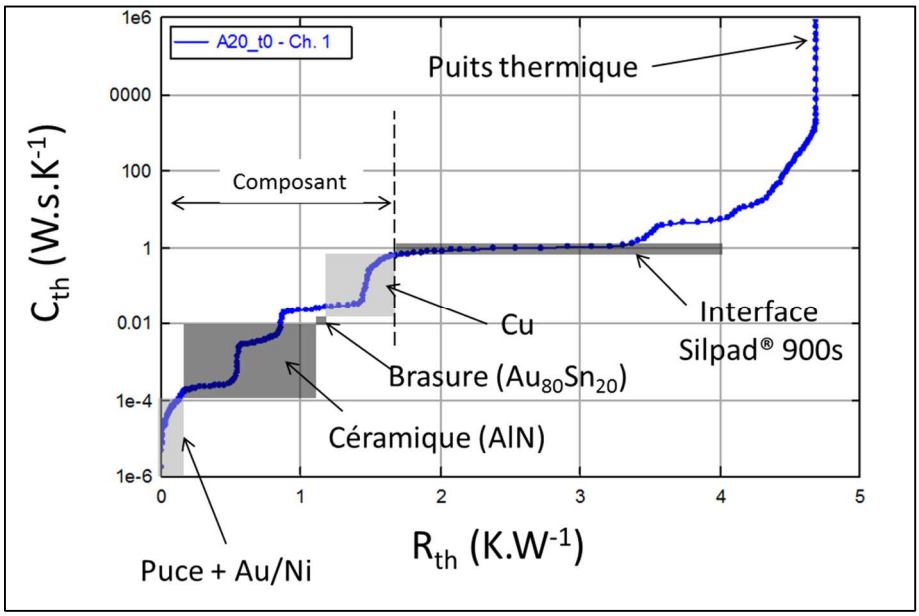


Figure 40 : Identification des différentes interfaces par superposition des valeurs de C_{th}-R_{th} calculées et mesurées sur la structure TFFC étudiée.

La courbe montre une résistance thermique du composant d'environ 1,7 $K.W^{-1}$ (jusqu'au Cu), une R_{th} de l'interface Silpad d'environ 1,5 $K.W^{-1}$ et au-delà, le puits thermique dans la plaque support du banc de test. On constate que les valeurs calculées ne correspondent pas parfaitement à la mesure mais l'objectif de cette comparaison n'est pas de faire correspondre exactement les deux analyses. L'objectif est d'identifier les contributions des matériaux et ainsi de les situer dans le repère $C_{th}(R_{th})$. Un bon accord est constaté entre les mesures et calculs. Lors des analyses comparatives plus fines durant les vieillissements (chapitre 3 et 4), ce modèle équivalent permettra donc de pré-localiser (niveau puce, brasure ou céramique) l'origine d'une variation de R_{th} globale mesurée à l'échelle du module. Théoriquement, si une couche se dégrade thermiquement, sa contribution sera plus importante selon l'axe des abscisses (R_{th}).

Concernant la structure VTF, les contributions thermiques des différentes couches (R_{thi} et C_{thi}) ainsi que les données matériaux sont données sur la base des géométries présentées en Tableau 9. La conductivité thermique de la colle ainsi que sa capacité thermique massique ont été approximées en considérant que le matériau contient 70% de poudre d'alumine (Al_2O_3) en volume. L'approximation consiste à réaliser une loi des mélanges en prenant 70% des propriétés physiques de l'alumine. On notera que la principale résistance thermique 1D revient au Ge, substrat d'accueil des puces GaN. D'autre part, le phénomène de *spreading* apparaît essentiellement au niveau céramique (1,07 $K.W^{-1}$), dû à une rupture prononcée dans la surface disponible pour l'écoulement thermique entre les puces et la céramique.

	λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	C_{thp0} ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)	C_{thi} ($W.s.Kg^{-1}.K^{-1}$)	R_{thi} (R_{1D} ;$R_{spreading}$) ($K.W^{-1}$)
Ge	59,9	320	$2,8.10^{-4}$	0,77 ; 0
$Au_{80}Sn_{20}$	60	160	$3,1.10^{-5}$	0,07 ; 0
AlN	150	740	$1,8.10^{-2}$	0,1 ; 1,07
Alumine (Al_2O_3)	10,7	795	-	-
Colle Al_2O_3	7,5 (70 % de Al_2O_3)	556 (70 % de Al_2O_3)	9.10^{-4}	0,15 ; 0
Al	160	897	0,42	0,03 ; 0,59
Silpad 900S	1,6	890 (mesure DSC)	0,23	0,36 ; 0
Total $R_{th\ jonction\text{-}silpad}$				2,97

Tableau 9 : Données matériaux et valeurs des C_{thi} et R_{thi} calculées pour la structure VTF.

La confrontation de ces valeurs avec la courbe $C_{th}(R_{th})$ est présentée en Figure 41. Tout comme l'analyse dédiée à la structure TFFC, le cumul des différentes zones $R_{thi}*C_{thi}$ permet de situer les contributions thermiques de chaque matériau dans la caractéristique thermique globale du composant par le T3Ster®. On notera un plus grand écart entre la résistance thermique calculée et la valeur du puits thermique mesuré que pour la structure TFFC. Ceci peut venir de l'influence plus marquée du support du banc de test.

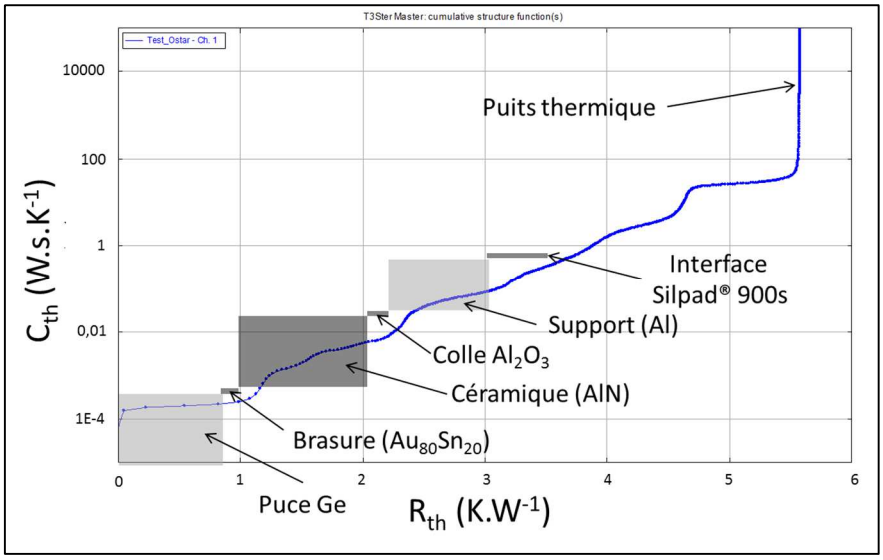


Figure 41 : Identification des différentes interfaces par superposition des valeurs de C_{th}-R_{th} calculées et mesurées sur la structure VTF étudiée.

Nous avons pu confronter les mesures thermiques T3Ster® et calculs analytiques appliqués à deux structures de modules de LEDs différentes. Les contributions de chaque matériau ont pu être positionnées en regard des mesures. Afin de confirmer cette cohérence entre mesures et calculs analytiques, des simulations numériques en environnement ANSYS® ont été mises en oeuvre afin de confirmer les tendances dégagées par cette première comparaison.

2.4.3 Simulations numériques par éléments finis

Les simulations par éléments finis vont permettre d'analyser et interpréter le chemin thermique en 3 dimensions sur les structures complexes étudiées. Le but n'est pas de développer et de recaler un modèle en regard des mesures et modèle analytique mis en place précédemment, mais la simulation par éléments finis apporte une confrontation supplémentaire aux valeurs de R_{th} obtenues avec les mesures T3Ster® et calculées analytiquement. Par conséquent, les structures de LEDs étudiées (TFFC et VTF) seront simulées uniquement d'un point de vue résistance thermique et les paramètres matériaux sont les mêmes que pour les calculs analytiques (Tableau 8 et Tableau 9).

a. *Géométries et simplifications*

Nous considérerons dans toutes les simulations que les quatre puces d'un même module sont parfaitement identiques. La structure simulée du module TFFC présente un axe de symétrie géométrique mais également sur les conditions aux limites thermiques, ce qui permet de simplifier la structure à simuler. La Figure 42 met en évidence cet axe de symétrie et définit la structure utilisée en simulation. Le surmoulage polymère (polymère noir) n'a pas été retenu dans la simulation, car il présente un rôle mineur dans la dissipation des calories dans le composant. Les géométries des couches sont présentées dans le Tableau 10. On notera que le GaN n'est pas matérialisé. Devant la complexité de la structure de la puce TFFC (couches, vias, plots,…), on considère la puce comme un générateur de chaleur parfait que l'on a matérialisé par deux surfaces en Au de 1 mm² (Figure 42). Le flux thermique sera injecté par ces deux surfaces.

La structure du module VTF présente deux axes de symétrie sur la géométrie et les conditions aux limites thermiques. La structure est donc simplifiable selon ces deux axes. La Figure 43 met en évidence ces deux axes de symétrie et définit la structure utilisée en simulation. Les trous de fixation n'ont pas été pris en compte afin de pouvoir simplifier la structure selon ces deux axes de symétrie. Tout comme dans la structure TFFC, le GaN n'est pas matérialisé, le flux thermique sera injecté sur la surface des puces de Ge. Les géométries des couches sont présentées dans le Tableau 10.

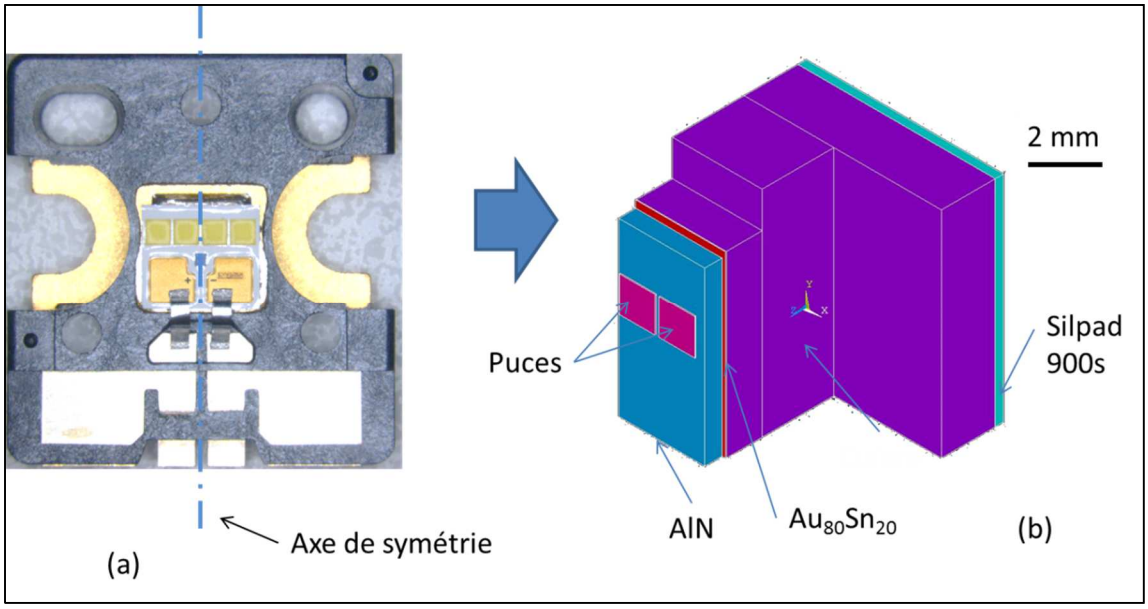


Figure 42 : Simplification de la structure TFFC (a) et présentation de la géométrie simulée sous ANSYS (b).

Matériau	Dimensions dans la structure : X*Y*Z
Puce (Au)	2 puces de 1000*1000*30 µm
Céramique (AlN)	2000*4700*480 µm
Brasure $Au_{80}Sn_{20}$	2050*5000*20 µm
Cu 1	2050*5000*1000 µm
Cu 2	2050*6000*2000 µm
Cu 3	5500*6000*1000 µm
Silpad 900s	5500*6000*230 µm

Tableau 10 : Modèle géométrique retenu des couches matérialisées pour la structure TFFC.

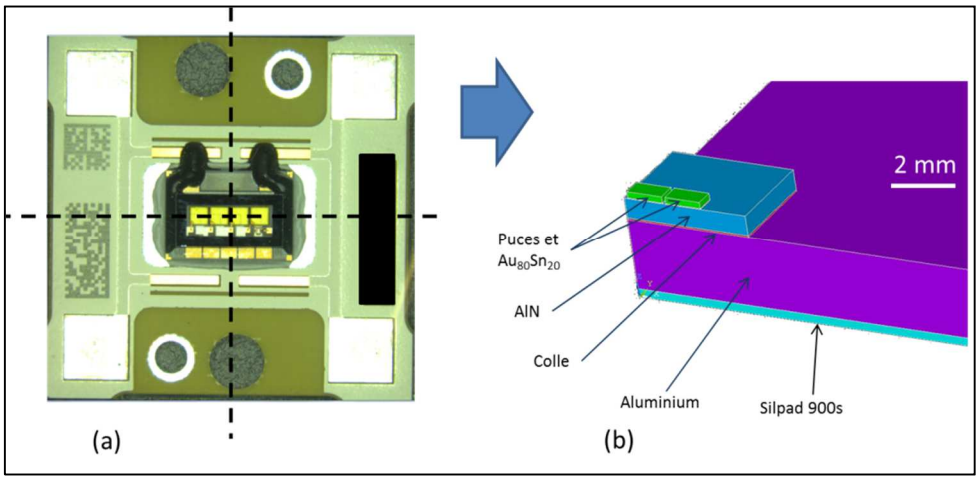


Figure 43 : Simplification de la structure VTF (a) et présentation de la géométrie simulée sous ANSYS (b).

Matériau	Dimensions dans la structure : X*Y*Z
Puce (Ge)	2 puces de 1000*500*180 µm
Brasure $Au_{80}Sn_{20}$	2 brasures de 1000*500*10 µm
Céramique (AlN)	3500*2500*570 µm
Colle Al_2O_3	3500*2500*45 µm
Al	10000*10000*2000 µm
Silpad 900s	10000*10000*230 µm

Tableau 11 : Géométrie des couches matérialisées pour la structure VTF.

b. Conditions d'interface

Lors de la création de la structure et avant le maillage, la fonction « VGLUE » d'Ansys ® qui permet de coupler des volumes entre eux, a été utilisée. Cette fonction permet de mettre en commun (c.a.d avoir les mêmes nœuds) deux volumes ayant une surface en contact. Elle permet d'éviter la présence de discontinuité entre deux volumes adjacents et les nœuds, situés sur une surface commune, appartiennent donc aux deux volumes.

c. Maillage

L'élément utilisé pour le maillage des deux structures est l'élément SOLID70, élément permettant de prendre en charge les phénomènes de conduction thermique en trois dimensions. Il présente un seul degré de liberté, la température. Le maillage tétraédrique est effectué avec l'outil de maillage automatique d'Ansys ®. Les zones à forts gradients thermiques attendus sont évaluées comme zones sensibles (niveau puce, brasure, collage) et sont remaillées, afin de garantir la présence d'au moins trois éléments dans l'épaisseur de chacun des matériaux. L'utilisation d'un maillage tétraédrique entrainera une incertitude de 30 % sur le résultat final [34]. Les maillages des deux structures sont illustrés en Figure 44 et Figure 45 respectivement pour la structure TFFC et VTF. Le nombre de nœuds et d'éléments utilisés pour les structures TFFC et VTF sont respectivement de 52779 et 10992, ainsi que 68226 et 14075.

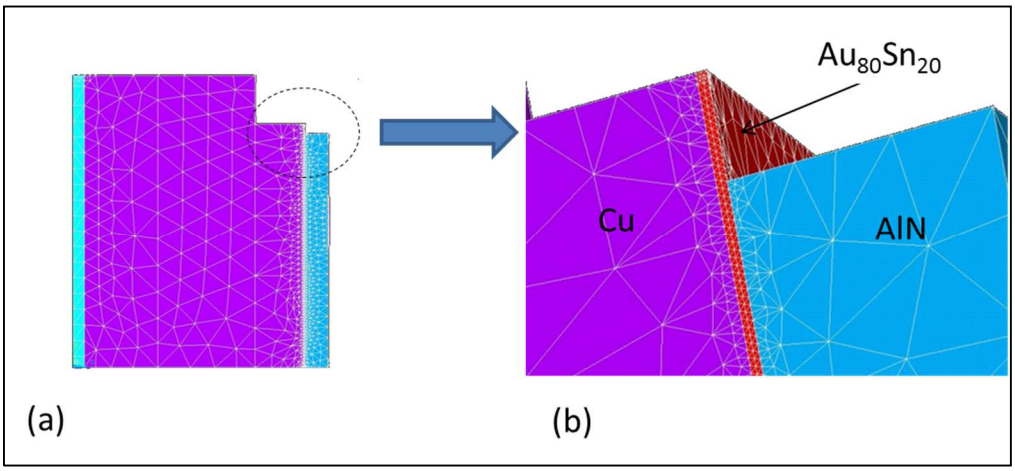


Figure 44 : Aperçu du maillage global (a) et d'une zone remaillée (b) de la structure TFFC.

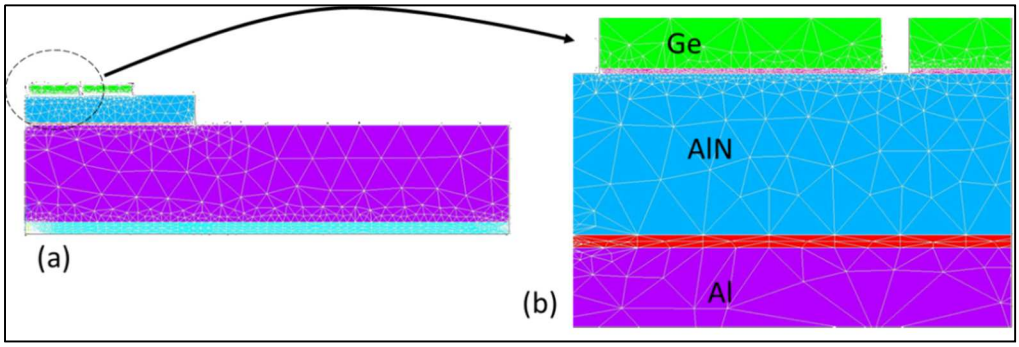


Figure 45 : Aperçu du maillage global (a) et d'une zone remaillée (b) de la structure VTF.

d. Conductivité thermique des matériaux

Les données matériaux de conductivités thermiques utilisées sont celles du Tableau 8 et Tableau 9 respectivement pour les structures TFFC et VTF. Les conductivités thermiques sont considérées isotropes et indépendantes de la température. Pour le niveau puce de la structure TFFC, nous avons choisi de garder la taille réelle des puces (1*1 mm²) afin que la simulation soit représentative du composant réel. Afin de traduire la discontinuité des plots d'Au au niveau du report de la configuration TFFC (50% de la surface de la puce), la valeur de conductivité thermique de l'Au implémentée dans la simulation a été divisée par deux (158,5 $W.m^{-1}.K^{-1}$ au lieu de 317 $W.m^{-1}.K^{-1}$).

e. Conditions aux limites

Les conditions aux limites consistent en l'application de deux contraintes thermiques. D'une part, l'injection d'un flux thermique sur la surface des puces définies et considérées comme générateurs thermiques parfaits. Nous avons choisi d'injecter 1 W thermique dans chaque structure, ce qui présente l'avantage d'obtenir directement la valeur des résistances thermiques par le relevé des températures après simulation. Dans un souci de simplicité de calculs, on a imposé la température de la face arrière des deux structures à 0°C. Cela constitue la référence thermique. La structure TFFC n'ayant qu'un seul axe de symétrie, c'est donc 0,5 W thermiques qui a été injecté dans la structure et équitablement réparti entre les deux puces (0,25 W+ 0,25 W). Concernant la structure VTF, elle présente deux axes de symétrie, c'est donc 0,25 W qui a été injecté dans la structure et équitablement réparti entre les deux puces (0,125 W+0,125 W). Les autres faces ne permettent aucun échange thermique vers l'extérieur. La Figure 46 permet de localiser la définition des conditions aux limites appliquées à nos simulations.

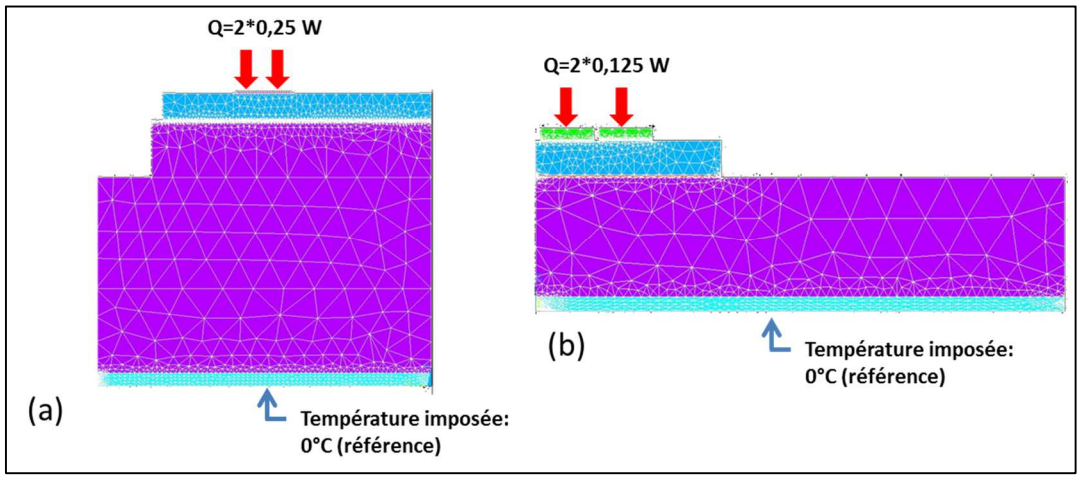


Figure 46 : Localisation et mise en place des conditions aux limites pour les structures TFFC (a) et VTF (b).

f. Présentation des résultats

Les résultats des simulations thermiques statiques ont été extraits en relevant la température à l'interface entre chaque volume de matériau. Chaque température est une moyenne de l'ensemble des nœuds de la surface utile à l'écoulement thermique. Pour chaque surface, les valeurs moyennes, minimales et maximales sont sous la forme : « min-**moyenne**-max ». Les résultats sont présentés en Figure 47 et Figure 48 respectivement pour les structure TFFC et VTF.

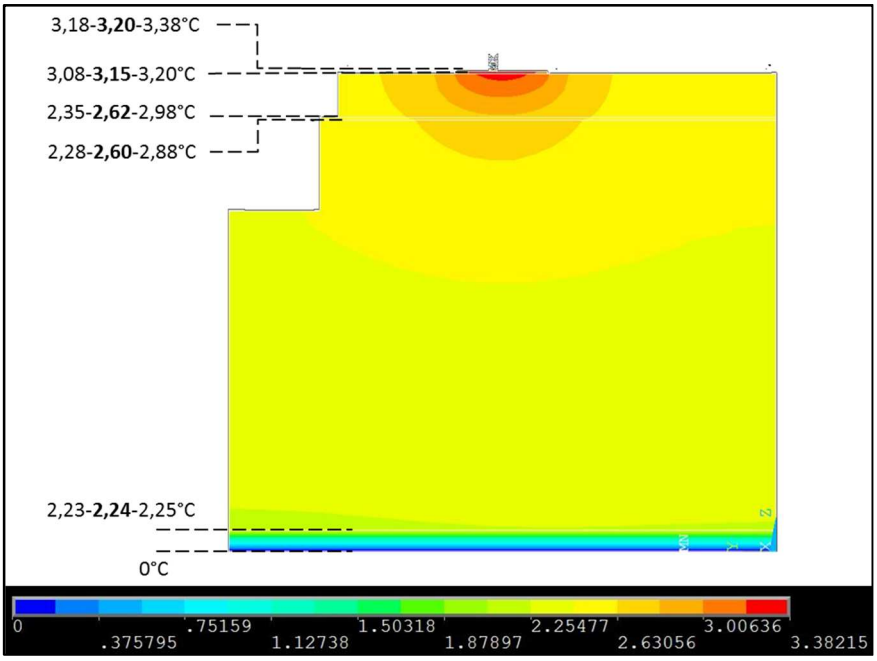


Figure 47 : Résultat de la simulation de la structure TFFC ainsi que les températures associées.

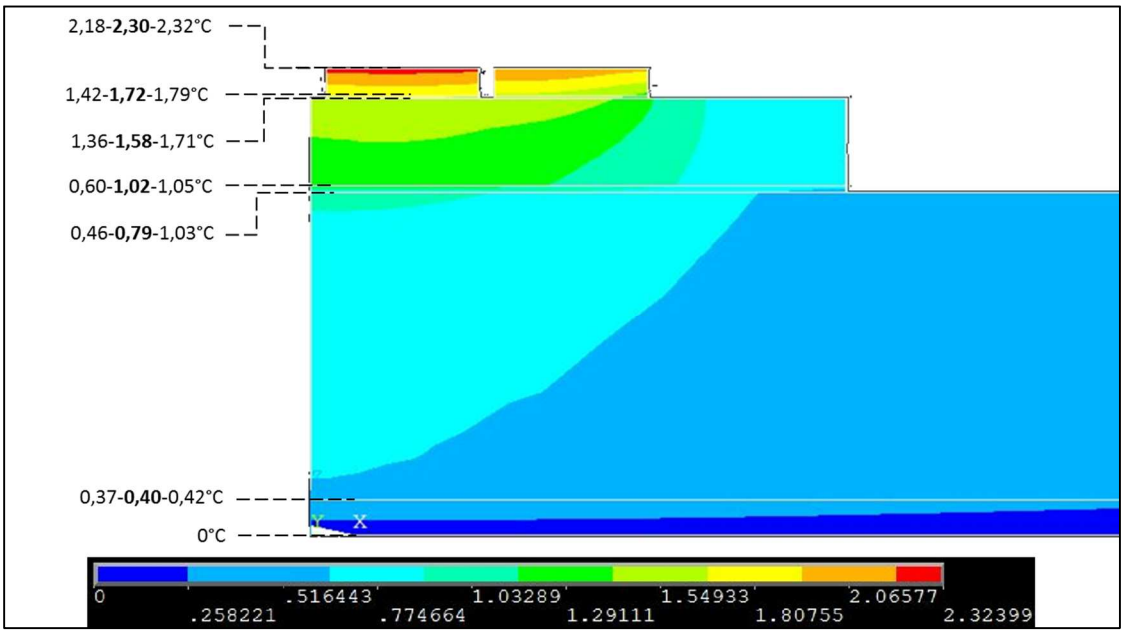


Figure 48 : Résultat de la simulation de la structure VTF ainsi que les températures associées.

	$R_{th\ j\text{-}silpad}$ mesurée ($K.W^{-1}$)	$R_{th\ j\text{-}silpad}$ calculée ($K.W^{-1}$)	$R_{th\ j\text{-}silpad}$ simulée ($K.W^{-1}$)	Ecart en $K.W^{-1}$ et % entre valeur simulée et mesurée
Structure TFFC	3,30	4,25	3,40	0,85 (25 %)
Structure VTF	3,50	2,97	2,30	0,67 (19 %)

Tableau 12 : Bilan sur les valeurs de résistances thermiques mesurées, calculées et simulées pour les deux structures.

Les résultats des simulations sont présentés en Tableau 12. Au premier ordre, on peut noter un bon accord entre les valeurs de $R_{th\ jonction\text{-}silpad}$ globale mesurées, calculées et simulées pour les deux structures. Les écarts de résistance thermique s'élèvent à 0,87 $K.W^{-1}$ (TFFC) et 0,67 $K.W^{-1}$ (VTF).

Le relevé des températures aux interfaces donne directement accès aux valeurs de résistances thermiques de chacune des couches des structures. Ainsi, il est possible de comparer les résistances thermiques de chacun des matériaux entre les valeurs calculées et simulées (Tableau 13 et Tableau 14). Pour la structure TFFC, les différences marquées se situent au niveau puce, céramique et brasure. En effet, le modèle analytique a utilisé une structure simplifiée pour la zone puce, assez complexe géométriquement. Pour la partie céramique (AlN), nous avons considéré dans le modèle analytique aucun *spreading* dans le Cu. Or, la simulation a mis en évidence du *spreading* dans la partie haute du plot en cuivre (déformation des isothermes). Cela peut donc expliquer que la valeur calculée de la résistance thermique liée à la céramique soit plus grande que la valeur simulée. Concernant la structure VTF, les différences importantes de résistances thermiques sont attribuées aux zones concernées par le *spreading*, à savoir le matériau AlN et Al. De la même manière que la structure TFFC, ces différences sont expliquées par une différence de conditions aux limites considérées entre les calculs analytiques et simulations. On notera que les grandes différences sont constatées sur les contributions mineures en terme de résistance thermique ($Au_{80}Sn_{20}$).

	R_{thi} calculée (R_{1D} +$R_{spreading}$) ($K.W^{-1}$)	R_{thi} simulée (R_{1D} +$R_{spreading}$) ($K.W^{-1}$)	Écart en $K.W^{-1}$et % entre valeur simulée et calculée
GaN	0,02	0,05	0,07 (58 %)
Au	0,04		
Ni	0,06		
AlN	1,17	0,53	0,64 (54 %)
$Au_{80}Sn_{20}$	0,01	0,02	0,01 (100 %)
Cu	0,38	0,36	0,02 (5 %)
Silpad 900S	2,41	2,24	0,17 (7 %)
Total $R_{th\ jonction\text{-}silpad}$	4,27	3,4	0,87 (20 %)

Tableau 13 : Comparaison des contributions calculées et simulées de chaque matériau pour la structure TFFC.

	R_{thi} calculée (R_{1D} +$R_{spreading}$) ($K.W^{-1}$	R_{thi} simulée (R_{1D} +$R_{spreading}$) ($K.W^{-1}$)	Écart en $K.W^{-1}$et % entre valeur simulée et calculée
Ge	0,77	0,58	0,19 (24 %)
$Au_{80}Sn_{20}$	0,07	0,12	0,05 (71 %)
AlN	1,17	0,56	0,61 (52 %)
Colle Al_2O_3	0,15	0,23	0,08 (53 %)
Al	0,62	0,39	0,23 (37 %)
Silpad 900S	0,36	0,4	0,04 (11 %)
Total $R_{th\ jonction\text{-}silpad}$	2,97	2,30	0,65 (21 %)

Tableau 14 : Comparaison des contributions calculées et simulées de chaque matériau pour la structure VTF.

La démarche entreprise sur l'étude thermique des composants identifiés permet donc de valider l'écoulement thermique, en particulier le phénomène de *speading*, généralement difficile à quantifier. Au second ordre, cela a permis de localiser les contributions thermiques de chacun des matériaux et de confirmer les découpages thermiques proposés par le T3Ster® (Figure 40 et Figure 41). Ce point sera très précieux lors des analyses de défaillances menées en chapitre 3 et 4, afin de pré-localiser des défauts et proposer des mécanismes de défaillance associés.

2.5 Etude paramétrique en vue de l'analyse de défaillance

Afin d'extraire un maximum d'informations d'un composant défaillant ou à analyser, la méthodologie impose logiquement d'effectuer l'ensemble des caractérisations ne modifiant pas l'intégrité du dispositif avant de réaliser une microsection du composant et poursuivre avec les analyses destructives. Une vue d'ensemble de notre procédé d'analyse de défaillance de composant est présentée en Figure 49 avec les techniques de caractérisations présentées en paragraphe 2.1.1.

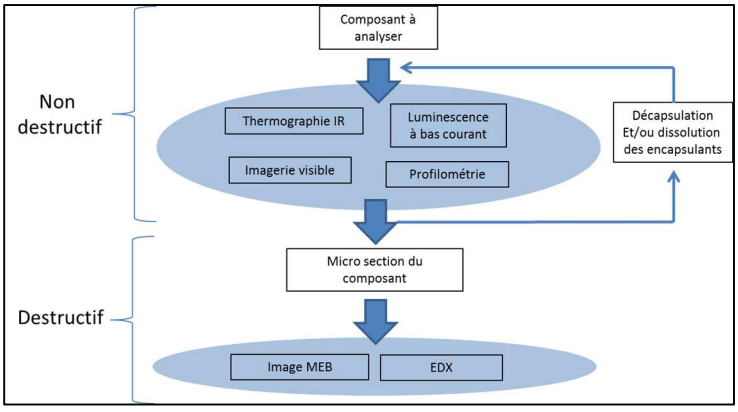


Figure 49 : Diagramme de synthèse des différentes caractérisations utilisées lors des analyses de défaillance de LEDs multi-puce.

3 Bilan des caractéristiques physiques et fonctionnelles

A ce niveau, il est important de dresser un bilan des caractéristiques physiques et fonctionnelles des deux modules de LEDs retenus pour cette étude. Le bilan des caractéristiques physiques intègre un comparatif des architectures ainsi que des mesures physiques développées. Le bilan fonctionnel compare les deux modules sur leurs principales caractéristiques en vue de leur intégration en projecteur.

3.1 Caractéristiques physiques

Le Tableau 15 regroupe les principales caractéristiques morphologiques des deux technologies. Les informations sont extraites des analyses de constructions effectuées.

	Module TFFC	Module VTF
Configuration de puce	TFFC (10 µm)	VTF (180 µm)
Taille de puce	4 puces de 1 mm²	4 puces de 1 mm²
Type de connexion entre puces	Série	Série
Céramique d'accueil	AlN 480 µm	AlN 570 µm
Report de céramique	Brasure $Au_{80}Sn_{20}$ 20 µm	Collage souple 45 µm
Embase	Cu 4,1 mm	Al 2 mm

Tableau 15 : Bilan des caractéristiques morphologiques des composants identifiés.

La Figure 50 présente les structures équivalentes des deux types de puces étudiées. Ces schémas permettent d'apprécier la structure des deux puces d'un point de vue matériaux, empilements et chemin électrique. Ces structures simplifiées seront très utiles pour l'analyse des comportements en vieillissement. En effet, ils permettront de localiser facilement les défaillances ou dérives paramétriques électriques observées. On notera que la nature du matériau de contact P est le même pour les deux composants (Ag) mais que côté N c'est l'Al pour la technologie TFFC et Ti pour la structure VTF. De plus, la structure VTF intègre un substrat en Ge dégénéré dans le circuit électrique équivalent.

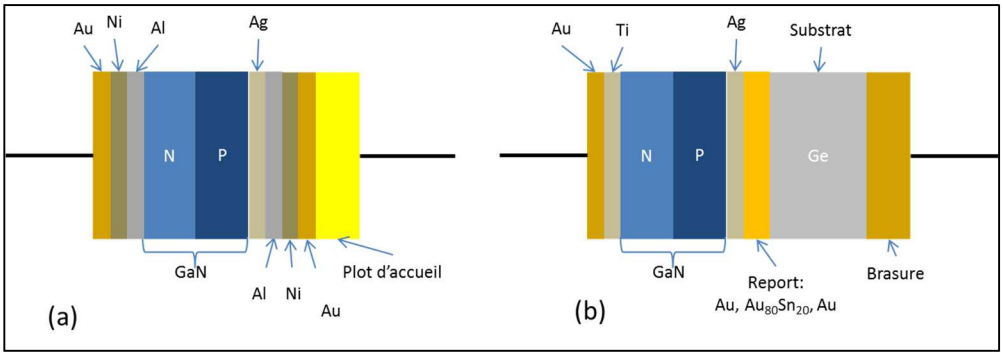


Figure 50 : Structures électriques simplifiées des deux types de puces étudiées : structures TFFC (a) et VTF (b).

Les caractéristiques électriques I(V) des modules neufs sont présentées en Figure 51. Elle permet une comparaison des deux technologies en lien avec les modèles électriques développés précédemment. La différence majeure entre les deux technologies est leurs comportements à fort niveau d'injection : la technologie TFFC présente un R_s moyen de 1,4 Ω contre 1,9 Ω pour la technologie VTF. De plus, les V_{th} sont respectivement de 11,59 et 12,15 V (Cf. Tableau 16).

Paramètre électrique	Structure TFFC	Structure VTF
Résistance série R_s (Ω)	1,4	1,9
Tension de seuil V_{th} (V)	11,59	12,15

Tableau 16 : Paramètres électriques à fort niveau d'injection (I_f= 1 A et T_{plaque}= 40 °C) pour des deux structures étudiées.

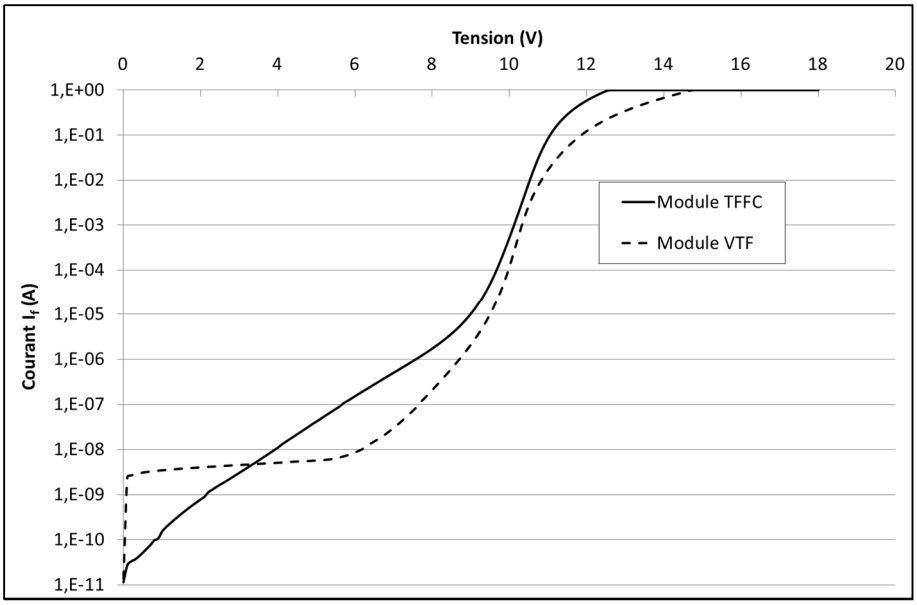


Figure 51 : Caractéristiques I(V) des deux modules de LEDs multi-puce neufs étudiés. T_{case}= 40 °C.

Les caractéristiques spectrales des modules sont présentées en Figure 52. Elle permet une comparaison des deux technologies en lien avec les caractérisations optiques effectuées. La longueur d'onde d'excitation du luminophore est centrée environ sur 446 nm et 450 nm respectivement pour les LEDs TFFC et VTF.

Les caractéristiques thermiques des modules sont présentées en Figure 53. Elle permet une comparaison des deux technologies en lien avec les analyses de construction ainsi que les modèles thermiques développés précédemment. Le montage mécanique de l'étude donne une résistance thermique $R_{th\ j\text{-}puits}$ de 5 $K.W^{-1}$et 5,8 $K.W^{-1}$ respectivement pour les structures TFFC et VTF.

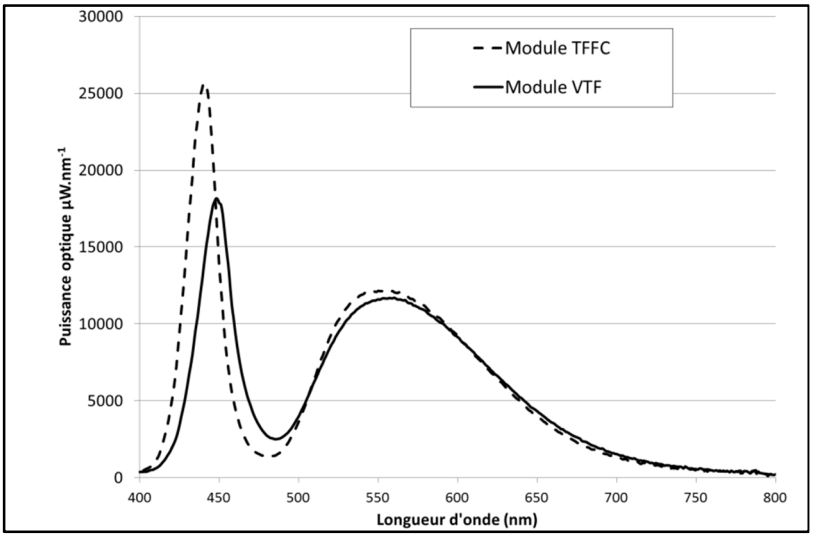


Figure 52 : Caractéristiques spectrales des deux modules de LEDs multi-puce étudiés. I_f = 1 A et T_{plaque} = 40 °C.

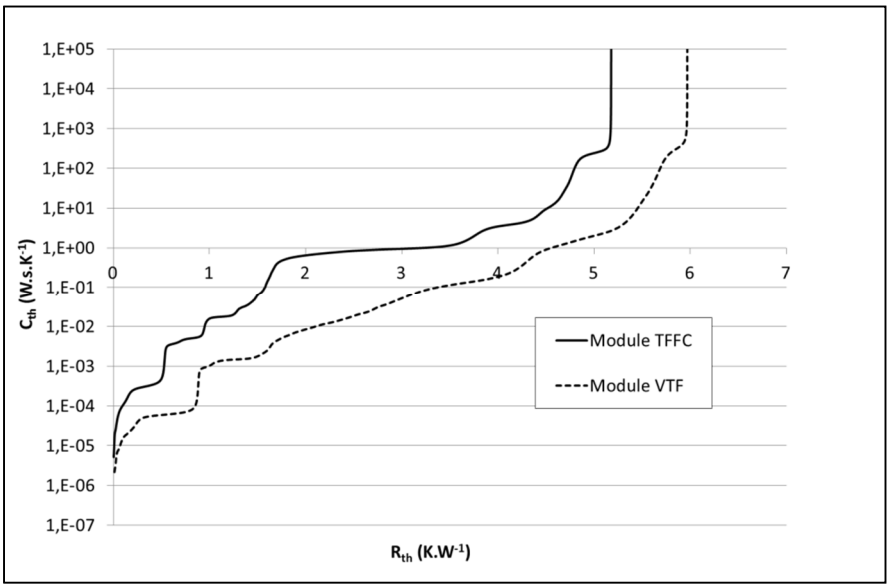


Figure 53 : Caractéristiques thermiques par T3Ster® des deux modules de LEDs multi-puce étudiés.

3.2 Caractéristiques fonctionnelles

Afin de clôturer la présentation des composants identifiés pour l'étude, une comparaison des caractéristiques fonctionnelles des deux références permet de mettre en lumière leurs performances à la fois sur la thermique, les valeurs électriques, l'optique et la durée de vie estimée par le fabricant pour un profil de mission spécifique. Les données sont extraites des fiches techniques des composants, excepté pour la température de couleur [5] [1]. Notons que les performances annoncées et mesurées sur les modules neufs sont parfaitement comparables.

	Module TFFC	Module VTF
Flux optique à 1000 mA, T_j à 25°C (lumens)	700	630-710
Température de couleur (K)	***5460 (mesuré)***	***4950 (mesuré)***
Vf typique à 1000mA, T_j à 25°C (V)	13,7	14,1
Résistance thermique (K.W^{-1})	1,5	3,3
Durée de vie estimée à T_j max, 1000 mA	5000h (t_{L80B50})	8000h (t_{L70B50})

Tableau 17 : Bilan des caractéristiques fonctionnelles et morphologiques des composants TFFC et VTF identifiés [5] [1].

4 Présentation du banc de test développé et contraintes associées

Un banc de test polyvalent et dédié aux composants automobile a été spécifiquement développé dans le cadre de cette étude. Il couvre l'ensemble des caractérisations *in situ* envisagées (mesures thermiques, électriques et optiques) en garantissant une excellente répétabilité des mesures. Cette approche a permis d'éviter les montages et démontages successifs des composants lors des caractérisations initiales, intermédiaires ou finales, souvent considérées comme responsables de perturbations potentielles, principalement sur les paramètres optiques et thermiques. Après une présentation du cahier des charges de ce banc, nous détaillerons brièvement les conceptions mécaniques optiques et thermiques.

4.1 Cahier des charges

Le cahier des charges couvrant l'ensemble des tests envisagés a été établi comme suit :

- Le banc de test pourra accueillir 10 composants.
- La structure sera construite sur une embase plane métallique pour optimiser le couplage thermique vers une plaque chauffante.
- Le banc de test pourra travailler entre -40 et 250 °C ($T_{plaque\ chauffante}$).
- Le couplage thermique des composants vissés sur l'embase sera assuré par un matériau adapté en privilégiant la stabilité temporelle de ses caractéristiques physiques aux performances thermiques.
- Une interface électrique « 4 fils » sera intégrée au sein de chaque composant pour l'alimentation, les mesures électriques et les mesures thermiques.
- Une interface optique (connecteur de fibre SMA 905) sera disposée en regard des puces afin de réaliser des mesures optiques.
- La zone d'accueil des modules devra être adaptée aux designs mécaniques des deux composants présentés dans les Figure 54 (TFFC) et Figure 55 (VTF).

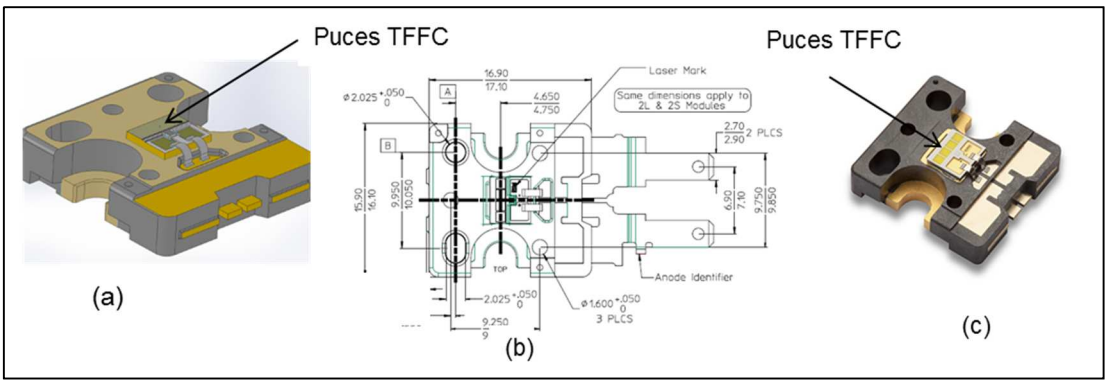


Figure 54 : Schéma (a), plan mécanique (b) et photographie(c) du composant TFFC identifié.

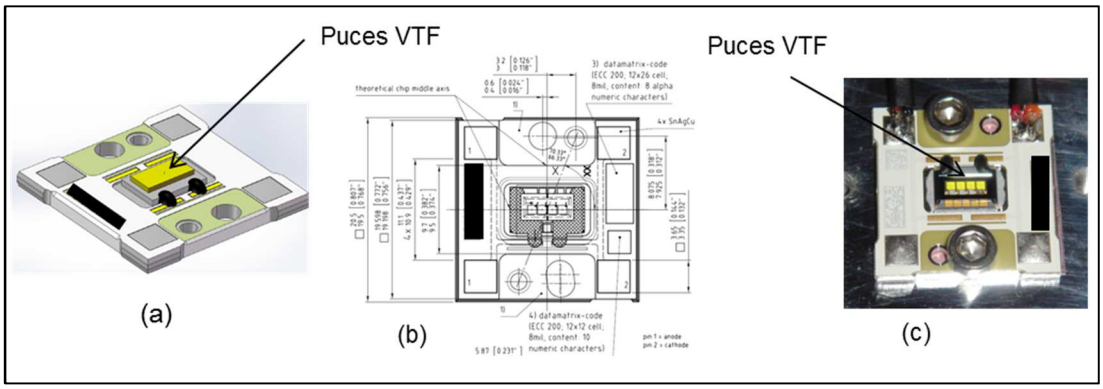


Figure 55 : Schéma (a), plan mécanique (b) et photographie(c) du composant VTF identifié.

4.2 Conception de la plage d'accueil des composants

Chaque composant (technologie VTF et TFFC) est vissé sur l'embase du banc de test par deux vis CHc M3x6 en acier inoxydable, avec un couple de 0,45 N.m, conformément aux fiches techniques des composants (entre 0,34 et 0,5 N.m). Le couplage thermique est assuré par un film silicone renforcé par un tissu de verre Berquist Silpad®900s d'une épaisseur de 230 µm, présentant une conductivité thermique de 1,6 $W.m^{-1}.K^{-1}$. La Figure 56 présente l'assemblage des deux composants sur le banc de test.

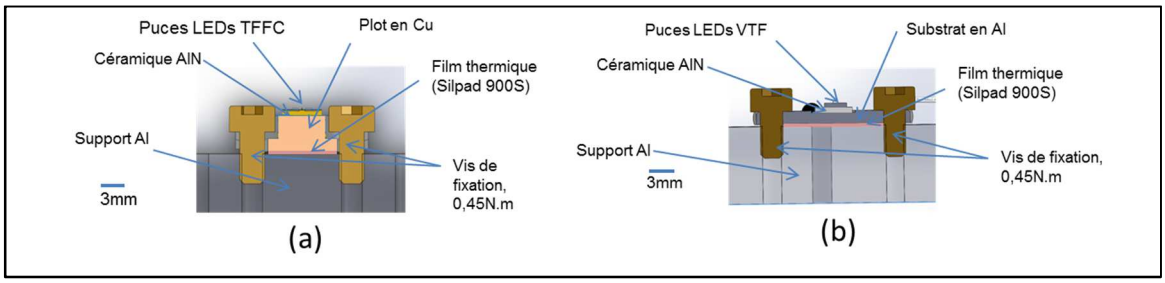


Figure 56 : Vue en coupe des assemblages des structures TFFC (a) et VTF (b) sur banc de test.

4.3 Conception de la connexion électrique 4 fils

La connexion électrique de chaque composant sera assurée par quatre fils gainés en silicone pour répondre au cahier des charges thermiques du banc de test. Les quatre fils seront, d'une part, brasés sur le composant et d'autre part, reliés à un connecteur rapide quatre voies. Cette interface est compatible avec l'ensemble des caractérisations physiques mais également avec les alimentations des LEDs lors des vieillissements.

4.4 Conception optique et simulations

La partie optique est relativement délicate car elle doit permettre le meilleur couplage entre le composant et la fibre optique du spectromètre (Figure 57). Le choix de conception vise à évaluer et minimiser les incertitudes de mesures engendrées par un désalignement potentiel de la fibre optique lié à l'usinage mécanique. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel de simulation optique Zemax®. Le modèle optique équivalent comporte une source lumineuse (4 puces LEDs) émettant un flux optique lambertien de 1 W (4 x 0,25W) et un détecteur placé en regard des puces à 20 mm de distance. Cette configuration constitue la référence pour les essais en simulations (Figure 58 et Figure 59).

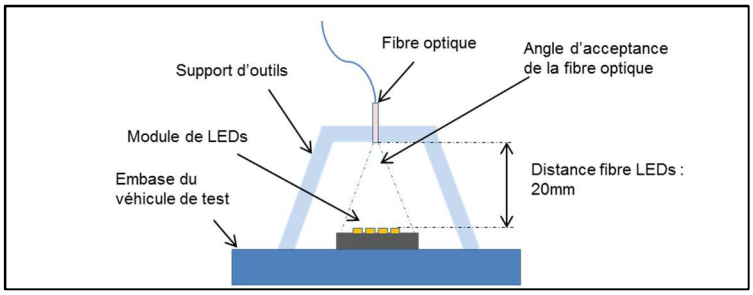


Figure 57 : Visualisation de la conception optique envisagée.

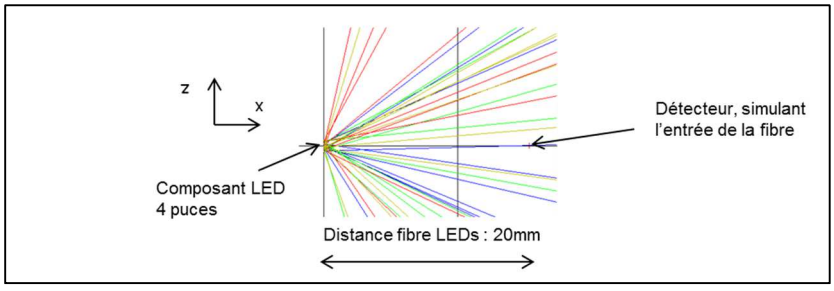


Figure 58 : Vue de côté du modèle de simulation équivalent sous Zemax® (configuration de référence).

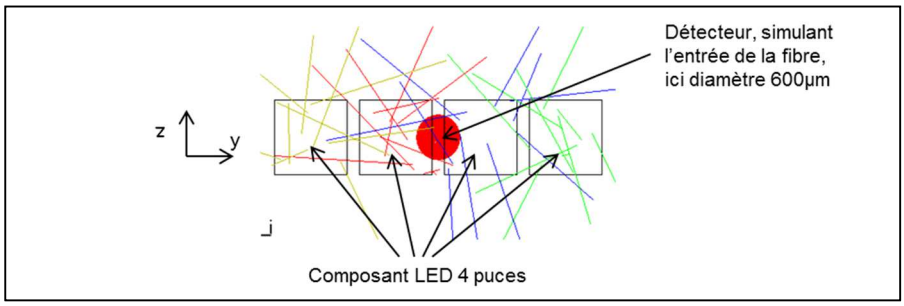


Figure 59 : Vue du dessus du modèle de simulation équivalent sous Zemax® (configuration de référence).

Les résultats des simulations optiques sont rapportés à la configuration de référence qui consiste en une fibre optique de diamètre 600 µm dont l'extrémité est placée à 20 mm en regard des puces et dont l'axe de la fibre optique est normal à la surface des puces. Cette configuration est celle envisagée pour le banc de test. Les simulations 1 à 9 simulent des décalages ou des désalignements de la fibre optique par rapport aux puces LEDs ainsi que différents diamètres de fibres optiques disponibles commercialement.

Référence	Puissance optique totale (W)	Diamètre fibre (mm)	Hauteur fibre en x (mm)	Position y (mm)	Position z (mm)	Angle fibre autour de y (°)	Angle fibre autour de x (°)	Flux (W)	% du flux référent	Risque évalué par le test
Essai de référence	1	0,6	20	0	0	0	0	$2{,}24.10^{-4}$	100	
essai 1	1	0,6	20	0,5	0,5	0	0	$2{,}22.10^{-4}$	99,26	Précision mécanique de l'usinage (500 µm)
essai 2	1	0,6	20	0,5	0	0	0	$2{,}25.10^{-4}$	100,48	
essai 3	1	0,6	20	0	0,5	0	0	$2{,}26.10^{-4}$	101,16	
essai 4	1	0,6	19,9	0	0	0	0	$2{,}21.10^{-4}$	98,79	Précision mécanique standard de l'usinage (100 µm)
essai 5	1	0,6	20,1	0	0	0	0	$2{,}20.10^{-4}$	98,37	
essai 6	1	0,2	20	0	0	0	0	$2{,}48.10^{-5}$	11,06	Diamètre des 3 fibres disponibles commercialement
essai 7	1	0,4	20	0	0	0	0	$9{,}92.10^{-5}$	44,30	
essai 8	1	0,6	20	0	0	2	0	$2{,}21.10^{-4}$	98,58	Alignement vertical du perçage, précision à l'usinage (2°)
essai 9	1	0,6	20	0	0	0	2	$2{,}22.10^{-4}$	99,31	

Tableau 18 : Résultats des simulations optiques de désalignement de fibre par rapport au plan des puces LEDs.

Notons que les différentes situations envisagées avec une fibre optique de 600 µm de diamètre n'engendrent que de faibles pertes de flux captées par la fibre optique (maximum -1,69 %). Le risque principal lié à la précision des usinages est simulé par les essais 4 et 5, correspondant à la distance fibre optique-puces. Dans ce cas précis, les variations de flux capté restent très acceptables (1,43 % au maximun). En pratique, le flux optique capté par la fibre sera analysé par un spectromètre visible (OceanOptics USB2000+) permettant d'en déduire la puissance optique de chaque composant analysé. Après des essais pratiques, le diamètre du cœur de fibre optique retenu a été de 200 µm qui permet de capter un flux suffisant pour les mesures envisagées.

4.5 Caractéristiques du banc de test final et métrologie

4.5.1 Caractéristiques du banc de test final

L'assemblage final du banc de test comprend une embase plane en Al de 10mm d'épaisseur qui accueille 10 composants vissés, surmontés d'un support d'outils prenant en charge les interfaces électriques et optiques. L'exemple présenté ici est celui de la structure VTF.

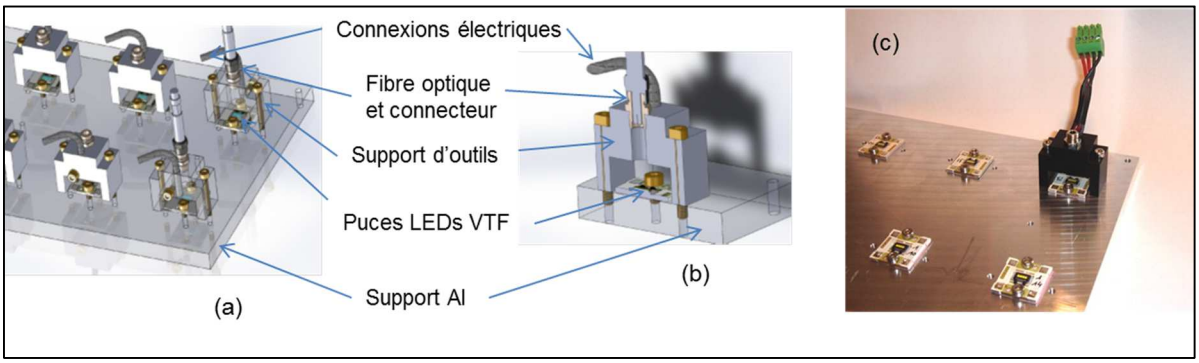


Figure 60 : Vue de l'assemblage final du banc de test (a, b).Photographie du banc de tests (c). Cas de la structure VTF.

Nous venons de décrire la méthodologie mise en place pour le développement de ce banc de test dédié aux composants multi-puce pour l'automobile et nous allons analyser, à présent, la métrologie des mesures à travers ce banc.

4.5.2 Répétabilité et reproductibilité des mesures

Afin de finaliser la caractérisation du banc de test, nous avons déterminé la stabilité et la précision des mesures pour I_f= 200 mA et T_{case} = 40 °C. Les valeurs numériques sont synthétisées en tableau 19 et la procédure des modes opératoires, permettant d'estimer la répétabilité et la reproductibilité, est indiquée ci-dessous. Cette procédure ne se réfère à aucun standard car c'est un banc de test spécifique pour une application spécifique.

a. Méthodologie optique

La répétabilité de la mesure de flux optique a été caractérisée en enregistrant trois spectres successifs d'une même LED dans des conditions environnementales stabilisées en courant et température.

La reproductibilité de la mesure de flux optique a été caractérisée en démontant et remontant successivement à trois reprises la fibre optique, le connecteur de fibre et le support d'outils pour une même LED dans des conditions environnementales stabilisées.

b. Méthodologie thermique

La répétabilité de la mesure de R_{th} (caractéristique $C_{th}(R_{th})$) a été caractérisée en réalisant trois mesures successives d'une même LED dans des conditions environnementales stabilisées.

La reproductibilité de la mesure thermique est basée sur les caractérisations initiales de 30 composants avant vieillissement (valeur du puits thermique). L'écart-type a été calculé pour les deux technologies. Ces valeurs intègrent la variabilité des caractéristiques des composants selon leurs procédés de fabrication.

c. Méthodologie électrique

La répétabilité de la mesure électrique I(V) a été caractérisée en réalisant trois mesures successives de courant à une polarisation de +5 V d'un même module de LEDs dans des conditions environnementales stabilisées.

La reproductibilité de la mesure électrique I(V) (courant à une polarisation de +5 V) a été caractérisée en déconnectant et reconnectant successivement trois fois le connecteur 4 fils pour un même module de LEDs dans des conditions environnementales stabilisées.

d. Bilan des mesures et métrologie

Les résultats de la caractérisation métrologique du banc sont présentés en Tableau 19. La mesure thermique présente une répétabilité et reproductibilité < 3,5 %, la mesure électrique présente une répétabilité et reproductibilité < 1,2 % et pour la mesure optique, une répétabilité et reproductibilité < 0,9 %, ce qui est considéré comme très acceptable. On notera des valeurs plus élevées pour la mesure thermique. Cependant, devant la difficulté connue pour maîtriser parfaitement la stabilité du puits thermique d'un composant émissif tel qu'une LED, ces valeurs sont très acceptables.

	Répétabilité	Reproductibilité
Mesure Optique (Flux)	1 (référence), 1,0068 (+0,68 %) et 0,9912 (-0,88 %)	1 (référence), 0,9962 (-0,38 %), et 1,0048 (+0,48 %)
Mesure Thermique ($R_{thj\text{-}puits}$)	1 (référence), 1,013 (+1,3 %) et 0,979 (-2,1 %)	±2,6 % et ±2,7 % respectivement pour les composants VTF et TFFC (écart-type à la moyenne)
Mesure Electrique (I (+5V))	1 (référence), 1,001 (+0,1%) et 0,9995 (-0,05%)	1 (référence), 0,9993 (-0,07 %), et 1,012 (+1.2 %)

Tableau 19 : Répétabilité et reproductibilité des mesures optiques, thermiques et électriques.

Grâce à cette description complète du banc de test développé, nous avons tout d'abord mis en lumière l'intérêt et la polyvalence de ce banc, qui prend en charge l'ensemble des mesures in situ (électro-optiques et thermiques) sans nécessité de montages et démontages successifs des modules de LEDs. Par la suite, la conception du banc de test a été détaillée d'un point de vue mécanique, en accord avec les contraintes optiques et thermiques des modules. Enfin une caractérisation métrologique a permi de valider l'utilisation de ce support tout au long des phases de robustesse et de fiabilité, qui seront développées dans les chapitres 3 et 4.

5 Définition des lots représentatifs et caractérisations initiales

Afin de caractériser la fiabilité des populations de composants approvisionnés, il est nécessaire de définir des lots représentatifs que nous suivrons en vieillissement. Un profil de mission environnemental aussi exigeant que l'automobile nécessite une étude de qualité et de fiabilité multi-technologique. En effet, les utilisateurs finaux tels que les constructeurs automobiles doivent pouvoir définir scientifiquement un certain nombre de critères de choix impactant la fiabilité du dispositif final : le projecteur à LEDs. Les enjeux économiques et sociaux sont cruciaux et il n'est plus question d'effectuer un choix approximatif. La qualité et la fiabilité d'une filière technologique telle que des modules LEDs discrets suivent des lois statistiques reliées à la dispersion technologique. Pour valider le travail de cette thèse qui s'inscrit dans cette vision, une préparation statistique sur les populations de composants disponibles a été réalisée. Dans cette partie, nous allons décrire, dans un premier temps, la méthode utilisée pour définir des lots de composants représentatifs tenant compte des deux filières technologiques. Dans un deuxième temps, nous réaliserons la caractérisation physique initiale de ces lots. Cette dernière phase permet d'évaluer la distribution des paramètres critiques. Il sera alors possible de déterminer l'impact de la dispersion technologique sur la distribution de durée de vie en regard de la qualité de fabrication de chaque module à LEDs.

5.1 Mise en place des lots représentatifs

L'approvisionnement des composants s'est effectué sur une base de 84 composants TFFC et de 113 composants VTF, respectivement issus d'un seul et même lot de fabrication. Le paramètre physique principal d'une LED étant la puissance optique, nous avons basé la création des lots représentatifs sur ce paramètre. La démarche consiste tout d'abord à étudier l'ensemble des composants de chaque référence afin de caractériser statistiquement les populations mères par la moyenne et l'écart type du flux optique. La puissance optique mesurée est celle délivrée par chaque module à un courant I_f de 1000 mA avec T_{case}= 40 °C. La dispersion des puissances optiques des deux populations initiales peut être appréciée en Figure 61. Le nombre de classes K est défini par la méthode de STURGESS par la loi empirique suivante [35]:

$$K = 1 + 3.3\log(n) \qquad \textbf{Équation 36}$$

avec n, la taille de l'échantillon.

Les lois normales associées aux populations mères (moyenne et écart-type σ) sont également représentées et décrites en Tableau 20 . Nous nous baserons sur ces lois normales pour créer les lots représentatifs pour les vieillissements.

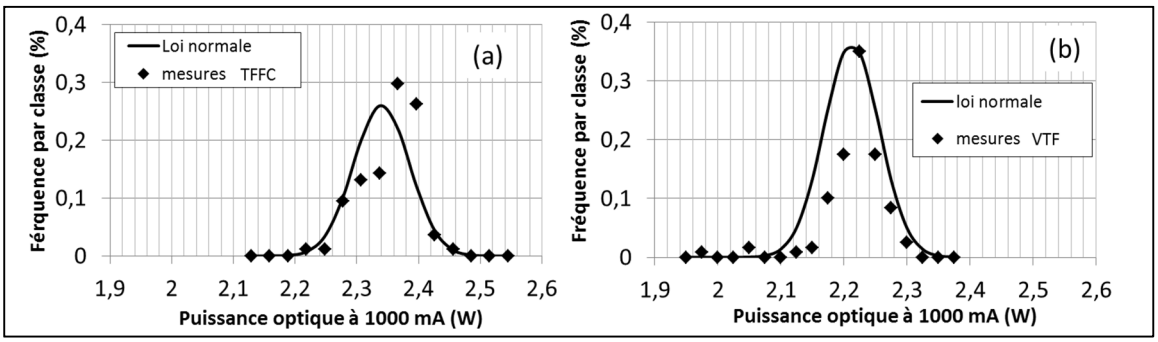


Figure 61 : Dispersion de la puissance optique des modules TFFC (a) et VTF (b) à 1000 mA, T_{case}=40°C et lois normales associées.

	Population mère	Moyenne du P_{opt} à 1000 mA T_{case}= 40 °C (W)	Ecart-type (W)
Composant TFFC	84	2,340	0,045 (1,9 %)
Composant VTF	112	2,211	0,031 (1,4 %)

Tableau 20 : Analyse statistique des populations de modules de LEDs approvisionnées pour l'étude.

Compte tenu des capacités des moyens disponibles pour effectuer les vieillissements, et en regard du temps alloué aux caractérisations et suivi des composants en vieillissement, chaque lot de composants a été défini avec 10 composants. Ils seront donc représentatifs de la population mère en présentant à la fois une moyenne de flux optique et un écart-type le plus proche de ceux de la population mère. Les caractéristiques statistiques des lots 1 à 4 sont présentées dans les Tableau 21 et Tableau 22 respectivement pour les composants TFFC et VTF.

Lots PHILIPS	Nombre de composants	Moyenne du Flux optique à 1000 mA et T_{case}= 40 °C (W)	Ecart-type à la moyenne (W)
Lot TFFC1	10	2,341	0,046 (1,9 %)
Lot TFFC2	10	2,338	0,045 (1,9 %)
Lot TFFC3	10	2,340	0,045 (1,9 %)
Lot TFFC4	10	2,340	0,045 (1,9 %)

Tableau 21 : Caractéristiques des lots TFFC définis pour l'étude de fiabilité.

Lots OSRAM	Nombre de composants	Moyenne du Flux optique à 1000 mA et T_{case}= 40 °C (W)	Ecart-type à la moyenne (W)
Lot VTF1	10	2,214	0,030 (1,3 %)
Lot VTF2	10	2,212	0,031 (1,4 %)
Lot VTF3	10	2,214	0,031 (1,4 %)
Lot VTF4	10	2,211	0,031 (1,4 %)

Tableau 22 : Caractéristiques des lots VTF définis pour l'étude de fiabilité.

5.2 Mesures avant vieillissement

Maintenant que les lots de composants sont définis et représentatifs des populations mères, les principaux paramètres mesurés selon les modes opératoires décrits précédemment (électrique, optique et thermique) vont être présentés par lot. Concernant les paramètres électriques, les valeurs de R_s et R_{fuite} sont données. Pour les paramètres optiques, le flux ainsi que les puissances optiques mesurées dans le bleue et le jaune sont présentés. La résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ est donnée pour le paramètre thermique. L'ensemble de ces données ainsi que les écarts-types sont synthétisés par lot en Tableau 23.

Lot		Electrique		Optique			Thermique
	V_{th} (V) ; σ	R_s (Ω) ; σ	R_{fuite} (Ω); σ	$P_{opt\,1000\,mA}$ (W); σ	$P_{opt_{bleue}\,200\,mA}$ (W); σ	$P_{opt_{jaune}\,200\,mA}$ (W); σ	$R_{thj\text{-}puits}$ ($K.W^{-1}$); σ
Lot TFFC1	11,41; 0,31	1,47 ; 0,15	$2{,}02.10^{+11}$; $1{,}76.10^{+11}$	2,341; 0,046	0,162; 0,0037	0,447; 0,0133	5,21; 0,24
Lot TFFC2	11,43; 0,25	1,42 ; 0,14	$1{,}93.10^{+11}$; $2{,}28.10^{+11}$	2,338; 0,045	0,161; 0,0082	0,443; 0,0116	5,05; 0,17
Lot TFFC3	11,59; 0,23	1,43 ; 0,10	$7{,}64.10^{+10}$; $6{,}79.10^{+10}$	2,340; 0,045	0,165; 0,0073	0,447; 0,0086	4,95; 0,11
Lot TFFC4	11,46 ; 0,24	1,52 ; 0,20	$1.39.10^{+11}$; $1.66.10^{+11}$	2,340; 0,045	0,160; 0,0040	0,452; 0,034	4,98; 0,23
Lot VTF1	12,20 ; 0,15	1,94; 0,12	$4{,}39.10^{+11}$; $3{,}15.10^{+11}$	2,214; 0,030	0,161; 0,00871	0,485; 0,0350	5,76; 0,35
Lot VTF2	12,13 ; 0,17	1,91; 0,11	$6{,}38.10^{+11}$; $8{,}29.10^{+11}$	2,212; 0,031	0,162; 0,0041	0,499; 0,0082	5,87; 0,14
Lot VTF3	12,11; 0,16	1,90; 0,12	$3{,}40.10^{+10}$; $5{,}52.10^{+10}$	2,214; 0,031	0,161; 0,0036	0,502; 0,0060	5,31; 0,15
Lot VTF4	12,16; 0,14	1,89; 0,08	$1{,}46.10^{+10}$; $2{,}44.10^{+10}$	2,211; 0,031	0,162; 0,0021	0,501; 0,0069	5,37; 0,18

Tableau 23 : Paramètres électriques optiques et thermiques des lots représentatifs avant vieillissement.

6 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre, l'ensemble des outils et moyens mis en œuvre s'inscrivant dans une méthodologie de suivi de paramètres physiques de modules de LEDs dans le cadre de vieillissements environnementaux. Cette description s'est articulée en quatre phases principales.

La première phase a permis de présenter et d'argumenter le choix de deux composants commerciaux utilisés dans cette étude. Ils sont dédiés au domaine automobile et présentent des stratégies de boîtier différentes, principalement sur les configurations de puce : TFFC et VTF. Ces deux technologies caractérisent la dispersion technologique du marché des LEDs pour l'automobile. L'analyse de construction des deux architectures met clairement en lumière ce point.

La seconde partie décrit l'ensemble de la méthodologie des mesures électriques, optiques et thermiques mises en œuvre pour l'étude. La caractéristique électrique I(V) d'une LED GaN, traduisant essentiellement les phénomènes de contacts, a été décomposée et adaptée à un modèle multi-puce

applicable au niveau module. Ce modèle permettra, par une mesure électrique globale, de détecter, à l'échelle multi-puce, des dérives électriques de V_{th}, R_{fuite} et déséquilibres. Cela constitue un outil essentiel pour caractériser les comportements à la fois en vieillissement et lors des analyses de défaillance. Ce modèle électrique applicable à des structures multi-puce à LEDs se démarque de l'état de l'art des modèles établis pour des composants mono-puce et fait partie des travaux pionniers dans le domaine des LEDs. Les structures TFFC et VTF diffèrent à fort niveau d'injection de courant : la technologie TFFC présente un R_s moyen de 1,4 Ω et V_{th} = 11,59 V pour la structure TFFC contre R_s= 1,9 Ω et V_{th}= 12,15 V pour la technologie VTF. La mesure optique, basée sur l'analyse du spectre visible émis, donne des informations essentielles quant à l'état de la zone active des modules à LEDs mais également sur l'état du boîtier et du chemin optique (comprenant la conversion optique). Les puissances optiques des modules à 1000 mA et T_{plaque}= 40 °C sont d'environ 2,2 W. La mesure thermique quant à elle, basée sur une mesure indirecte de température de jonction par T3Ster® (analyse thermique transitoire), donne des informations capitales sur les caractéristiques de l'écoulement thermique, en reconstruisant la structure du composant. Le composant TFFC présente une résistance thermique mesurée à $R_{thj\text{-}boîtier}$ = 2 $K.W^{-1}$ contre 3 $K.W^{-1}$ pour le module VTF. Afin de préciser l'écoulement thermique de la structure, deux modèles thermiques (analytique et numérique) ont permis de valider le comportement thermique des structures.

Etant donné que les paramètres fonctionnels et physiques dépendent directement de T_j et que seule $T_{puits\ thermique}$ est connue lors des manipulations, l'ensemble des mesures sont réalisées avec la même configuration thermique : banc de test placé sur plaque chauffante. Cette seconde partie a été complétée par des moyens de caractérisations physico-chimiques déployés pour les futures analyses de défaillance. Les caractérisations non destructives comme la thermographie IR, la luminescence à bas courant, la profilométrie mécanique ou encore l'imagerie visible, précèderont des analyses plus fines et destructives comme les images MEB et analyses EDX.

La troisième partie a introduit la méthodologie de mesure adoptée lors des tests de vieillissements et plus largement au cours de la thèse. En effet, grâce à un banc de test dédié aux composants identifiés, les composants sont montés initialement et l'ensemble des mesures électriques, thermiques et optiques sont réalisées *in-situ*. Cela permet d'optimiser les reprises de mesures, mais également d'assurer une bonne répétabilité au cours du temps. Les caractéristiques du banc ainsi que la métrologie ont été détaillées et sont très acceptables et <3,5 %, <1,2 % et <0,9 %, respectivement pour les mesures thermiques, électriques, et optiques. Cette méthodologie basée sur un banc de test polyvalent se démarque des études de fiabilité de la littérature qui démontent généralement les composants lors des reprises de mesures.

Enfin, dans **la dernière partie**, quatre lots de dix composants par référence, représentatifs des populations mères ont été créés en s'appuyant sur la puissance optique des modules à 1000 mA et T_{case}=40 °C. Chaque lot est représentatif de la population mère par sa moyenne de flux optique et son écart-type. Une fois les lots créés, les autres paramètres (optiques, thermiques et électriques) ont été présentés afin de constituer un point de référence avant le lancement des tests de vieillissement.

Le chapitre suivant va s'attacher, à travers une étude de robustesse par paliers appliquée à un échantillon réduit de composants, de suivre les évolutions paramétriques jusqu'à défaillance volontaire des deux architectures. En vue de l'étude de fiabilité abordée en chapitre IV, l'intérêt d'une étude de robustesse est double : d'une part les limites opérationnelles de fonctionnement des deux architectures permettront d'ajuster les niveaux de contraintes à appliquer en fiabilité et d'autre part, les analyses de défaillance mettront clairement en évidences les atouts et limites potentielles des architectures étudiées.

7 Bibliographie

1. **Philips Lumileds.** *Fiche technique du produit Altilon 1X4.* 2010.

2. **Nichia.** *fiche technique du composant Kirameki 4 puces.* 2011.

3. **Samsung LED.** *Fiche technique du produit 10W AH534A.* 2012.

4. **Seoul Semiconductor.** *Fiche technique du composant automobile 4 puces.* 2012.

5. **OSRAM.** *Fiche technique du composant Ostar 4 puces.* 2011.

6. **Yole development.** *Rapport technique: analyse de construction du composant luxeon rebel.* 2010.

7. **A. CORFA.** *Manuscrit de DRT: Simulation et caractérisation thermique de modules d'éclairage a LEDs en intégration Chip On Board.* CEA/DRT/LETI/DOPT/STM/LPA, 2009.

8. **Y.S MUZYCHKA et al.** *Influence of Geometry and Edge Cooling on Thermal Spreading Resistance.* Journal of Thermophysics and Heat Transfer Vol. 20 No. 2, April-June 2006.

9. **R. BAILLOT.** *Manuscrit dethèse: METHODOLOGIE D'ANALYSE DE DEFAILLANCE POUR L'EVALUATION DE LA FIABILITE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES GAN.* Université de Bordeaux 1, 2011.

10. **J. M. SHAH et al.** *Experimental analysis model for anomalously high ideality factors(n2.0) in AlGaN/GaN p-n junction diodes.* journal of applied physics 94, 2627 (2003).

11. **Y. DESHAYES.** *Manuscrit de thèse: Diagnostic de défaillances de systèmes optoélectroniques émissifs pour applications de télécommunication : Caratérisations électro-optiques et simulations thermomécaniques.* Université Bordeaux I, 2002.

12. **H. MATHIEU.** *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques.* Edition MASSON, 1987.

13. **E. M. GRUNDMANN.** *The physics of semiconductors : an introduction including devices and nanophysics.* Springer, 2006.

14. **F. A. PADOVANI.** *Field and thermionic-field emission in Schottky Barriers.* Solid State Electron., vol. 9, p. 695, 1966.

15. **R. STRATTON.** *Theory of Field Emission from Semiconductors.* Physical Review Letters, vol. 125, pp. 67-82, 1962.

16. **H. MORKOC.** *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices : Electronic and Optical Processes in Nitrides.* vol. 2, 2008.

17. **Y. DESHAYES et al.** *Stark Effects Model Used to Highlight Selective Activation of Failure Mechanisms in MQW InGaN/GaN Light-Emitting Diodes.* Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on (Volume:10 , Issue: 1), pages 164-170, 2010.

18. **QuCS.** http://qucs.sourceforge.net/. [En ligne] 2014.

19. **E. ROSENCHER.** *Optoélectronique, 2nde ed. Paris.* 2002.

20. **T.TOMIKI, et al.** *Ce3+ centres in Y3Al5O12 (YAG) single crystals .* Journal of the Physical Society of Japan vol. 60, pp. 2437-2445, 1991.

21. **CIE.** *Colorimetry, commission internationale de l'éclairage.* CIE S 0014-1/E:2006.

22. **CIE .** *Colorimetry-Part-1 CIE Standard colorimetric observers.* 2006.

23. **C.S. Mc CAMY.** *Correlated color temperatture as an explicit function of chromaticity coordinates, color research an application.* Color Research & Application, Volume 17, Issue 2, pages 142–144, 1992.

24. **Osram Sylvania.** *Logiciel color calculator, version 4,89.* 2010.

25. **L. BECHOU et al.** *Measurement of the thermal characteristics of packaged double-heterostructure light emitting diodes for space applications using spontaneous optical spectrum properties.* Optics & Laser Technology, Volume 40, Issue 4, Pages 589–601, 2008.

26. **Y.P. VARSHINI.** *Temperature dependance of the energy gap in semiconductors.* Physica, Volume 34, Issue 1, Pages 149–154, 1967.

27. **Ioffe Physical Institute.** *Physical properties of semiconductors.* Saint Petersburg, 2004.

28. **V. SZEKELI.** *A new evaluation method of thermal transient results.* Microelectronics journals, Volume 28, Issue 3, Pages 277–292, 1997.

29. **M. RENCZ et al.** *Increasing the Accuracy of Structure Function Based Thermal Material Parameter Measurements.* Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on (Volume:28 , Issue: 1), pages 51-57, 2005.

30. **Mentor Graphics.** *support de présentation technique: Structure functions in T3Ster by Mentor Graphics.* 2011.

31. **C.J.M. LASANCE et al.** *Heat Spreading, not a trivial problem.* Philips Research laboratories, 2008.

32. **C. KOPP.** *LED, Analyse thermique analytique, Note technique LETI DOPT SIONA.* 2008.

33. **A. JAMNIA et al.** *Heat Spreading, Practical Guide to the Packaging of Electronics.* Marcel Dekker Inc., CRC Press, pages 17-18, 2003.

34. **M.E. ALAWADHI.** *Finite Element Simulations Using ANSYS.* Taylor & Francis Group, 2010.

35. **K.L. WONG.** *reliability Egineering for Electronic Systems, Chapitre 2.* Hughes Aircraft Company, John Wiley & Sons edition, 1964.

Chapitre III : Méthodologie d'analyse de la robustesse de modules à LEDs multi-puce et résultats

Chapitre III : Méthodologie d'analyse de la robustesse de modules à LEDs multi-puce et résultats

1 Introduction ..... - 123 -

2 Descriptif de la méthodologie ..... - 123 -

3 Spécifications des paramètres électro-optiques des LEDs étudiées ..... - 124 -

4 Test de robustesse en courant ..... - 125 -

4.1 Conditions de test ..... - 125 -

4.2 Résultats obtenus pour les modules TFFC ..... - 126 -

4.3 Résultats obtenus pour les modules VTF ..... - 135 -

4.4 Bilan du test en courant ..... - 143 -

5 Test de robustesse en température ..... - 144 -

5.1 Conditions de test ..... - 144 -

5.2 Résultats obtenus pour les modules TFFC ..... - 145 -

5.3 Résultats obtenus pour les modules VTF ..... - 156 -

5.4 Bilan du test en température ..... - 166 -

6 Bilan de l'étude de robustesse ..... - 167 -

6.1 Test en courant ..... - 167 -

6.2 Test en température ..... - 169 -

7 Préparation de l'étude de fiabilité ..... - 170 -

8 Conclusion ..... - 171 -

9 Bibliographie ..... - 173 -

1 Introduction

Nous venons de décrire l'ensemble des outils et moyens développés dans ce travail de thèse pour la caractérisation et le suivi des paramètres électro-optiques et thermiques des LEDs multi-puce. Afin de préparer et anticiper au mieux la campagne de vieillissements en fiabilité, nous allons maintenant aborder, dans ce chapitre, la méthodologie permettant d'identifier les forces et faiblesses des technologies pour le bon déroulement des futurs vieillissements en fiabilité. A l'issue de cette première partie, nous définirons précisément les protocoles de tests appliqués aux modules multi-puce, à travers deux types de sollicitations environnementales : la température et le courant. Par la suite, les résultats de ces tests seront analysés et détaillés selon trois approches :

- L'analyse comportementale in situ des LEDs durant les tests.
- L'analyse comparative des paramètres physiques des LEDs avant et après les tests.
- Les analyses de défaillances associées, permettant de localiser et analyser le ou les mécanismes de défaillances mis en jeux. Les hypothèses proposées seront basées sur à la fois les dérives paramétriques électro-optiques et la bibliographie. Il serait nécessaire d'aller plus loin dans les analyses physiques en utilisant des moyens lourds. Néanmoins, ces premières conclusions permettront d'apporter des éléments probants, exploitables industriellement vis-à-vis de la sélection des architectures de LEDs étudiées.

Enfin, l'ensemble de ces résultats permettra d'extraire des tendances comportementales des deux technologies face à de très fortes sollicitations environnementales. Ces tests permettront de définir des niveaux de contraintes environnementales entraînant une dé-fiabilisation rapide des composants par des mécanismes non représentatifs du profil de mission. L'influence de l'architecture et des configurations de puces utilisées (VTF et TFFC) sur les comportements observés seront également discutés. Les marges opérationnelles de fonctionnement seront définies et permettront d'appliquer des contraintes actives optimales en vieillissements accélérés pour la phase de fiabilité, abordée au chapitre IV.

2 Descriptif de la méthodologie

La robustesse est définie comme l'aptitude d'un dispositif à être influencé par la fluctuation d'un paramètre extérieur. On peut citer par exemple la variation de température, d'adhérence au sol, dispersion d'usinage... Notre but vise à étudier la stabilité des performances des LEDs sous des conditions externes présentant de larges variations d'amplitude qui seront en dehors des plages de spécification définies par le constructeur. Les composants seront sollicités en dehors de leurs spécifications, par contraintes échelonnées, jusqu'à la défaillance. Cette démarche en deux temps a été choisie pour plusieurs raisons et présente de nombreux avantages :

- Les modules identifiés pour cette étude présentent des architectures nouvelles (multi-puce) et configurations de puces différentes (VTF et TFFC). Dans ce contexte, il est tout d'abord nécessaire de connaitre les comportements de ces nouveaux produits face à des sollicitations environnementales sévères.
- Cette campagne de robustesse permettra de finaliser l'ensemble des caractérisations envisagées (optique, électrique et thermique) par l'intermédiaire du banc de test dédié à l'étude et présenté en chapitre 2.

- Les deux axes de tests (température et courant) permettront de suivre l'évolution des paramètres électro-optiques et thermique des LEDs afin de définir des marges opérationnelles de fonctionnement vis-à-vis des spécifications constructeurs.
- Ces marges opérationnelles permettront de paramétrer finement l'étude de fiabilité, qui vise à appliquer des contraintes environnementales adaptées (compromis entre contrainte et temps de vieillissement). Cette approche va permettre d'accélérer des mécanismes de vieillissements, sans engager de mécanismes non représentatifs du futur profil de mission des composants.
- Les défaillances seront analysées de manière comportementale et caractérisées physiquement. Les défaillances seront localisées et permettront de proposer des hypothèses quant à la physique de la défaillance ainsi que le ou les probables mécanismes de défaillance mis en jeu. Ces défaillances non représentatives d'un fonctionnement normal causées par les tests de robustesse ne devront donc pas être observées en fiabilité.
- L'ensemble de ces analyses aboutira à une synthèse qui dégagera les forces et les faiblesses de chaque technologie face à des sur-sollicitations environnementales.
- Certains résultats de robustesse seront finalement confrontés aux résultats de fiabilité afin de définir des tests environnementaux rapides d'évaluation, applicables aux nouveaux composants LEDs du marché.

Maintenant que la méthodologie a été présentée et l'étude de robustesse inscrite dans l'intégralité du travail de thèse nous allons aborder les tests appliqués aux modules VTF et TFFC.

3 Spécifications des paramètres électro-optiques des LEDs étudiées

Avant de décrire en détail les tests de robustesse en courant et température, il est important de rappeler les spécifications des constructeurs des LEDs pour positionner les niveaux de contraintes imposés lors de ces tests vis-à-vis des valeurs admissibles annoncées par les constructeurs.

Dans une première étape, la préparation des tests de robustesse a consisté en une comparaison des contraintes de température et de courant admissibles par les deux composants [1] [2]. Le tableau suivant résume les caractéristiques thermiques et électriques des deux références. Un point de focalisation réside en la connaissance de la température de face arrière de composant (T_{case}), la température maximale de jonction (T_{jmax}), et le courant maximal admissible (I_{fmax}) afin de paramétrer les tests. Le tableau donne également le courant maximal admissible pour une température T_{case} de 85 °C, qui correspondra à un point de fonctionnement de référence.

On remarque que les valeurs de courant admissibles I_{fmax} pour une température T_{case} de 125 °C sont respectivement de 550 mA et 1050 mA pour les structures VTF et TFFC. Nous pourrons apprécier dans la suite de cette étude si cette constatation trouve son origine dans des différences de performances thermiques des composants ou si elle provient d'une marge opérationnelle plus grande, définie par le constructeur.

Configuration de puce	VTF	TFFC
T_{case} maximal	125 °C	130 °C
Tj_{max}	150 °C	150 °C
I_{fmax} à T_{case}=125 °C	550 mA	1050 mA
I_{fmax} à T_{case} =85 °C	1000 mA	1050 mA

Tableau 1 : Valeurs de température et courant admissibles par les structures multi-puce VTF et TFFC [1] [2].

4 Test de robustesse en courant

Après une présentation du mode opératoire du test en courant, les résultats seront présentés par technologies et déclinés en trois parties : le suivi *in-situ* des paramètres, l'analyse comparative des caractéristiques électro-optiques et thermiques (avant et après test) ainsi que les analyses de défaillance des modules. Un bilan comparatif et synthétique sera finalement dressé.

4.1 Conditions de test

Le premier test de robustesse consiste à solliciter les composants multi-puce VTF et TFFC par paliers de courant. Après avoir caractérisé les paramètres électro-optiques et thermiques des LEDs (caractérisations initiales à t_0), elles sont montées sur banc de test et placées à une température T_{plaque} de 85 °C et un courant I_f de 1 A (point de référence). La connexion électrique en 4 fils est réalisée par brasure $Au_{80}Sn_{20}$ pour éviter d'éventuelles déconnexions lors du test (température de fusion > 280 °C). Trois composants sont testés simultanément. Les paliers de courant sont de 0,1 A et chaque palier dure 90 secondes afin d'atteindre une répartition homogène de la température de la structure. Ce temps de palier a été défini par le temps nécessaire à la stabilisation de la température mesurée sur la céramique ($T_{céram}$).

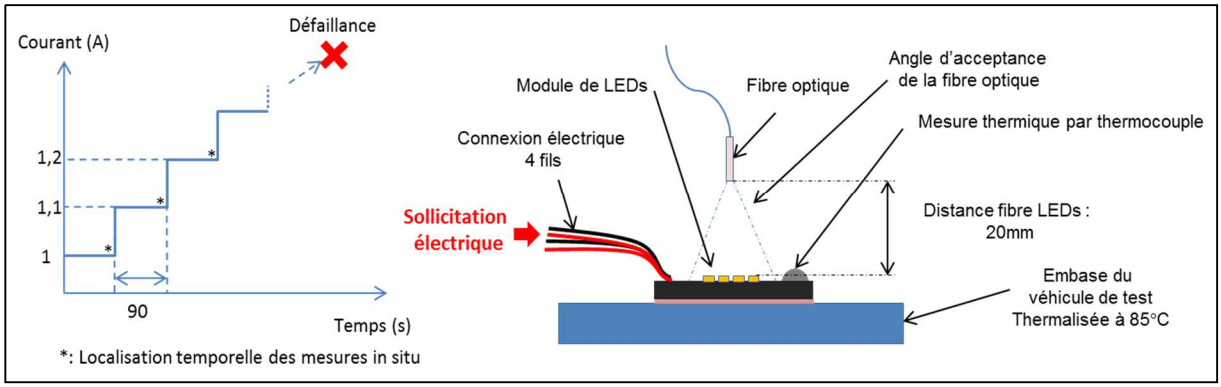


Figure 1 : Protocole d'évaluation de la robustesse en courant des modules de LEDs multi-puce et rappel du design pour la mesure in-situ de la puissance optique délivrée par le module au cours du test en courant.

Valeurs de paliers de courant I_f (A)	1 à 3,5 par pas de 0,1
Durée par palier (secondes)	90
Température consigne de plaque chauffante (°C)	85
Nombre de composants sur l'ensemble du test	3

Tableau 2 : Paramètres du protocole expérimental de test de robustesse en courant.

Concernant la condition d'arrêt des tests, lorsqu'un composant présente une défaillance brutale, le test est stoppé afin de garder deux composants sur trois fonctionnels pour effectuer des analyses et caractérisations comparatives. Une défaillance brutale est définie comme la perte de fonctionnalité d'au moins une puce[1]. Le Tableau 2 synthétise les paramètres du protocole expérimental mis en place.

En accord avec les caractérisations électro-optiques et thermiques mises en place sur le banc de test et détaillées dans le chapitre 2, le test de robustesse en courant se déroulera sur le banc de test dédié. Le suivi électrique des modules se traduira par le relevé du paramètre V_f à chaque fin de palier de courant. Le suivi optique consiste en l'enregistrement du spectre à la fin de chaque palier de courant via une interface par fibre optique. Le paramètre thermique sera le suivi de la température

[1] Dans le cas d'un montage en projecteur avec une optique par réflexion, la perte de fonctionnalité d'une puce entraîne directement un déséquilibre sur le faisceau en sortie de projecteur.

du substrat céramique des composants ($T_{céram}$), sur lequel sont montées les puces LEDs. Cette information sera mesurée par un thermocouple collé en bord de céramique. Le protocole de suivi des LEDs dans le test en courant est présenté dans la Figure 1. L'accumulation de la puissance à dissiper au cours du test engendrera une augmentation de la température globale du composant. Cela sera pris en compte et caractérisé par le suivi de la température $T_{céram}$.

4.2 Résultats obtenus pour les modules TFFC

Les résultats du test en courant appliqué à la technologie TFFC sont présentés ci-après, en commençant par le suivi *in-situ* des paramètres au cours du test. Nous avons focalisé une attention particulière sur certains composants qui présentent des atypismes ou des comportements remarquables.

4.2.1 Analyses comportementales *in-situ*

a. Exemples de dérives électriques et thermiques

L'évolution du V_f des modules TFFC ainsi que la température $T_{céram}$ en fonction du courant pour trois modules sont présentés en Figure 2. Le composant défaillant à 3,5 A est la LED TFFC 03. Les deux autres composants ont été sollicités volontairement jusqu'à 3,3 A seulement pour ne pas engendrer de défaillance.

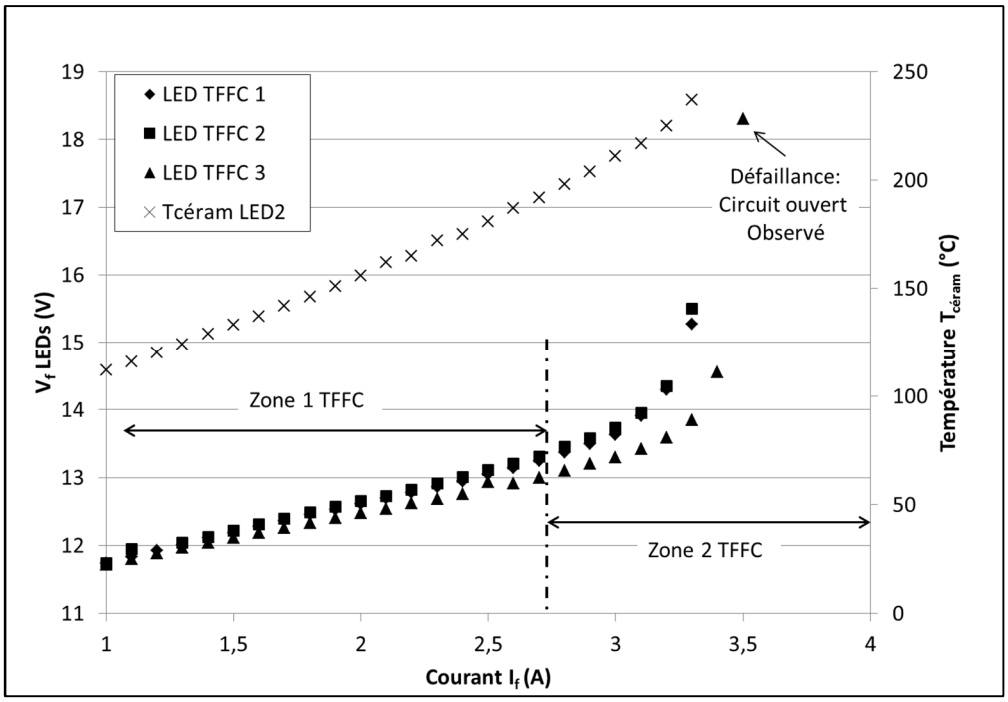


Figure 2 : Mesures in situ de V_f et $T_{céram}$ des modules TFFC étudiés en fonction du courant.

Par le suivi du paramètre V_f, on constate que la technologie TFFC montre deux types d'évolutions :

- La première, représentée par « zone 1 TFFC », est linéaire. Cette évolution dans un repère V = f(I) correspond à un comportement de type résistif (résistance série R_s). Cette zone de courant est définie entre 1 et 2,7 A.
- La seconde zone correspond à un comportement non linéaire de l'évolution de V_f, notée « zone 2 TFFC ». Cette zone montre une très forte augmentation du paramètre V_f à partir de 3,2 A pour atteindre plus de 18 V à 3,5 A. Le test s'arrête à ce point lors de la défaillance brutale du module en circuit ouvert.

Concernant l'évolution de la température $T_{céram}$ mesurée uniquement sur la LED TFFC 02, on constate une augmentation logique de la température, corrélée avec l'augmentation de la puissance électrique injectée. Si l'on retire la puissance optique à la puissance électrique, la puissance thermique nous permet d'estimer la température moyenne de jonction du composant via la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ du composant. Cette étape permet une meilleure appréciation des contraintes électriques appliquées en regard de la température de jonction maximale admissible de 150 °C. En se basant sur la moyenne des résistances thermiques mesurées sur les lots de vieillissements (chapitre 2), les calculs sont basés sur une résistance $R_{th\ j\text{-}puits}$ de 5 $K.W^{-1}$ pour la structure TFFC. La résistance thermique jonction-puits thermique ($R_{thj\text{-}puits}$) est considérée ici comme indépendante de la température (hypothèse forte mais nécessaire). L'évolution de la température T_j moyenne au cours du test est présentée en Figure 3 et avoisine donc les 350 °C à 3,3 A pour une puissance thermique de 50 W ce qui est bien au-delà de la température maximale admissible (150°C).

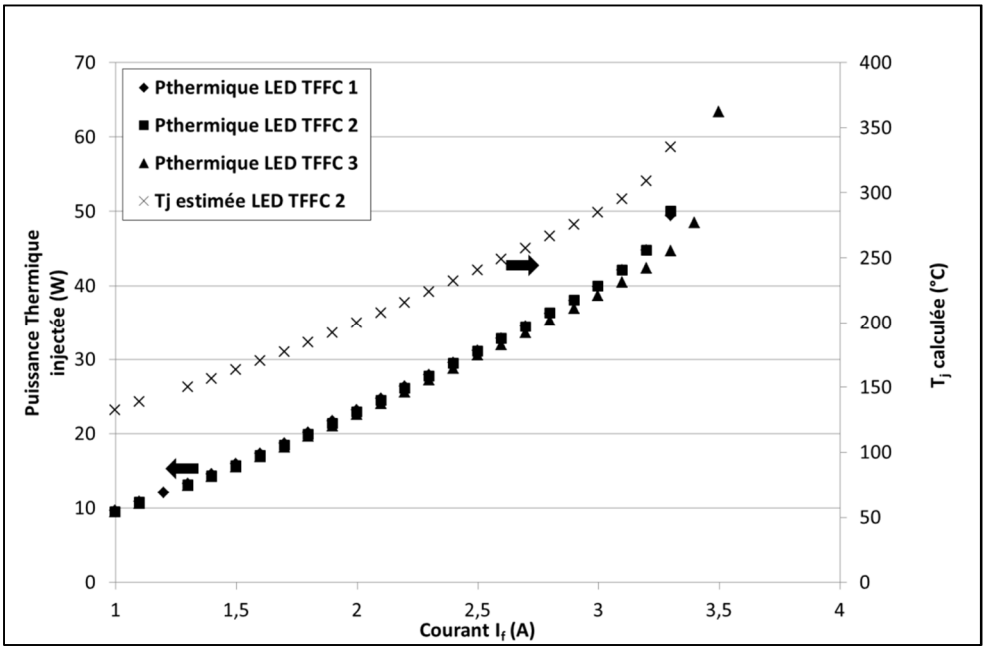


Figure 3 : Représentation de la puissance thermique mise en jeu et estimation de la T_j moyenne des modules TFFC au cours du test en courant.

b. Exemples de dérives optiques

Le suivi du spectre optique de la technologie TFFC durant le test en courant est présenté en Figure 4. L'exemple ici est celui de la LED TFFC 02 qui a été sollicitée jusqu'à un courant de 3,3 A. Les spectres présentés correspondent aux points de changements de comportements optiques du module durant le test.

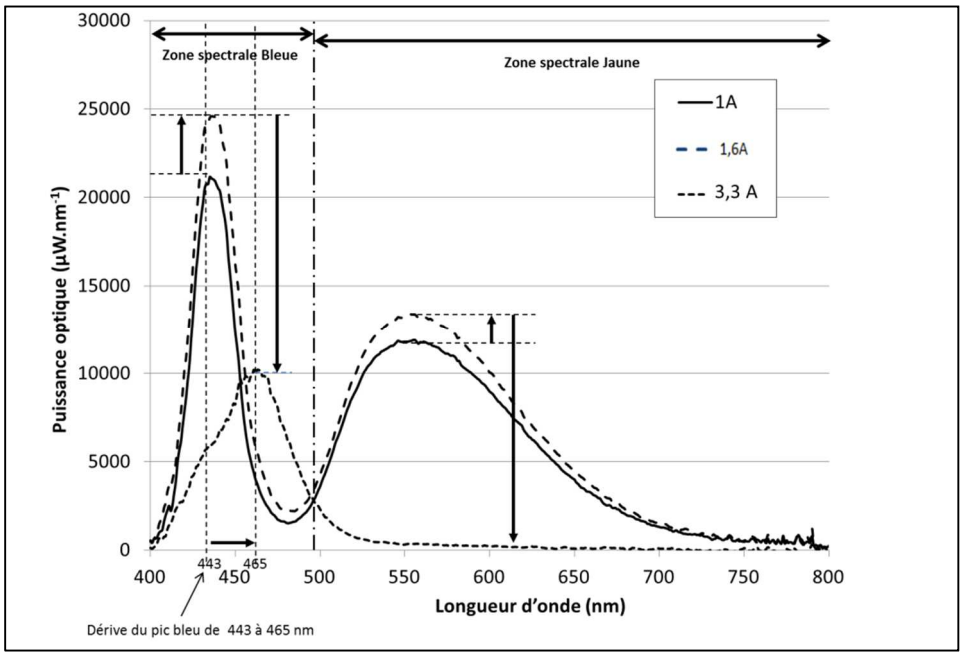


Figure 4 : Représentation de l'évolution du spectre de la technologie TFFC (LED 2) au cours du test en courant.

Grâce à l'analyse du spectre optique, on constate tout d'abord une dérive de la position du pic maximum dans le bleu (« *red-shift* » d'environ 30nm) entre 1 A et 3,3 A. Cette dérive peut être corrélée à l'augmentation de la température de jonction de la LED qui sera discuté plus en détail dans le test en température, en s'appuyant sur la bibliographie du domaine [3]. La deuxième information intéressante est l'évolution en deux temps de l'aire sous la courbe de la zone spectrale bleue. En effet, on constate tout d'abord une augmentation jusqu'à environ 1,6 A puis une diminution jusqu'à la fin du test. Le tracé de l'aire des pics bleu et jaune permet d'apprécier clairement ce comportement, et de décorréler les puissances optiques, dans la bande bleue et jaune (Figure 5).

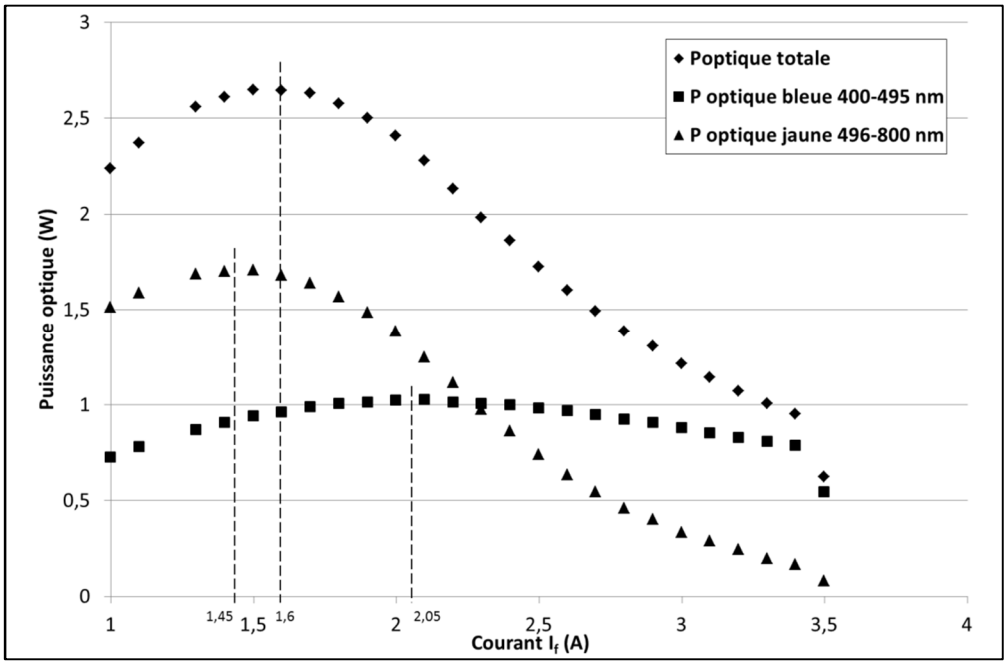


Figure 5 : Evolution de la puissance optique totale, dans la bande bleue et jaune de la structure TFFC 03 au cours du test en courant.

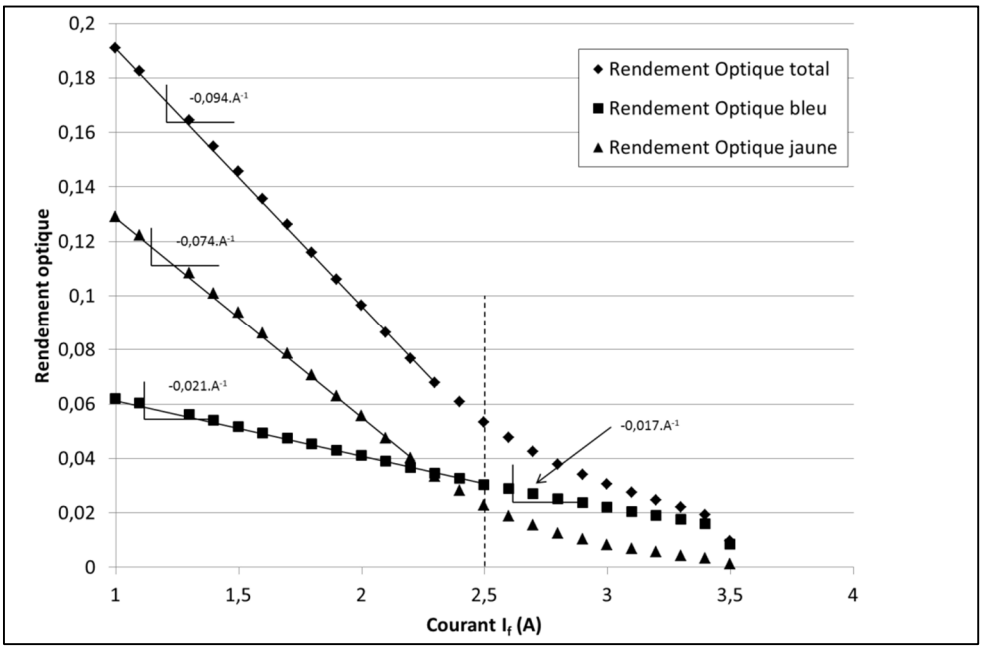


Figure 6 : Evolution des rendements optiques de la structure TFFC (LED 03) au cours du test en courant.

Cette représentation permet de positionner précisément le maximum des puissances jaune, totale et bleue, respectivement à 1,45 A, 1,6 A et 2,05 A. L'augmentation de l'aire du pic jaune entre 1 et 1,45 A nous informe que la capacité de conversion optique du luminophore n'est pas saturée à 1 A. Nous verrons que ce point sera exploité en analyse comparative.

Enfin, les rendements optiques (global, bleu et jaune) sont représentés dans la Figure 6. On distingue deux zones d'évolution du rendement optique total dont la séparation est située à 2,5 A.

Cette représentation permet de mettre en lumière la différence de vitesses de décroissance des rendements bleu et jaune (domaine < 2,5 A), respectivement -0,021.A^{-1} et -0,074.A^{-1}. Aussi, le changement de pente constaté au-delà de 2,5 A sur l'évolution du rendement optique total est essentiellement dû à la contribution des luminophores. En effet la pente de l'évolution du rendement bleu reste quasiment inchangé (-0.017.A^{-1} soit 20 %), contrairement au rendement optique jaune qui avoisine 0.

Le suivi du rapport Y/B permet de déterminer la sensibilité du point de couleur d'une LED à une sollicitation extérieure (ici le courant). L'évolution de ce paramètre optique pour la technologie TFFC est présentée en Figure 7. La caractéristique n'étant pas linéaire, nous retiendrons la sensibilité maximale (pente maximale) du ratio Y/B de la structure TFFC face à un fort courant. Elle est évaluée à -1,31.A^{-1} entre 1,5 A et 2,5 A.

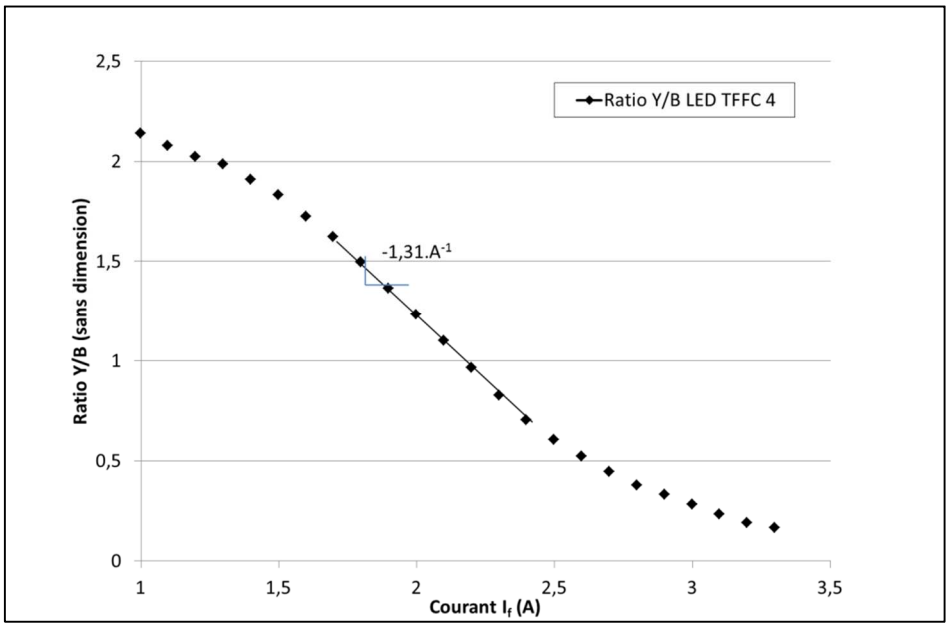


Figure 7 : Evolution du ratio Y/B de la structure TFFC au cours du test en courant.

Nous venons de présenter les dérives paramétriques de la technologie TFFC face à un test de robustesse en courant. Dans la suite, nous allons aborder les mesures comparatives (avant et après le test), réalisées sur les composants fonctionnels (TFFC 01 et 02). Rappelons que le composant TFFC 03 est considéré comme défaillant.

4.2.2 Analyses comparatives des composants fonctionnels

Pour chaque partie, le composant TFFC 01 a été choisi afin d'analyser les dérives paramétriques enregistrées. Les dérives enregistrées sur le second composant fonctionnel TFFC 02 seront ensuite comparées en fin de paragraphe.

a. Paramètres électriques

La Figure 8 présente les caractéristiques I(V) du composant TFFC 01 avant et après le test en courant. En comparant les deux tracés, on constate une évolution notable des caractéristiques dans les zones 2 et 4, respectivement associées aux comportements de contacts, et résistance série R_s. L'extraction de paramètres électriques associés montre une évolution du paramètre R_s de 1,26 à 1,65 Ω (soit plus de 32 %). Cette augmentation signifie qu'une partie du circuit électrique a subi des modifications irréversibles. La tension de seuil V_{th} n'a pas été modifiée et reste égale à 11,02 V. Les analyses de défaillance nous donnerons plus d'informations sur ce point. Une augmentation globale du courant sur l'ensemble de la zone 2 est observée (+84 % de la valeur du courant à +6 V). Cette augmentation peut être liée à la dégradation des prises de contacts (métal/semi-conducteur) et donc une diminution de la barrière de potentielle Schottky [4].

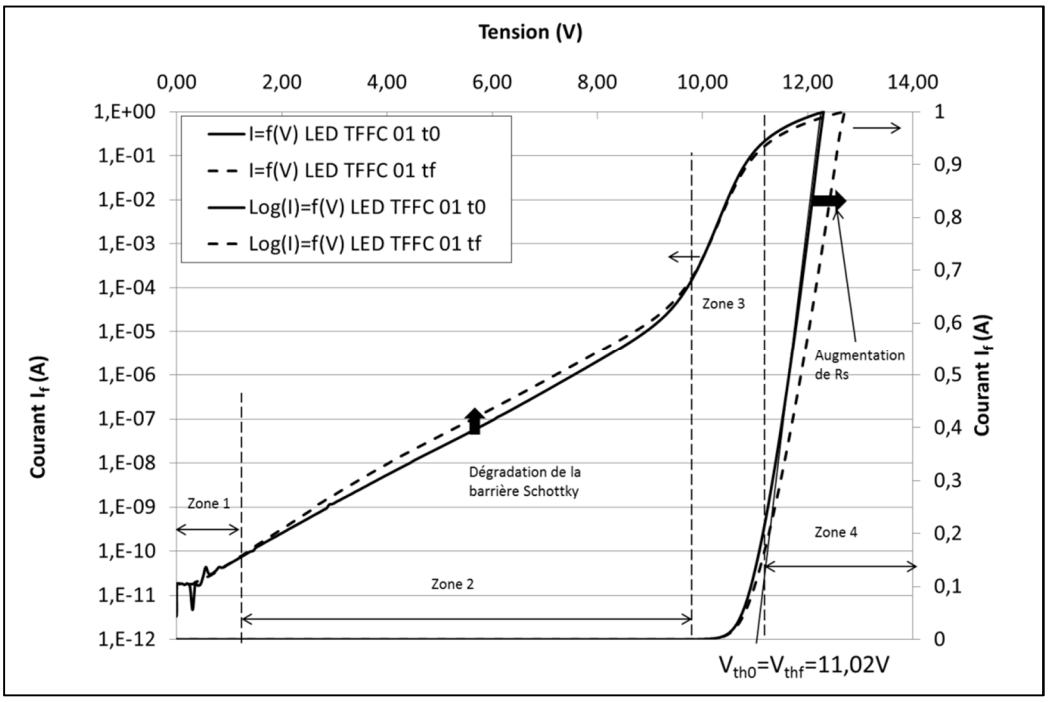


Figure 8 : Caractéristiques I(V) du module TFFC 01 avant et après le test de robustesse en courant.

L'évolution des caractéristiques électriques de l'autre composant (LED TFFC 02) permet d'apprécier la cohérence des résultats. Les valeurs de R_s et de courant à +6 V sont rassemblées dans le Tableau 3. Les tendances sont similaires sur le composant LED TFFC 02 ce qui nous permet de valider les comportements observés sur cette technologie TFFC.

	Paramètre R_s	I_f @ 6 V
LED TFFC 1	+32 %	+84 %
LED TFFC 2	+25 %	+104 %

Tableau 3 : Evolution des paramètres électriques des LEDs TFFC non défaillantes suite au test de robustesse en courant.

b. Paramètres optiques

L'évolution des paramètres optiques des modules LEDs consiste au suivi du rendement optique du composant ainsi que des contributions bleu et jaune. L'analyse est comparative entre les valeurs mesurées avant et après le test en courent. La Figure 9 montre l'évolution du rendement optique du module TFFC 01. Une diminution de 12,5 % sur le rendement optique global est observée à 1 A et équivalente sur toute la gamme de courant. D'autre part, la position du maximum de rendement n'est pas modifiée (environ 30 mA), ce qui traduit une évolution faible des fuites électriques au sein du module. Ce résultat est cohérent avec les mesures comparatives électriques. Pour rappel, nous avons constaté une augmentation de la résistance R_s de 0,39 Ω (soit 32 % de la valeur initiale). Cette évolution a une influence directe sur le rendement global du composant $\eta = P_{opt}/P_{élec}$, le V_f étant plus grand pour aboutir au même courant. Si la perte de rendement optique observée était uniquement due à l'augmentation du paramètre R_s, on aurait dû observer une diminution du rendement de 3,16 % introduite seulement par la puissance électrique $P_{élec}$. Or, les 12,5 % indique donc que la puissance optique P_{opt} a diminué, les couches actives du composant et/ou le chemin optique ont subi une perte d'efficacité « complémentaire » que l'on peut approximer à environ 10%.

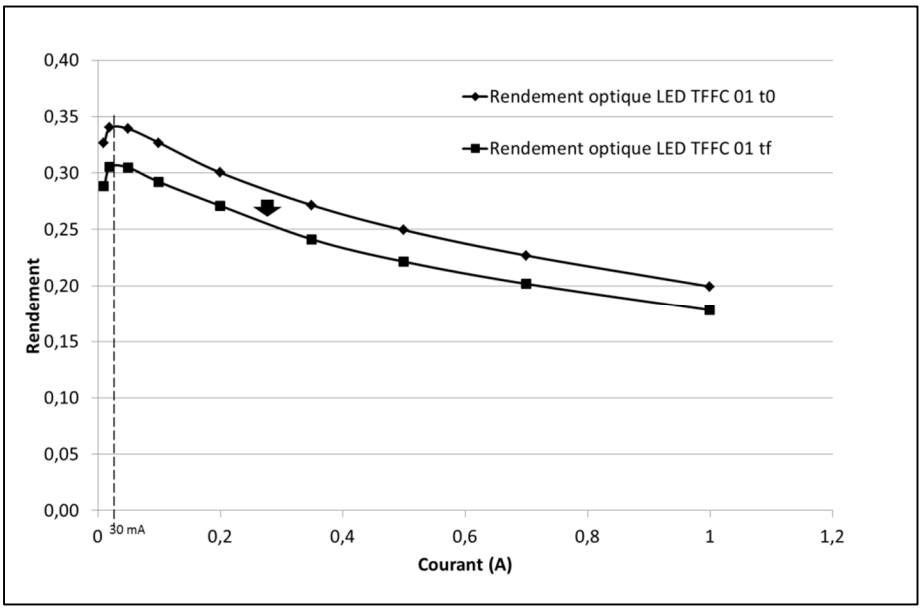


Figure 9 : Evolution du rendement optique en fonction du courant du module TFFC 01 avant et après le test de robustesse en courant.

Le Tableau 4 permet d'apprécier les pertes de puissances optiques dues au test de robustesse en courant sur les composants TFFC 01 et 02. Les paramètres montrent d'une part une bonne cohérence de l'évolution des paramètres entre les deux composants. De la même façon que pour les résultats électriques, cette cohérence permet de valider les comportements observés sur cette technologie. D'autre part, en lien avec la Figure 6, il est à noter la diminution de la puissance P_{jaune} plus rapide que P_{bleue}. Cette diminution de la puissance jaune est probablement due à une forte sollicitation thermique des luminophores. Durant le test, plusieurs effets se conjuguent : la puissance optique bleue incidente augmente, ce qui augmente l'auto-échauffement des luminophores, et d'autre part, l'auto-échauffement de la puce augmente et représente la majeure partie de la sollicitation thermique du luminophore. Des travaux sur l'étude de la sensibilité de luminophores YAG :Ce ont mis en évidence une forte dépendance de la conversion intrinsèque lumineuse à la température [5]. Nous verrons que le test en température apportera ultérieurement des éléments complémentaires confirmant notre analyse.

	Rendement optique total	P_{opt}	P_{bleue}	P_{jaune}
LED TFFC 01	-12,5 %	-6,02 %	-2,88 %	-6,9 %
LED TFFC 02	-13 %	-11,6 %	-6,7 %	-13,6 %

Tableau 4 : Evolution des paramètres optiques des LEDs TFFC fonctionnelles à 1 A avant et après le test de robustesse en courant.

c. Paramètres thermiques

La Figure 10 présente les tracés $R_{th}(C_{th})$ avant et après le test de robustesse en courant mesurés par l'équipement de caractérisation T3Ster® présenté au chapitre 2. La caractéristique présentée est celle de la LED TFFC 01. En lien avec la caractérisation thermique des modules de LEDs en chapitre 2, on constate une évolution notable de la zone associée à la puce et son assemblage. Une translation des courbes (finale ou initiale), selon la méthode proposée par le T3Ster®, permet de mettre en évidence cette modification [6] [7]. Cette amélioration de résistance thermique est estimée à 0,2 $K.W^{-1}$ et est située aux premiers niveaux du composant. Les analyses de défaillances apporteront plus d'éléments sur cette potentielle amélioration de la résistance thermique. Une hypothèse avancée est celle du recuit ou de la stabilisation de l'assemblage de puce (report de la structure

TFFC). Concernant le composant LED TFFC 02, nous n'avons observé aucune modification notable de la caractéristique C_{th} (R_{th}).

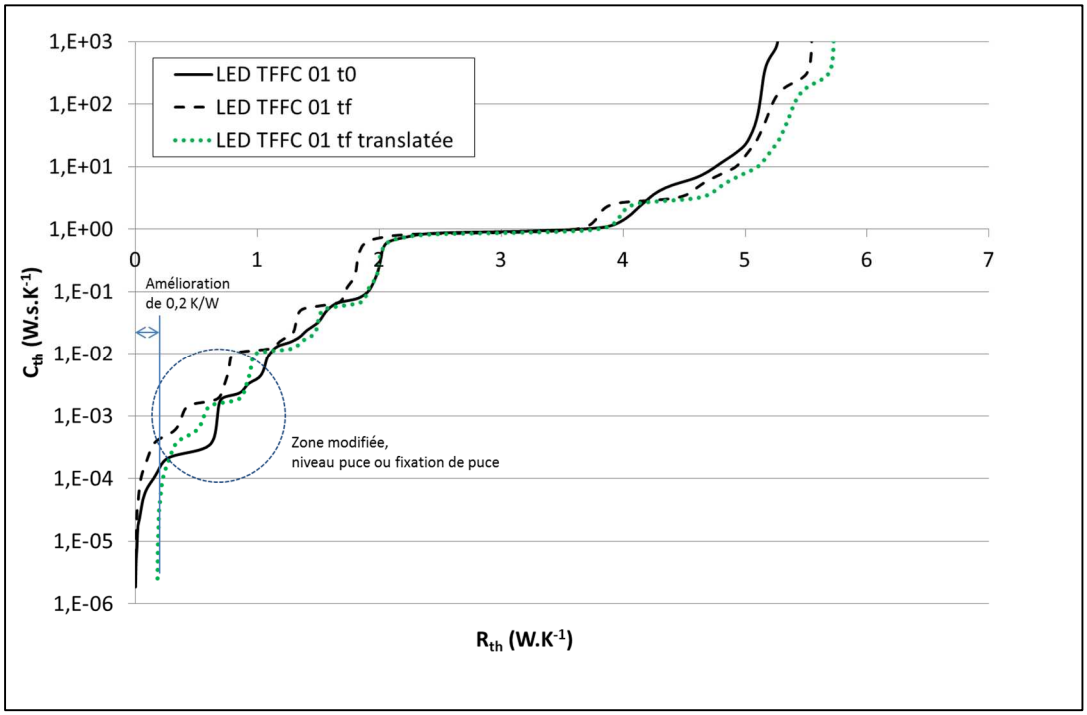


Figure 10 : Evolution de la résistance thermique de la LED TFFC 01 avant et après le test de robustesse en courant.

4.2.3 Analyses de défaillance

La Figure 11 permet de visualiser le module LEDs TFFC 03 avant et après défaillance par imagerie optique (en vue de dessus). La Figure 11-a représente l'image de la puce défaillante sans modification du composant. On note la présence d'une zone noircie sous le luminophore fritté. La Figure 11-b est l'image de cette même puce mais après le retrait du luminophore. La localisation de cette zone noircie est maintenant définie. Electriquement, c'est cette zone qui est en circuit ouvert. Ce point a été vérifié sous pointes de test. En lien avec la Figure 11-c, représentant la structure des contacts de la puce TFFC, cette zone défaillante correspond à la zone située entre les deux contacts d'alimentation de la puce sur la céramique. Nous pouvons donc conclure que le mécanisme de défaillance mis en jeu aboutit à une fusion d'une partie de la puce, située géographiquement entre les deux contacts d'alimentation de la puce. On notera que cette zone présente un couplage thermique vers l'embase moins performant que le reste de la puce TFFC (écartement des plots d'accueil en Au plus prononcé).

Si l'on observe plus précisément les vias de la structure TFFC, on peut émettre l'hypothèse d'une mauvaise répartition du courant dans la structure TFFC. La Figure 12 confronte l'aspect d'un via de la structure TFFC avant (Figure 12-a) et après (Figure 12-b) le test en courant. Cette comparaison met en évidence la formation d'un anneau de couleur brune en bord du contact N (via). Cela correspond à la formation probable d'un intermétallique Au_XAl_Y situé au niveau du contact N (confirmation en EDX). Sa présence en bord de via uniquement, renforce l'hypothèse d'une activation par le courant et/ou la température. En effet le bord de via est une zone de forte concentration de courant, amplifiée durant le test de robustesse. L'auto-échauffement local pourrait être responsable d'une activation rapide (croissance) pour la formation de ce type d'intermétallique.

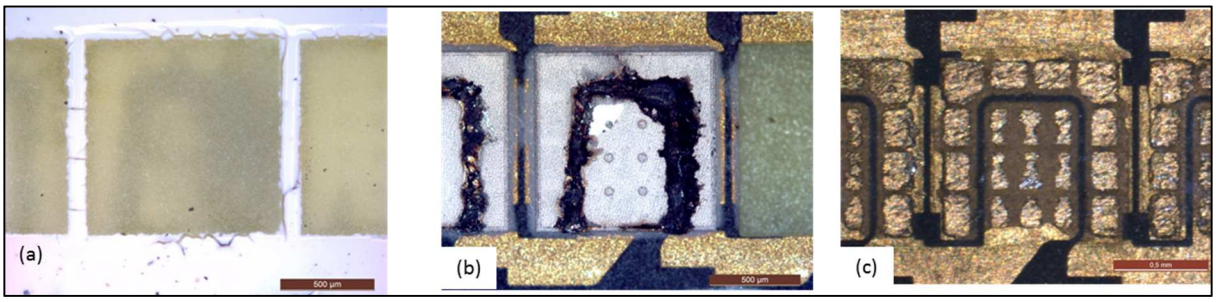


Figure 11 : Visualisation de la défaillance entre les amenées de courant du module TFFC 03 lors du test en courant.

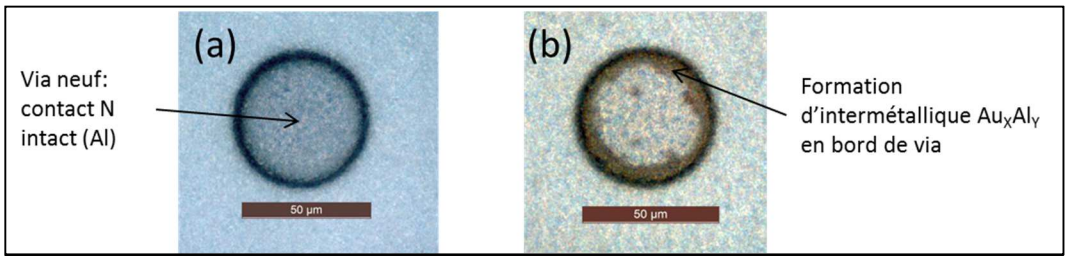


Figure 12 : Image d'un via neuf (a) et d'un via suite au test en courant (b) de la structure TFFC.

Une caractérisation plus fine de la structure TFFC, réalisée sous MEB, est présentée en Figure 13 . Nous avons focalisé l'observation au niveau puce et principalement sur l'évolution des contacts sur les vias exploitables. L'exemple donné ici confirme la présence d'un intermétallique Au_X-Al_Y au niveau du contact sur le GaN-N. La présence d'Au et d'Al dans l'intermétallique a été confirmé une analyse EDX détaillée en Figure 14. La présence de cet intermétallique dans la structure peut avoir pour conséquence une augmentation de la résistance série des puces. En effet, les travaux de caractérisations d'intermétalliques de la littérature rapportent que tous les intermétalliques Au_X-Al_Y présentent une résistivité supérieure (entre 10 et 20 fois) à celle de l'Au ou de l'Al pris séparément [8]. Couplé à la formation d'intermétallique, si certains vias deviennent plus résistifs que d'autres, la répartition de lignes de courant dans la puce est perturbée, la répartition du courant n'est plus homogène sur la surface de la puce et la résistance équivalente de la structure augmente. Ce point sera détaillé plus précisément au chapitre 4. L'augmentation du R_s (+32 %) du module TFFC 01 durant le test en courant pourrait donc trouver son origine dans la formation de cet intermétallique.

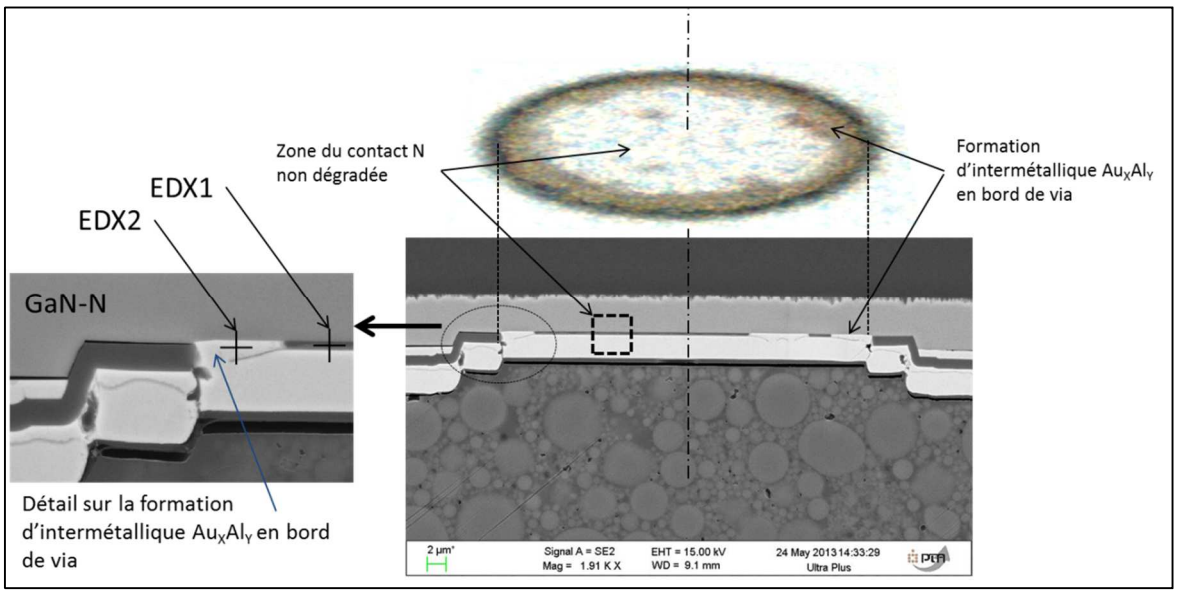


Figure 13 : Analyse MEB, en électrons secondaires, d'un via de la structure TFFC après le test de robustesse en courant.

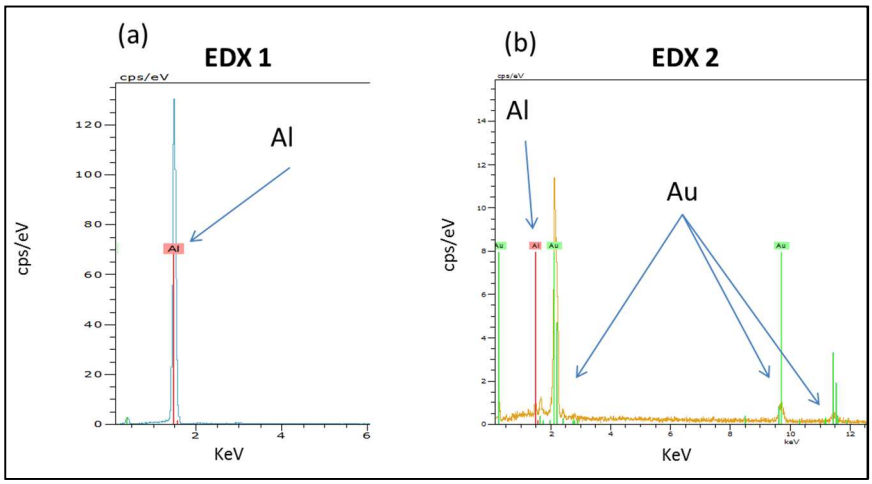


Figure 14 : Analyse EDX des points référencés EDX1 (a) et EDX2 (b) en Figure 13.

Nous venons de présenter l'ensemble des résultats de dérives des grandeurs électriques, optiques et thermiques lors du test en courant appliqué à la technologie TFFC et l'analyse de défaillance associée aux dérives mises en lumière. A présent, nous allons nous attacher à décrire les résultats obtenus sur la technologie VTF.

4.3 Résultats obtenus pour les modules VTF

4.3.1 Analyses comportementales *in-situ*

a. Exemples de dérives électriques et thermiques

L'évolution du paramètre V_f des modules VTF ainsi que la température $T_{céram}$ en fonction du courant sont présentées en Figure 15. Les trois composants testés sont représentés. Le composant défaillant à 2,4 A est la LED VTF 01. Les deux autres composants ont été sollicités jusqu'à 2,3 A sans présenter de défaillance.

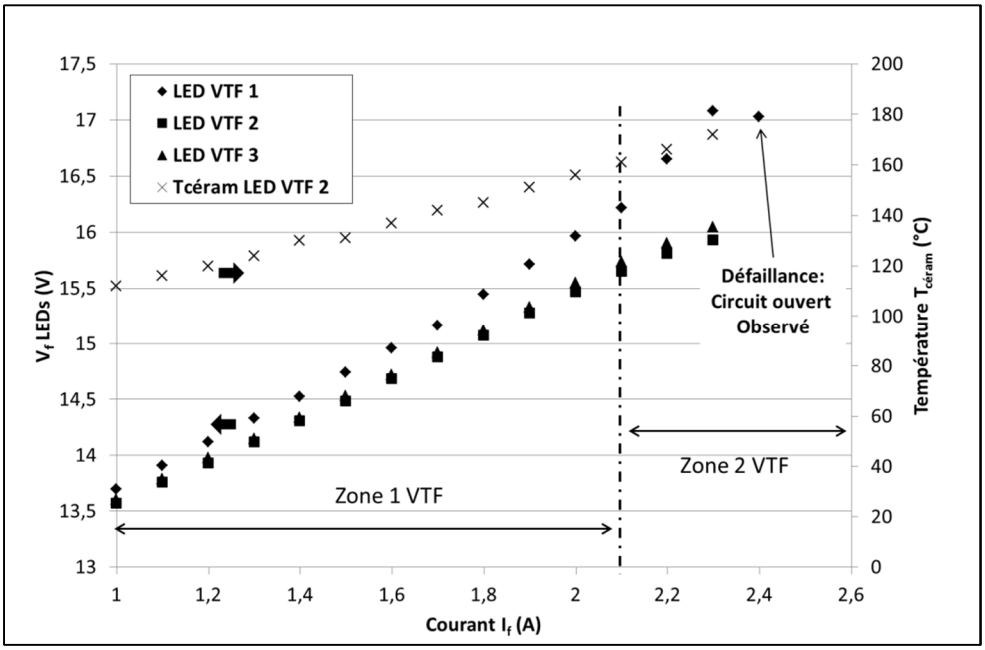


Figure 15 : Mesures in situ de V_f et $T_{céram}$ des modules VTF étudiés en fonction du courant.

Si l'on s'intéresse tout d'abord au suivi du V_f, on constate que la technologie VTF montre deux évolutions :

- Une évolution linéaire représentée par « zone 1 VTF », relative au comportement résistif (R_s) et définie entre 1 et 2,1 A.
- La seconde zone correspond à un comportement non linéaire de l'évolution de V_f, notée « zone 2 VTF ». Cette zone rapporte une légère accélération dans l'augmentation de V_f puis un déclin entre 2,3 et 2,4 A, autour de 17 V. Le test s'arrête à 2,4 A lors de la défaillance brutale du module en circuit ouvert.

Concernant l'évolution de la température $T_{céram}$ de la LED VTF 02, on constate une augmentation logique de la température, corrélée avec l'augmentation de la puissance injectée. On peut estimer la température de jonction moyenne en fixant une résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ égale à 5,5 $K.W^{-1}$ (comme caractérisée en chapitre 2). On fera l'hypothèse que la $R_{thj\text{-}puits}$ est constante sur toute la gamme de température balayée, ce qui constitue une hypothèse communément admise. L'évolution de la température T_j moyenne au cours du test est présentée en Figure 16. La température de jonction avoisine 280 °C à 2,3 A, pour une puissance thermique injectée de 40 W.

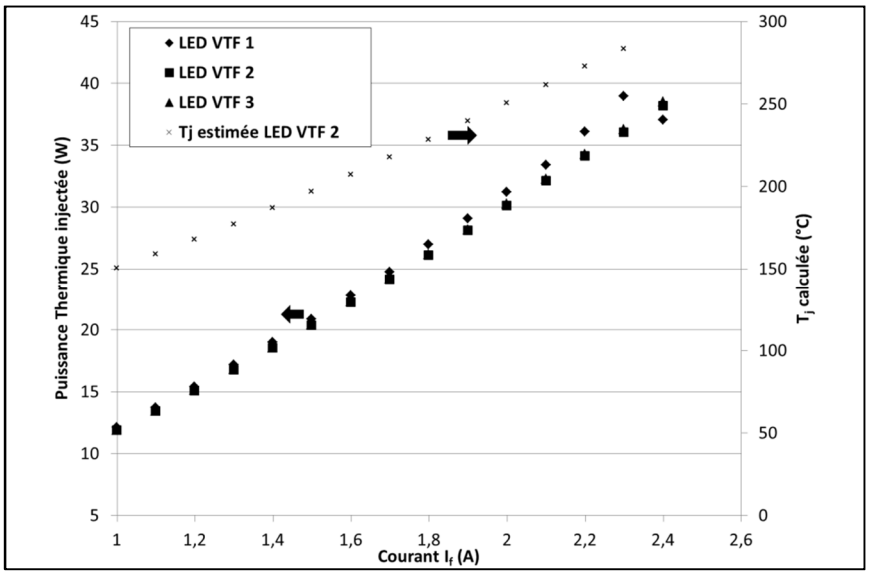


Figure 16 : Représentation de la puissance thermique mise en jeu et estimation de la T_j moyenne des modules VTF au cours du test en courant.

b. Exemples de dérives optiques

L'exemple ici est celui de la LED VTF 01. L'évolution du spectre optique est présentée en Figure 17. Grâce à l'analyse du spectre, on constate une dérive de la position du pic bleu entre 1 A et 2,3 A de 19 nm. Ce phénomène est commun aux deux composants et reste en grande partie dû à l'augmentation de la température de jonction [9].

Les évolutions des puissances optiques P_{opt}, P_{bleue} et P_{jaune} sont présentées en Figure 18. Notons l'évolution en deux temps de la puissance optique P_{bleue}. En effet, on constate tout d'abord une augmentation jusqu'à environ 1,6 A évaluée à 16 % : dans cette zone, l'augmentation de la densité de courant entraîne un gain de puissance optique. Ensuite, une diminution de 33 % jusqu'à la fin du test à 2,3 A : dans cette gamme de densité de courant, le dispositif sature électro-optiquement et un apport supplémentaire de courant aboutit uniquement à l'augmentation de la charge thermique à dissiper.

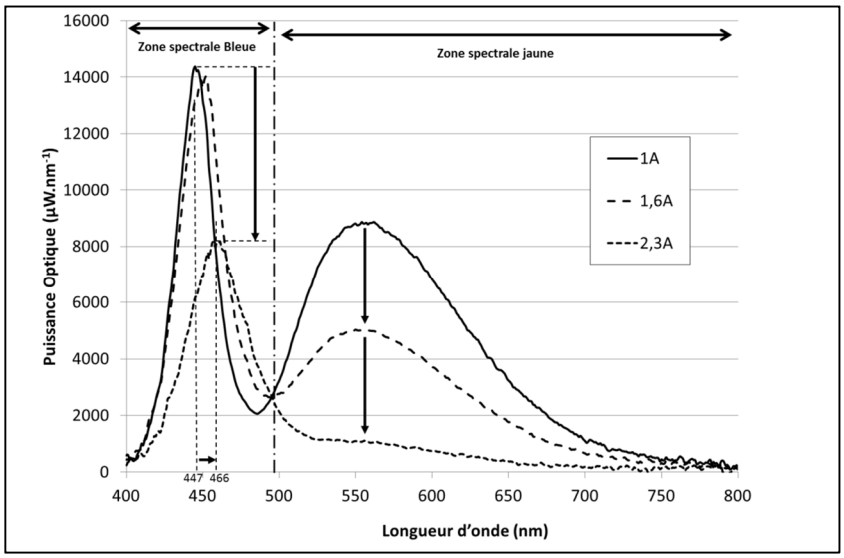


Figure 17 : Représentation de l'évolution du spectre de la technologie VTF (LED 01) au cours du test en courant.

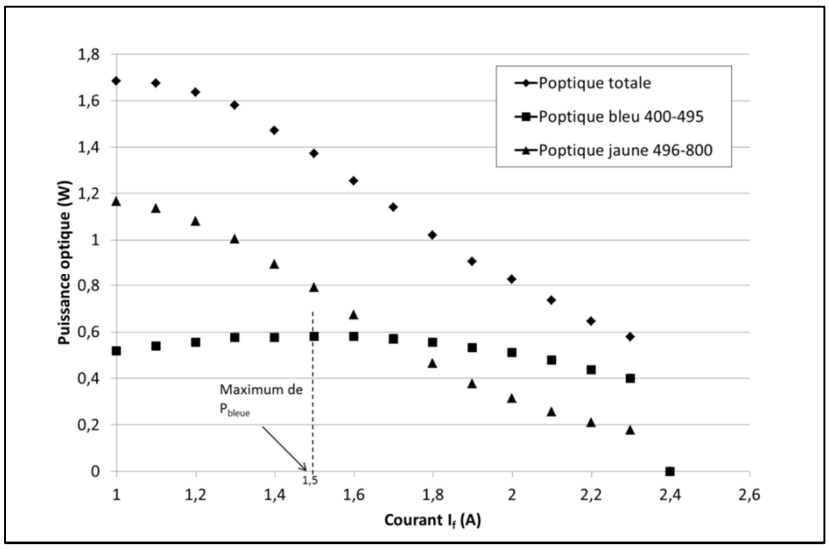


Figure 18 : Evolution des puissances optiques, totale bleue et jaune de la structure VTF (VTF 01) au cours du test en courant.

Cette représentation permet de positionner précisément le maximum de puissance bleue, à 1,5 A. la puissance optique P_{jaune} ne suit pas la même évolution que P_{bleue}. On constate uniquement une diminution de la puissance P_{jaune} avec le courant, ce qui indique que la capacité de conversion du luminophore est maximale à 1 A. Ce point peut traduire deux pistes possibles :

- Le luminophore disposé sur les puces arrive à saturation optique à 1 A.
- Le couplage thermique du luminophore est moins performant, ce qui entraîne une plus forte augmentation de sa température, et donc un rendement optique réduit. Compte tenu des éléments d'analyse, il est difficile de privilégier l'une ou l'autre des hypothèses.

Enfin, les rendements optiques (global, bleu et jaune) sont représentés en Figure 19. Cette représentation permet de mettre en lumière la différence de vitesses de décroissance des rendements bleu et jaune (< 1,6 A) en fonction du courant d'alimentation, respectivement -0,021 A^{-1} et -0,102 A^{-1}. Le changement de pente des différents rendements est moins marqué que pour la technologie TFFC. Cependant, la pente de rendement du bleu reste constante jusqu'à l'apparition de

la défaillance à 2,4 A. L'évolution de la pente du rendement optique global au-delà de 1,6 A est donc exclusivement due à la variation du rendement de la conversion optique par le luminophore.

Le ratio Y/B est représenté en Figure 20 pour la technologie VTF. Le maximum de pente est déduit, et évalué à -1.97 A^{-1}.

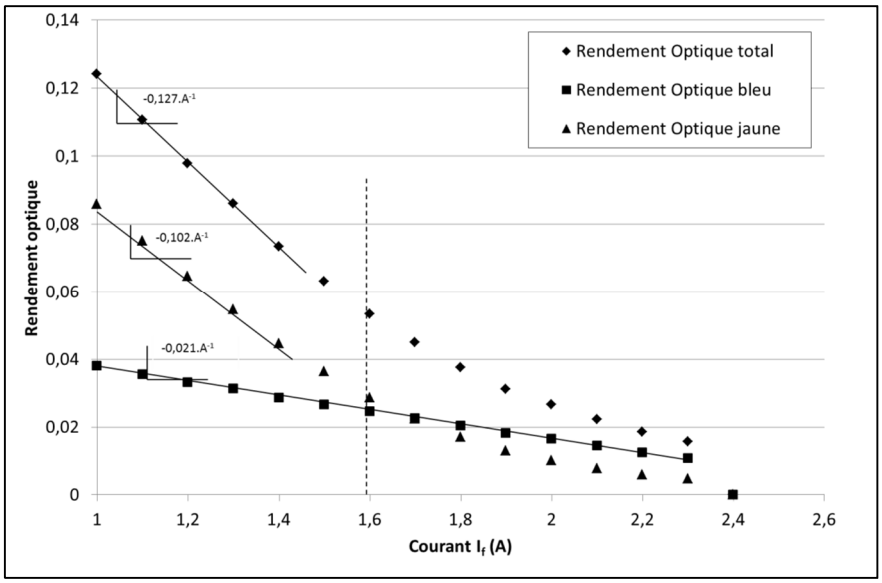


Figure 19 : Evolution des rendements optiques de la structure VTF (LED 01) au cours du test en courant.

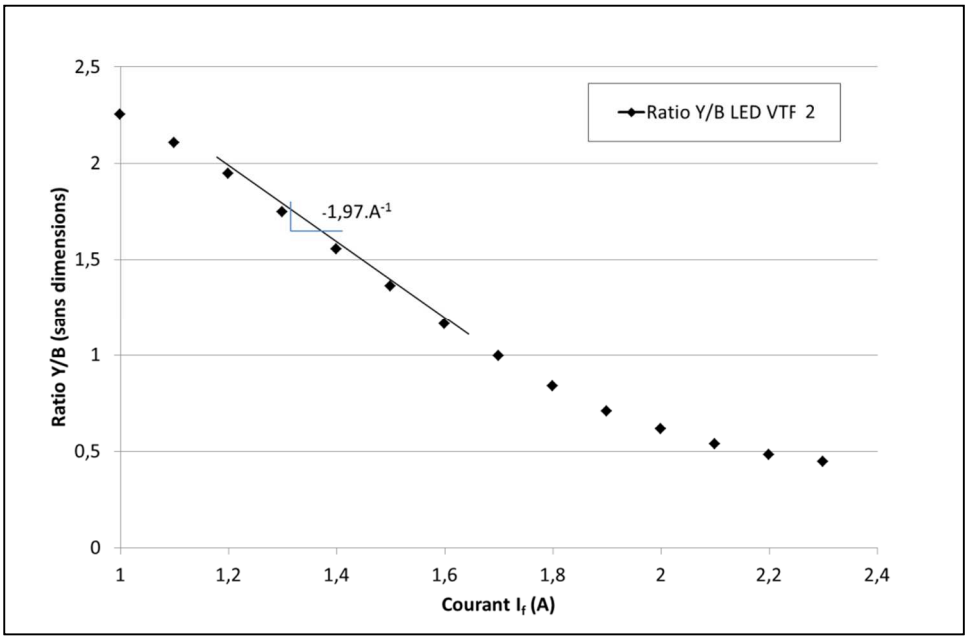


Figure 20 : Evolution du ratio Y/B de la structure VTF au cours du test en courant.

Nous venons de présenter les dérives paramétriques de la technologie VTF face à un test de robustesse en courant. Dans la suite, nous allons aborder les mesures comparatives (avant et après le test), réalisées sur les composants fonctionnels (VTF 02 et 03). Rappelons que le composant VTF 01 est considéré comme défaillant.

4.3.2 Analyses comparatives des composants fonctionnels

Pour chaque partie, le composant VTF 02 a été choisi afin d'analyser les dérives paramétriques enregistrées. Les dérives enregistrées sur le second composant fonctionnel VTF 03 seront ensuite comparées en fin de paragraphe.

a. Paramètres électriques

La Figure 21 suivante présente les caractéristiques I(V) du composant VTF 02 avant et après le test en courant. En comparant les caractéristiques, on constate une évolution notable dans les zones 1 et 2, associées respectivement aux courants de fuite/contribution de l'ESD et à la contribution des contacts. Une augmentation du courant sur la zone 1 est observée (+66 % de la valeur du courant à +2 V). Cette augmentation peut être due à une augmentation des fuites ou une modification des propriétés de la protection ESD. La pente de la zone 2 est modifiée. En lien avec le modèle électrique équivalent, c'est E_{00} qui est concerné dans l'expression de la densité de courant par effet tunnel (cf. chapitre 2, équation 4). E_{00} s'exprime par :

$$E_{00} = \frac{q\hbar}{2}\sqrt{\frac{N_a}{\varepsilon_s m^*_h}} \qquad \textbf{Équation 1}$$

avec N_a la densité de dopants, m^*_h la masse effective réduite et $\hbar$ la constante de Planck réduite. Dans ces conditions, le dopage au niveau des contacts N_a a probablement été modifié. L'hypothèse est une diffusion de métal dans le semi-conducteur. Les contacts sur le semi-conducteur peuvent aussi présenter des modifications physiques. L'extraction des valeurs de R_s avant et après le test montre une très bonne stabilité, de 1,93 à 1,92 Ω. La valeur de V_{th} n'a pas été modifiée par le test en courant et vaut 12,1 V.

L'évolution des caractéristiques électriques de l'autre composant (LED VTF 03) permet d'apprécier la dispersion des résultats. Les valeurs de R_s et de courant à +6 V sont synthétisées dans le Tableau 5. Les tendances sont similaires sur le composant LED VTF 03 ce qui nous permet de valider les comportements observés sur cette technologie.

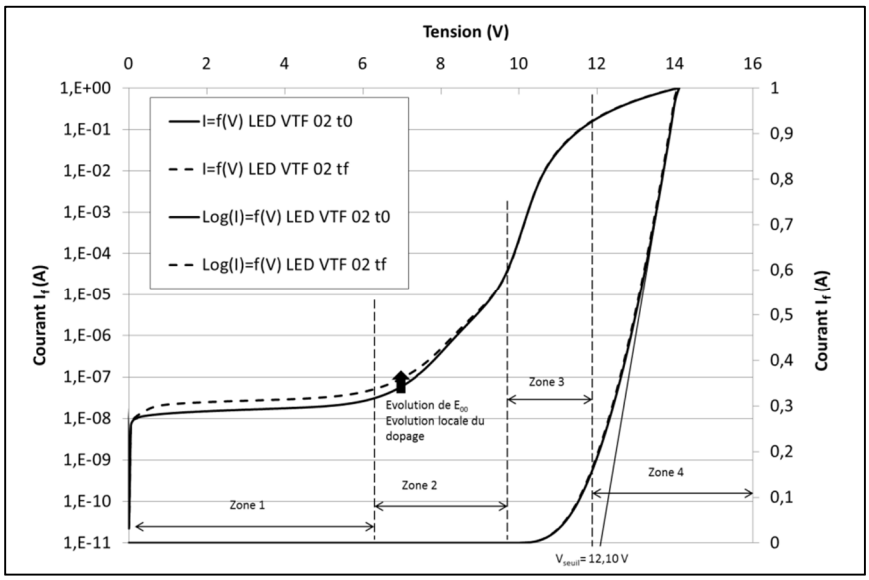


Figure 21 : Caractéristiques I(V) de la technologie VTF avant et après le test de robustesse en courant.

	Paramètre R_s	Paramètre R_p	Courant à +6V
LED VTF 02	-0,5 %	+85 %	+66 %
LED VTF 03	+0,5 %	+92 %	+59 %

Tableau 5 : Evolution des paramètres électriques des LEDs TFFC non défaillantes suite au test de robustesse en courant.

b. *Paramètres optiques*

L'évolution du rendement optique du composant VTF 02 est présentée en Figure 22. Elle présente un comportement différent de celui observé sur la structure TFFC. Une très faible évolution du rendement est constatée. Elle est de -1,3 % à 1 A. Le Tableau 6 détaille l'évolution des contributions optiques bleue et jaune. On constate qu'à un courant de 1 A, la puissance optique P_{jaune} a augmenté alors que P_{bleue} a diminué. Deux hypothèses sont donc envisageables : Soit le rendement de conversion des luminophores a augmenté (couplage optique), soit le rendement d'extraction a augmenté. Ces hypothèses seront discutées et développées lors des résultats du test en température.

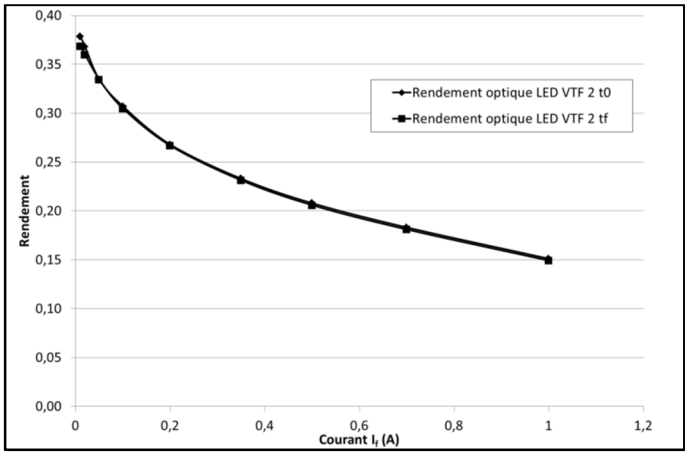


Figure 22 : Evolution du rendement optique en fonction du courant du module VTF 02 avant et après le test de robustesse en courant.

	Rendement optique total	P_{opt}	P_{bleue}	P_{jaune}
LED VTF 02	-1,3 %	-0,4 %	-5,8 %	+1,2 %
LED VTF 03	-1,3 %	+0,1 %	-6,4 %	+1,6 %

Tableau 6 : Evolution des paramètres optiques des LEDs VTF fonctionnelles à 1 A avant et après le test de robustesse en courant.

c. *Paramètres thermiques*

La Figure 24 permet de comparer les caractéristiques transitoires thermiques du module VTF 02 avant et après le test en courant. Les modifications observées sont peu marquées mais tendent vers une dégradation de la résistance thermique de l'assemblage (évaluée à 0,2 $K.W^{-1}$). Ces modifications pourraient être les conséquences de modifications matériaux au niveau collage de la céramique AlN, par identification des contributions thermiques identifiées dans le chapitre 2. Les mêmes tendances ont été observées sur le composant VTF 03, et les évolutions sont donc mineures. L'analyse de défaillance au niveau brasure par radiographie X n'a pas révélé de modification morphologique (Cf. Figure 23), la taille et la géométrie des manques de brasure de puces n'ont pas changé avant et après le test.

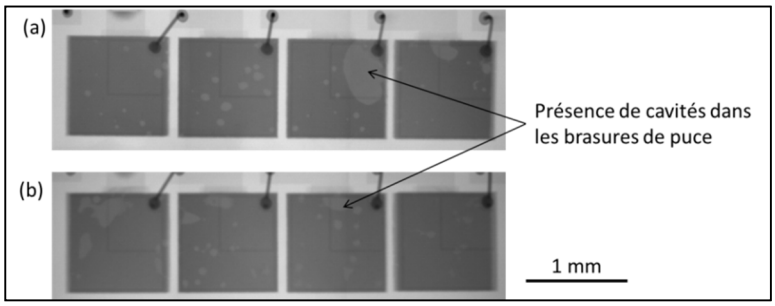


Figure 23 : Comparaison de l'état des brasures de puces de la technologie VTF neuve (a) et ayant subi le test de robustesse en courant (b). Observation par radiographie X.

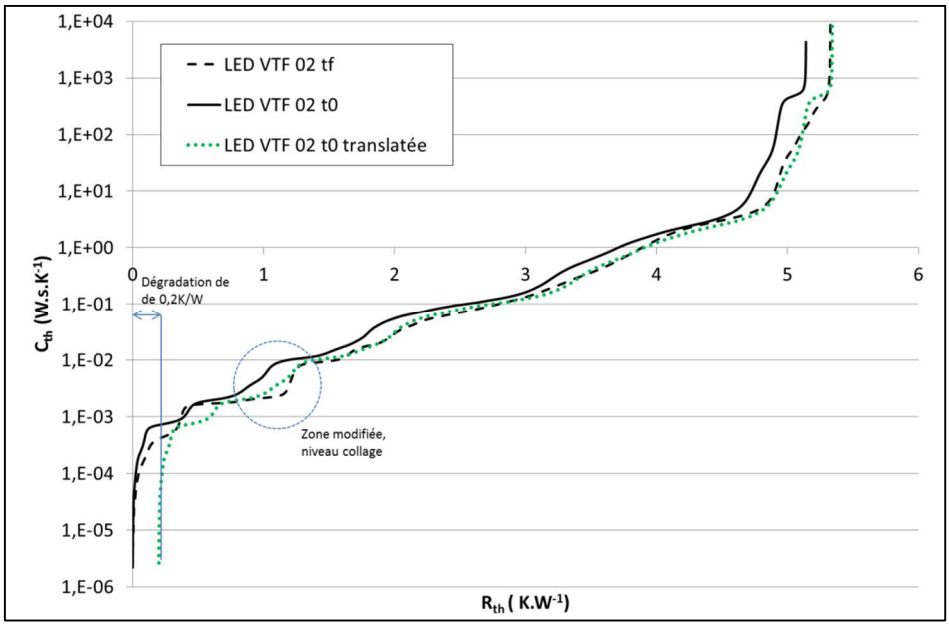


Figure 24 : Evolution de la résistance thermique de la LED VTF 02 avant et après le test de robustesse en courant.

4.3.3 Analyse de défaillance

La Figure 25 permet de visualiser la défaillance en circuit ouvert du module VTF 01. La défaillance est facilement localisable au niveau du câblage filaire. Celui-ci est entré en fusion lors de la défaillance à 2,3 A. L'extrémité du fil présente une forme sphérique, caractéristique d'un passage temporaire à l'état liquide. Le courant maximal admissible pour un câblage filaire de 38 µm de diamètre est de 1,4 A [10]. Nous pouvons conclure que le mécanisme mis en jeu est donc la fusion locale du câblage filaire suite à une densité de courant supérieure à celle admissible par la section du câblage filaire. La Figure 25-a représente la puce défaillante avec la présence du luminophore. La Figure 25-b représente la même puce mais décapsulée, permettant de mettre en évidence une dégradation du contact N sur la puce. Cette dégradation a été caractérisée électriquement et révèle que la puce est en court-circuit de jonction : elle ne présente plus d'effet de seuil (V_{th} diode) mais garde une composante résistive de 0,58 Ω. Cette constatation peut être reliée à la diminution du V_f constatée peu de temps avant la défaillance du module (Figure 15).

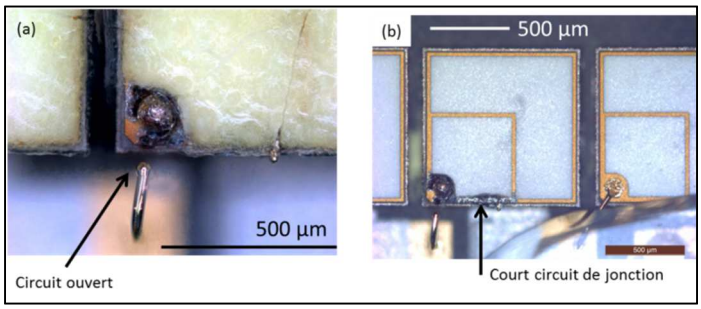


Figure 25 : Visualisation de la défaillance du module VTF 01 lors du test en courant.

La Figure 26 représente un module VTF à la suite du test en courant, en imagerie MEB en électron secondaire, afin de caractériser l'état morphologique de la surface d'un échantillon. On remarque clairement la formation de fissures dans la couche de conversion lumineuse (luminophore dispersé dans le silicone). Provenant très probablement d'une forte sollicitation thermique due à l'auto échauffement des puces. Le test de robustesse en température confirmera clairement ce point. De plus, ces fissures sont localisées dans le coin inférieur gauche de chaque puce, zone de forte densité de courant, donc de puissance et de génération thermique lors du test en courant.

L'analyse MEB des micro-sections effectuées sur le module VTF défaillant n'a pas révélé de modifications majeures de l'intégrité de la brasure des puces. Des analyses comparatives en radiographie à rayons X, ont permis de confirmer cette information. La Figure 23 compare l'état des brasures des puces d'un module neuf et d'un module ayant subi le test de robustesse en courant. Cette figure permet également d'apprécier la qualité des brasures $Au_{80}Sn_{20}$ de cette technologie VTF. La présence de cavités est mise en évidence sur composants neufs.

Des analyses plus fines par MEB ont permis de révéler des modifications importantes du contact P. La migration de Ge dans les couches de report a été clairement mise en évidence par des analyses EDX. La Figure 27 permet de comparer la morphologie du contact P de la structure VTF avant et après le test de robustesse en courant. La phase claire de l'intermétallique est visible sur la Figure 27-b et révèlent une forte concentration d'Au. La phase grise, quant à elle, est riche en Ge. La température moyenne de jonction T_j à défaillance a été estimée à 275°C par le suivi in situ du test. Localement, un auto-échauffement couplé à une forte densité de courant ont pu permettre la migration/diffusion d'éléments métalliques. C'est donc une formation d'intermétallique entre les couches de report de puce (Au et Au_{80}-Sn_{20} principalement) et le substrat d'accueil en Ge. Cette modification du contact P n'a malheureusement pas été détectée par des mesures électriques comparatives. Il est très probable qu'elle ait eu lieu juste avant ou pendant l'ouverture du câblage filaire ou bien que cet intermétallique n'ait aucune influence sur les paramètres électriques.

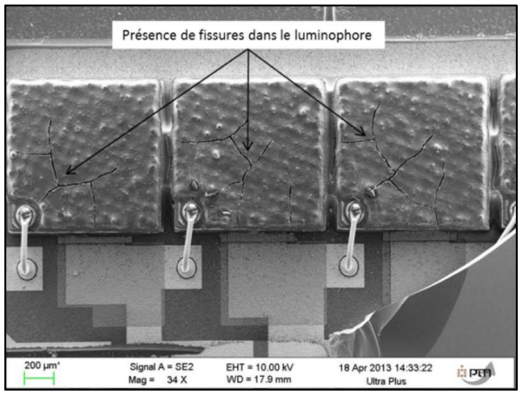


Figure 26 : Image MEB en électrons secondaires d'un module VTF défaillant après le test en courant.

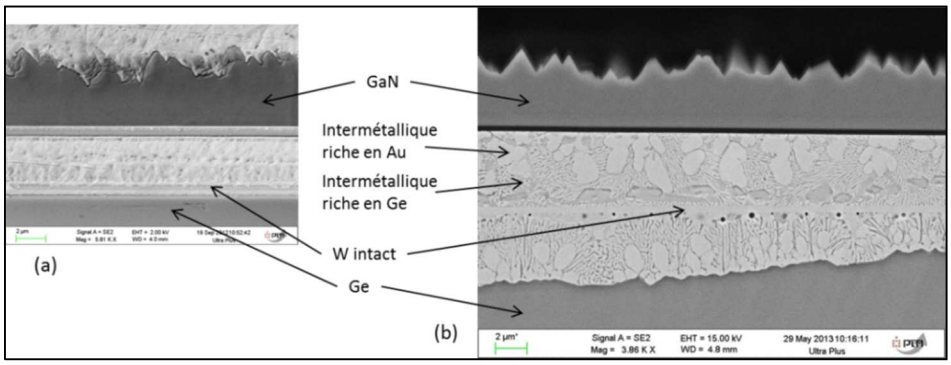


Figure 27 : Analyse MEB en électrons secondaires du contact P de la structure VTF avant et après le test de robustesse en courant.

Nous venons de présenter l'ensemble des résultats de dérives des grandeurs électriques, optiques et thermiques lors du test en courant appliqué à la technologie VTF et l'analyse de défaillance associée aux dérives mises en lumière. A présent, une synthèse de l'ensemble des informations recueillies va maintenant être dressée afin d'établir d'une part une comparaison comportementale avec la technologie TFFC et d'autre part, identifier clairement les défaillances rencontrées comme non représentatives d'une utilisation normale.

4.4 Bilan du test en courant

Le Tableau 7 rassemble l'ensemble des informations électro-optiques et thermiques collectées au cours du test en courant. Le mode de défaillance, circuit ouvert pour les deux structures, est la conséquence d'une fusion d'une partie du circuit électrique :

- Une partie de la puce GaN pour la technologie TFFC.
- Le câblage filaire pour la technologie VTF.

Ce bilan intermédiaire permet de confronter les technologies VTF et TFFC en sur-sollicitation électrique en courant.

		Technologie TFFC	Technologie VTF
	Défaillance	Circuit ouvert	Circuit ouvert
Electrique	Courant à défaillance	3,5 A	2,4 A
	Tendance V_f à défaillance	↗	↘
	Zone de linéarité	1-2,7 A	1-2,1 A
Thermique	Puissance thermique à défaillance	65 W	38 W
	T_j moyenne estimée à défaillance	≈350 °C	≈275 °C
Optique	Evolution de la puissance optique totale	1-1,6 A ↗ 1,6-3,5 A ↘	1-2,4 A↘
	Evolution de la puissance optique bleue	1-2,05 A ↗ 2,05-3,5 A↘	1-1,5 A ↗ 1,5-2,4 A ↘
	Evolution de la puissance optique jaune	1-1,45 A↗ 1,45-3,5 A↘	1-2,4 A↘
	Pente de rendement optique	$-0,094.A^{-1}$	$-0,127.A^{-1}$
	Pente de rendement optique bleu	$-0,021.A^{-1}$	$-0,021.A^{-1}$
	Pente de rendement optique Jaune	$-0,074.A^{-1}$	$-0,102.A^{-1}$
	Sensibilité maximale du ratio Y/B	$-1,31.A^{-1}$	$-1,97.A^{-1}$

Tableau 7 : Bilan de l'évaluation de la robustesse des technologies VTF et TFFC en contraintes échelonnées en courant.

La technologie TFFC apparait comme moins sensible à une sur-sollicitation électrique. Cela est vérifiable sur une majorité des paramètres électro-optiques et thermiques suivis lors du test. On notera une nette différence des courants conduisant à la défaillance de 3,5 et 2,4 A, respectivement obtenus pour les structures TFFC et VTF. Cette différence est très probablement due à la présence d'un câblage filaire dans la structure VTF, lieu de forte densité de courant, siège de la défaillance en sur-sollicitation. La structure TFFC présente, quant à elle, de larges zones de connexions électriques, intrinsèques à sa structure de contacts FC. Un dernier point important à considérer réside dans l'évolution des paramètres optiques. Tandis que l'évolution du rendement optique bleu présente la même décroissance pour les deux technologies, la technologie de luminophore fritté utilisée dans la technologie TFFC montre une perte de rendement moins marquée que la technologie utilisée dans la structure VTF (luminophore dispersé dans un silicone).

Les résultats de l'étude de robustesse en courant ayant été introduits, nous allons appliquer une démarche similaire pour le test de robustesse en température.

5 Test de robustesse en température

Après une description rapide du mode opératoire suivi pour le test en température, les résultats seront présentés par technologies et déclinés en trois parties :

- Le suivi des paramètres *in-situ*.
- L'analyse comparative des caractéristiques électro-optiques et thermiques (avant et après test).
- Les analyses de défaillance des modules.

Un bilan comparatif et synthétique sera finalement dressé.

5.1 Conditions de test

Ce second test de robustesse consiste à solliciter les composants multi-puce VTF et TFFC par paliers de température (T_{plaque}). Après avoir caractérisé les paramètres électro-optiques et thermiques des LEDs (caractérisations à t_0), ces dernières sont montées sur banc de test et placées à la température T_{plaque}=85 °C et I_f= 1 A (point de référence). Trois composants seront testés par référence. Les paliers de température peuvent être de 10, 25 et 35 °C et chaque palier dure 30 minutes afin d'homogénéiser la température des LEDs et de la plaque chauffante. Cette durée de 30 minutes a été définie par le temps nécessaire à la stabilisation de la température $T_{céram,}$ mesuré à 20 minutes.

Ce temps de stabilisation sera facilement observable lors de la présentation des résultats. La procédure d'arrêt des tests est identique à celle retenue pour les tests en courant. Le Tableau 8 suivant synthétise les paramètres du protocole expérimental déployé. Notons que la valeur des paliers de température n'est pas constante. A partir de 220 °C, l'incrémentation a été réduite à 10 °C pour garantir une meilleure résolution dans les résultats.

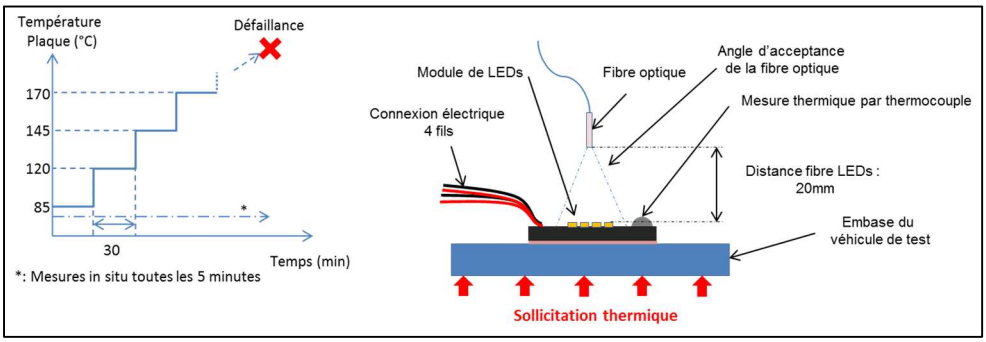


Figure 28 : Protocole d'évaluation de la robustesse en température des modules de LEDs multi-puce.

Valeurs des paliers de température (T_{plaque}) (°C)	85, 120, 145, 170, 195, 220, 230, 240, 250, 260
Durée par palier (minutes)	30
Valeur du courant I_f (A)	1
Nombre de composants testés	3

Tableau 8 : Paramètres du protocole expérimental de test de robustesse en température.

Le test de robustesse en température se déroulera dans les mêmes conditions que le test en courant. Le suivi électrique des modules se traduira par le relevé du V_f. Le suivi optique consiste en l'enregistrement du spectre via une interface par fibre optique et le paramètre thermique sera le suivi de la température du substrat céramique des composants ($T_{céram}$). L'intervalle des mesures est fixé à 5 minutes. Le protocole de suivi des LEDs dans le test en température est résumé en Figure 28.

5.2 Résultats obtenus pour les modules TFFC

Les résultats du test en température appliqué aux modules TFFC sont présentés ci-après. Les résultats basés sur le format de présentation du test en courant, se déclinent en trois parties : les mesures in situ, les mesures comparatives et les analyses de défaillance.

5.2.1 Analyses comportementales *in-situ*

a. Exemples de dérives électriques et thermiques

L'évolution du V_f des modules TFFC au cours du test de robustesse en température est présentée en Figure 29. Nous avons choisi de représenter les résultats en fonction du temps car l'incrément des paliers de température est réduit au cours du test.

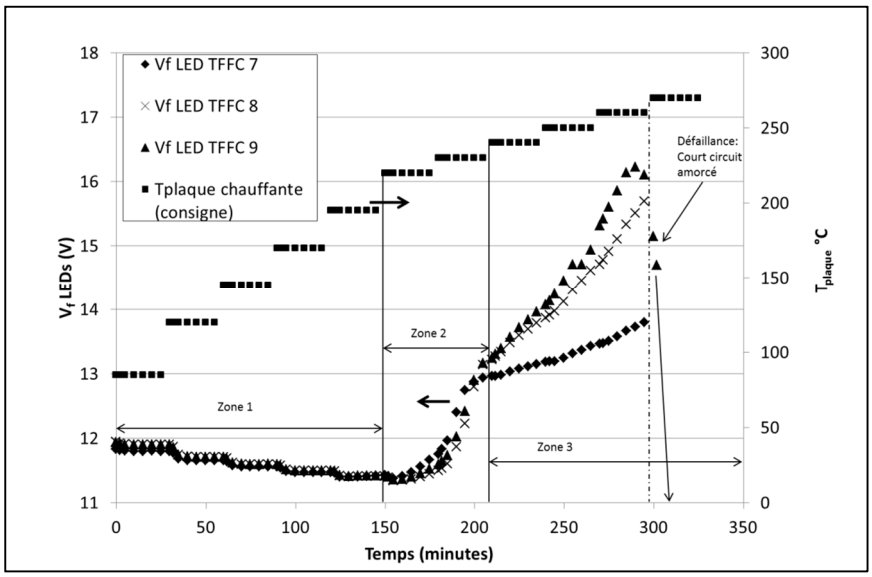


Figure 29 : Suivi électrique du paramètre V_f à I_f= 1A des modules TFFC lors du test de robustesse en température.

Notons tout d'abord que le suivi des V_f des LEDs au cours du temps peut se diviser en trois zones. La zone 1 montre une diminution du V_f des LEDs avec l'augmentation de la température. Ce comportement est relatif à un fonctionnement normal des LEDs. En effet, ce phénomène est lié à la réduction du de la hauteur de barrière quand la température augmente. La zone 2 révèle une brusque augmentation de la tension V_f d'environ + 13 % pour les trois modules sur les paliers 220 et 230 °C. Cette dérive brutale n'est pas liée à un fonctionnement normal des modules (réduction de la hauteur de barrière) et des explications seront proposées ultérieurement en se basant sur les analyses de défaillance. Une partie du circuit électrique de la structure des modules est donc dégradée. La zone 3 met en évidence le même type de dérive de la tension V_f que pour la zone 2 mais l'on peut noter une dispersion plus grande entre les trois LEDs étudiées. La défaillance (court-circuit) est apparue au sein du module TFFC 9, lors de la transition entre les paliers 260 °C et 270 °C (T_{plaque}). On s'intéresse maintenant aux conséquences de cette évolution de la tension V_f sur la puissance thermique engagée dans les modules. On peut alors estimer la température moyenne de jonction des structures TFFC. La Figure 30 permet d'apprécier la répartition des puissances et la valeur moyenne de T_j estimée.

L'enregistrement du spectre optique durant le test permet d'accéder à la puissance optique émise et peut être soustraite à la puissance électrique afin d'obtenir la puissance thermique. En tenant compte de la résistance thermique jonction-puits ($R_{thj\text{-}puits}$) égale à 5 $K.W^{-1}$, on peut ainsi estimer la température moyenne de jonction. La température maximale de jonction est évaluée à 327 °C sur le palier correspondant à la température de plaque chauffante de 260 °C.

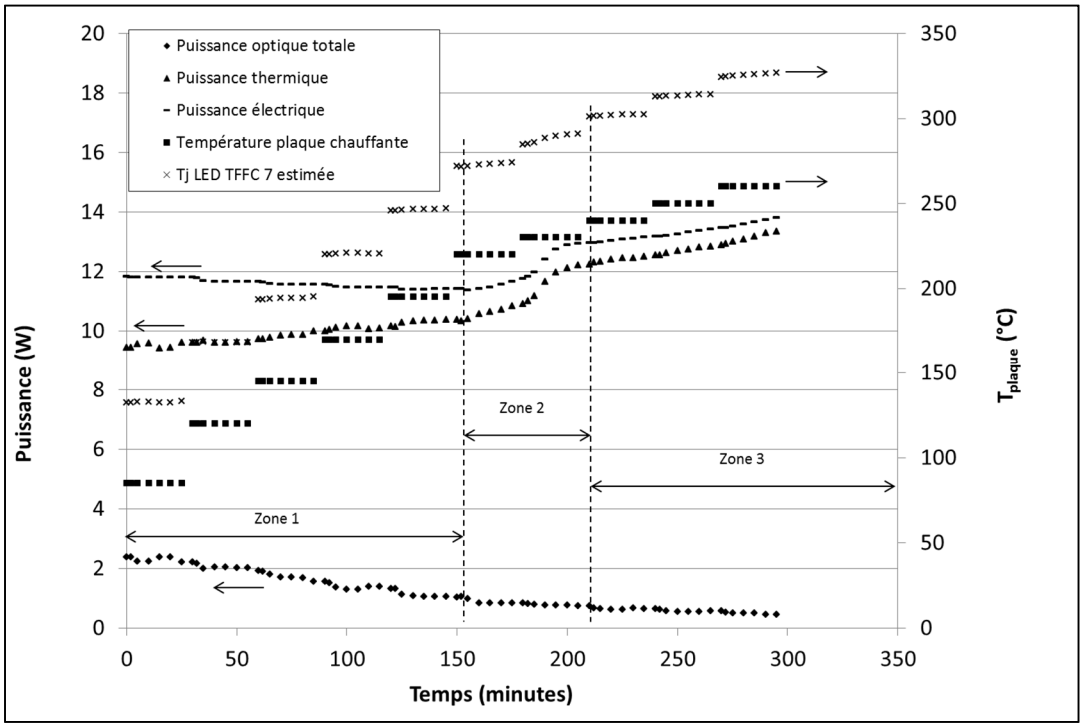


Figure 30 : Répartition des puissances, électrique thermique et optique au cours du test de robustesse de la technologie TFFC, et estimation de la température T_j durant le test ($R_{thj\text{-}puits}$=5 $K.W^{-1}$). Exemple du module TFFC 07.

b. Exemples de dérives optiques

L'évolution du spectre optique du module TFFC en fonction de la température T_{plaque} est présentée en Figure 31. Les spectres de chaque palier sont enregistrés après stabilisation thermique du banc de test (20 minutes). Le suivi du spectre met en évidence la sensibilité du flux optique à la température de jonction de la structure TFFC. A la fois le pic bleu et le pic jaune voient leurs aires diminuer avec

l'augmentation de la température. On notera une dérive du pic bleu (« *red-shift* »), passant de 440 nm (85 °C) à 453 nm (260 °C). Si la résistance thermique $R_{thj\text{-}plaque}$ est considérée constante, il est possible de définir la sensibilité de cette dérive du pic bleu (« *detuning* ») à la température de jonction, illustrée en Figure 32. Elle est évaluée à 0,0492 nm.K^{-1}, et calculée entre les paliers de température T_{plaque}= 85°C et 195°C afin de ne pas engager de dérives ou comportements anormaux au sein des composants. Cette dérive peut être confrontée à l'influence théorique de la température sur E_g, ce qui entraîne une dérive sur λ. $E_g(T)$ est définie par la relation de VARSHINI :

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{\beta - T} \qquad \textbf{Équation 2}$$

avec $E_g(0)$ le *band gap* à 0 K, α une constante empirique (eV.K^{-1}) et β une constante associée à la température de Debye (K).

Pour la technologie TFFC, Les mesures donnent $E_g(0)$= 2,85 eV, α= 1,75.10^{-4}eV.K^{-1} et β =1100 K. La littérature rapporte des valeurs différentes sur le GaN : α= 0,84.10^{-3}eV.K^{-1} et β =789 K [11]. Cette différence peut s'expliquer par l'influence de la couche de conversion optique. Pour l'étude, nous considérerons cette dérive linéaire sur la gamme de températures exploitée.

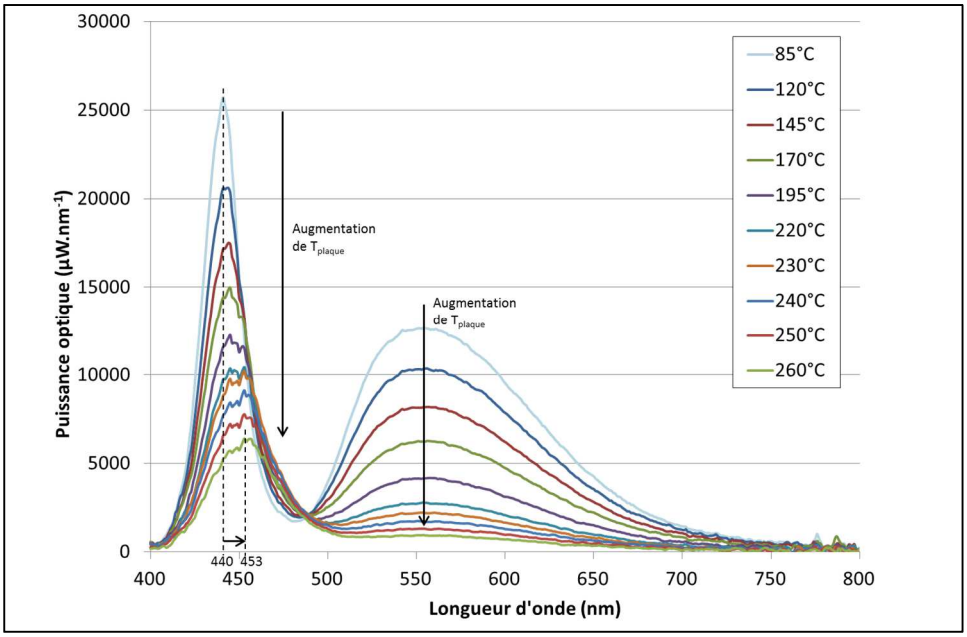


Figure 31 : Représentation de l'évolution du spectre de la technologie TFFC (LED 07) au cours du test en température.

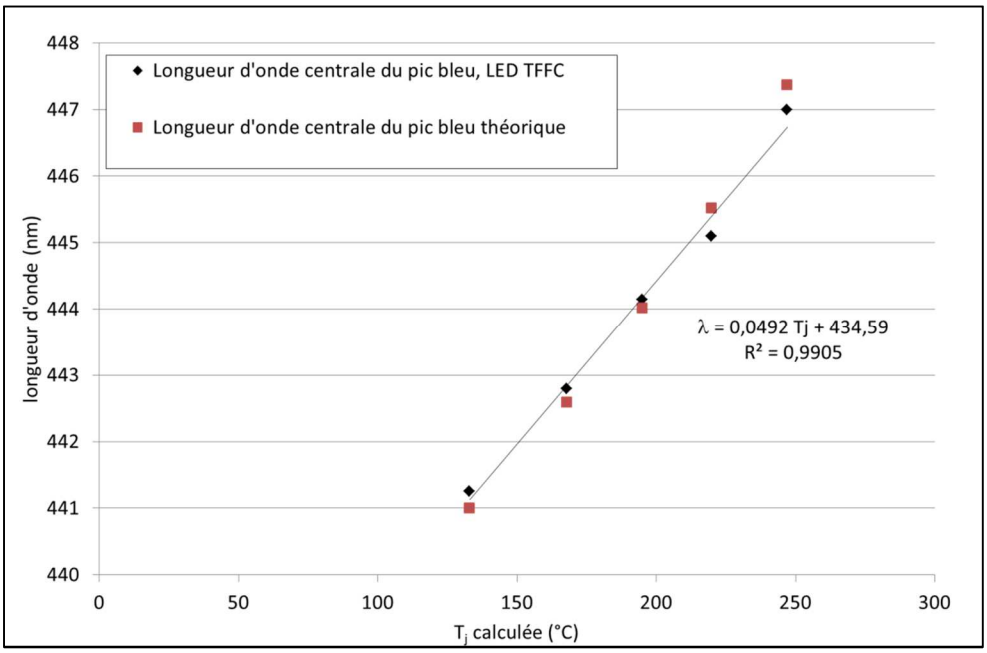


Figure 32 : Evaluation de la sensibilité de dérive du pic bleu en fonction de la température de jonction. Structure TFFC (LED 7).

Si l'on décompose maintenant les différentes contributions optiques P_{opt}, P_{bleue} et P_{jaune} au cours du test, les évolutions des rendements sont représentées en Figure 33. On constate une diminution du rendement optique quand la température T_{plaque} augmente. La perte de rendement optique total affiche une pente de $-8{,}8.10^{-4}$ °C^{-1}, principalement gouvernée par le rendement jaune à hauteur de -8.10^{-4}.°C^{-1}. Le rendement bleu quant à lui affiche une décroissance de $-1{,}45.10^{-5}$°C^{-1}. La perte de puissance optique d'une LED est régie par l'équation suivante **[12]**:

$$\Theta = \Theta_{T_0} e^{\left[\frac{T-T_0}{T_1}\right]} \qquad \textbf{Équation 3}$$

avec T_0, la température de référence, et T_1, température caractéristique du matériau, typiquement de 1600 K pour une jonction typique InGaN/GaN [13].

Si l'on se base sur les résultats présentés en Figure 33, on peut évaluer la température caractéristique de la structure TFFC à T_{TFFC}=590 K. Cette température caractéristique est dépendante à la fois de la jonction (matériaux, géométrie) mais également de la stratégie de packaging. En effet, le flux optique bleu de la puce doit traverser le luminophore pour atteindre l'espace libre. Par conséquent cette valeur de température caractéristique calculée sur le pic bleu peut être influencée par le luminophore qui évolue également en température (conversion et transmission). Cependant cette valeur permet d'établir un point de comparaison entre les deux technologies étudiées.

Dans cette étude, le ratio Y/B est un indicateur de maintien de point de couleur au cours des tests envisagés. En traçant son évolution au cours du test en température, il est possible de caractériser la stabilité du point de couleur de la technologie TFFC face à une sur-sollicitation thermique. L'évolution du ratio Y/B en fonction de T_{plaque} est présentée en Figure 34. La décroissance maximale du ratio Y/B est évaluée à $-0{,}0113.°C^{-1}$ pour la technologie TFFC.

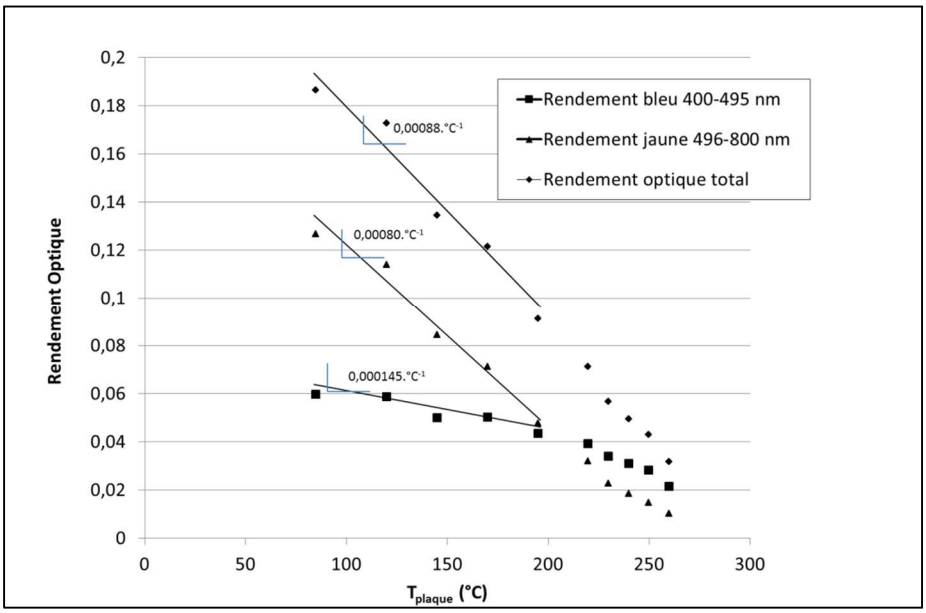


Figure 33 : Evolution des rendements optiques (total, bleu et jaune) en fonction de T_{plaque} pour la structure TFFC (LED 07).

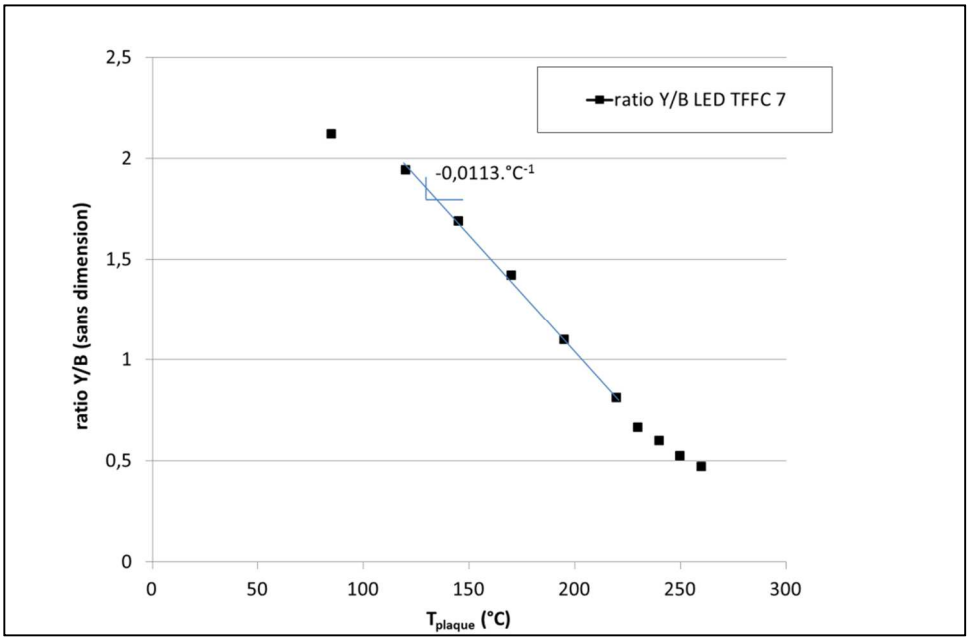


Figure 34 : Evolution du ratio Y/B au cours du test en température pour la technologie TFFC (LED 7).

L'ensemble des informations collectées durant le test en température appliqué à la structure TFFC vient d'être présenté et nous allons nous attacher, à présent, à analyser les mesures comparatives sur modules fonctionnels (avant et après le test).

5.2.2 Analyses comparatives des modules fonctionnels

Pour chaque partie, le composant TFFC 08 a été choisi afin d'analyser les dérives paramétriques enregistrées. Les dérives enregistrées sur le second composant fonctionnel TFFC 07 seront ensuite comparées en fin de paragraphe.

a. *Paramètres électriques*

L'évolution de la caractéristique I(V) du module TFFC 08 avant et après le test de robustesse en température est présentée en Figure 35. L'ensemble des zones de l'I(V) sont modifiées suite au test de robustesse. La zone 1, relative aux fuites, permet d'extraire une valeur de la résistance R_p. Cette valeur est divisée par un rapport 100 (de 8,72 GΩ à t_0 à 68,6 MΩ à t_f). Une hypothèse pour cette modification importante peut être une dégradation des bords de puce et/ou des vias (périphérique ou centraux) [14]. La zone 2 montre une augmentation du niveau de courant, en partie due à la diminution du paramètre R_p, mais également à l'augmentation du courant par effet tunnel du à la dégradation de la barrière de potentiel Schottky [15]. La valeur du courant à +6 V a augmenté d'une décade et demie. La dernière zone dégradée est la zone 4, relative au comportement à forts niveaux d'injection. Des modifications de la résistance R_s et de la tension de seuil V_{th} sont enregistrées, une partie du chemin électrique est dégradé. La résistance R_s passe de 1,32 Ω à 2,99 Ω. Des délaminations au niveau des contacts pourraient également aboutir à une augmentation de la résistance R_s du composant. Un décalage de 20% de la tension de seuil est observé (de 11,21 à 13,9 V). Ces deux phénomènes aboutissent à une augmentation de 4,3 V (+ 34 %) du V_f à 1 A. Cela pourrait entraîner à la fois une augmentation du R_s mais également modifier la barrière de potentiel à l'interface métal / semi-conducteur par l'évolution du dopage des couches de contact, responsable du décalage de tension V_{th} [16]. Classiquement en microélectronique, les barrières de potentiel de type Schottky ont tendance à diminuer dans le temps [15]. Ici, une formation d'intermétallique Au_X-Al_Y au niveau du contact N du GaN pourrait changer la nature du matériau de contact initialement en Al. Le travail de sortie de l'Al est de 4,33 eV, contre 5,10 eV pour l'Au ce qui va dans le sens d'une augmentation de la barrière de potentiel si des atomes d'Au viennent en contact avec le semi-conducteur lors de la création de cet intermétallique. Un deuxième phénomène (délaminations au niveau contact) peut également aboutir à une réduction de la surface de contact et donc une augmentation du R_s du composant.

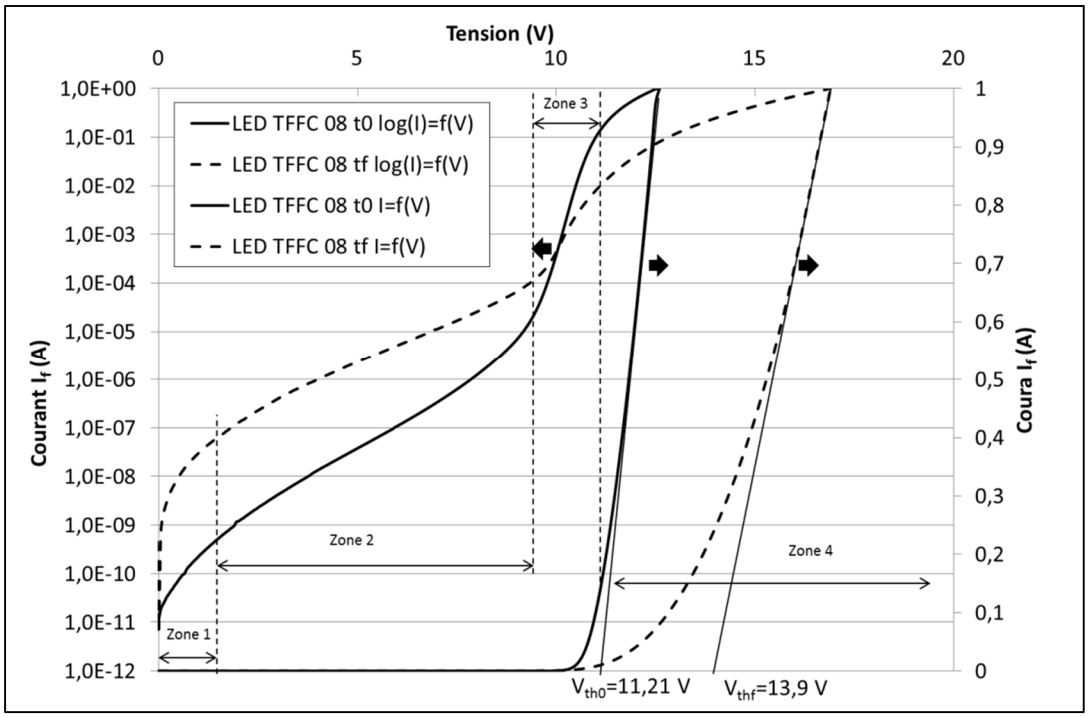


Figure 35 : Caractéristiques I(V) du module TFFC 08 avant et après le test de robustesse en température.

Le Tableau 9 rassemble l'évolution des paramètres électriques enregistrés lors du test en température sur les deux composants TFFC fonctionnels (composants 07 et 08). On peut noter des tendances similaires sur l'autre composant ce qui permet de confirmer les évolutions constatées pour la technologie TFFC.

	Paramètre R_p	Paramètre R_s	V_{th}	Courant à +6V
LED TFFC 07	divisé par 100	+95 %	+16 %	multiplié par 10
LED TFFC 08	divisé par 130	+126 %	+24 %	multiplié par 50

Tableau 9 : Evolution des paramètres électriques des LEDs TFFC fonctionnelles avant et après le test de robustesse en température.

b. Paramètres optiques

Les paramètres optiques des modules LEDs sont les puissances optiques (totale, bleu et jaune) ainsi que le rendement optique du composant. L'analyse est comparative entre les valeurs mesurées avant et après le test en température. La Figure 36 décrit l'évolution du rendement optique du module TFFC 07. Une diminution de 44 % sur le rendement optique global est observée à 1 A et est présente sur toute la gamme de courant. D'autre part, la position du maximum de rendement n'est pas modifiée (30 mA), l'augmentation du courant de fuite n'est donc pas visible optiquement. Cette diminution de rendement optique est en cohérence avec les mesures comparatives électriques effectuées, à savoir une augmentation de la tension V_f aux forts niveaux d'injection (+34 % à 1 A). Si la baisse du rendement optique $\eta=P_{opt}/P_{élec}$ constatée était uniquement due à la dérive du V_f, on aurait dû constater une baisse équivalente, par l'augmentation de puissance $P_{élec}$. La perte de rendement optique constatée de 44 % intègre donc une dégradation supplémentaire. La dérive du paramètre V_f de +34 % entraîne une augmentation de la différence de température entre T_j et T_{plaque} mais n'est pas suffisante pour expliquer cette différence (voir partie test *in-situ*). Le fonctionnement optique du composant a donc subi des modifications, la puissance P_{opt} a diminué. Deux hypothèses sont avancées :

- L'émission lumineuse est dégradée (couches actives).
- Les caractéristiques du trajet optique sont modifiées (dégradation du luminophore par exemple).

Le Tableau 10 permet d'apprécier les évolutions des caractéristiques optiques dues au test de robustesse en température sur les composants TFFC 07 et 08. Les évolutions sont cohérentes entre les deux modules fonctionnels.

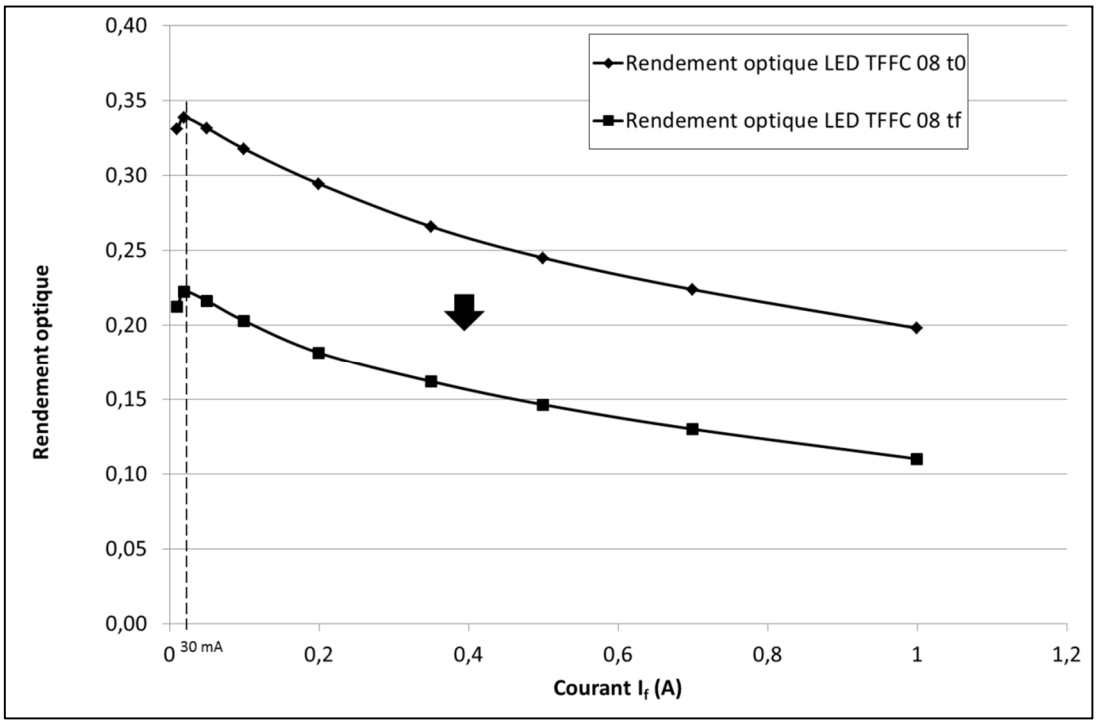


Figure 36 : Evolution du rendement optique en fonction du courant du module TFFC 08 avant et après le test de robustesse en température.

	Rendement optique total	P_{opt}	P_{bleu}	P_{jaune}
LED TFFC 07	-23%	-8.9 %	-8 %	-10 %
LED TFFC 08	-44 %	-23 %	-21 %	-25 %

Tableau 10 : Evolution des paramètres optiques des LEDs TFFC fonctionnelles à 1A avant et après le test de robustesse en température.

c. Paramètres thermiques

La Figure 37 présente les tracés $R_{th}(C_{th})$ du module TFFC 08 avant et après le test de robustesse en température. On note tout d'abord une augmentation de la valeur du puits thermique de 0,5 $K.W^{-1}$. Si l'on affine la comparaison par une translation de la caractéristique initiale du module, on met en évidence une modification thermique des premiers niveaux du composant (niveau puce et/ou fixation de puces). On constate une dégradation de la résistance thermique du niveau puce, évaluée à 0,35 $K.W^{-1}$. Ce phénomène peut s'expliquer par l'hypothèse d'une dégradation (décohésion) des interfaces au niveau puce, comme l'assemblage FC ou bien la métallisation des puces. Le composant TFFC 07, second module fonctionnel à la suite du test, présente les mêmes évolutions, à savoir une dégradation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de 0,3 $K.W^{-1}$, présentée dans le Tableau 11.

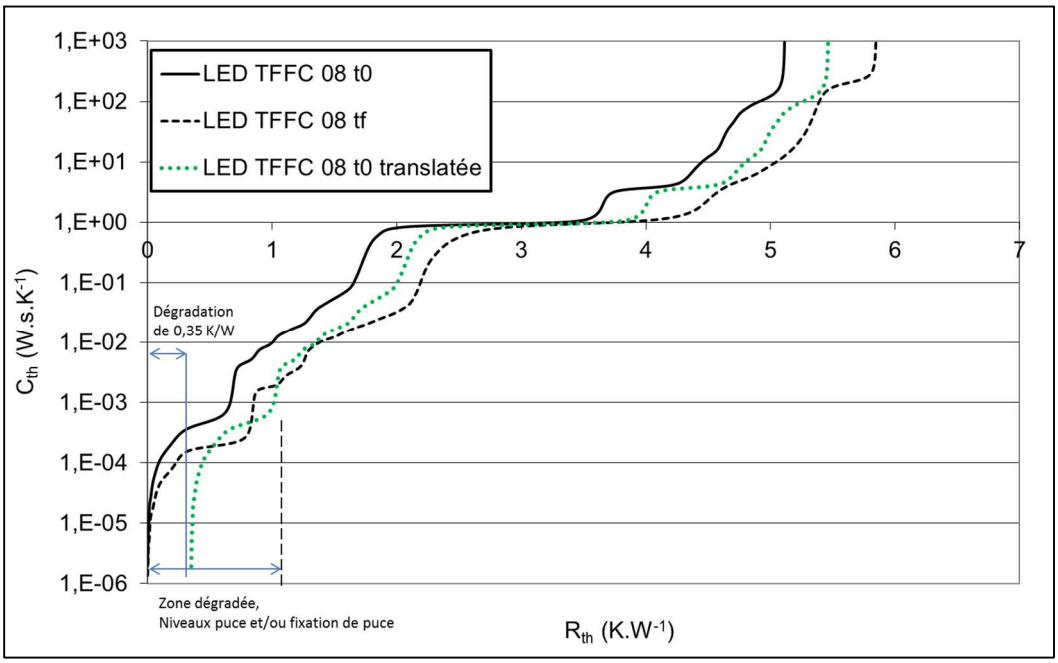


Figure 37 : Evolution de la résistance thermique de la LED TFFC 08 avant et après le test de robustesse en température.

	$R_{th\ j\text{-}plaque}$	$R_{th\ composant}$
LED TFFC 07	+14 %	+38 %
LED TFFC 08	+16 %	+30 %

Tableau 11 : Evolution des paramètres thermiques des LEDs TFFC fonctionnelles avant et après le test de robustesse en température.

5.2.3 Analyses de défaillance

L'observation visuelle des modules TFFC défaillants permet de pré localiser la défaillance. La Figure 38 permet d'apprécier les conséquences du test de robustesse en température sur la structure TFFC étudiée. L'observation du module non décapsulé (Figure 38 -a) révèle de nombreuses fissures dans le silicone d'encapsulation des puces. Une analyse par thermo-gravimétrie de ce matériau neuf a révélé une perte de masse de 1 % à une température de 234 °C. Cette perte de masse corrèle donc la présence de fissures dans le matériau compte tenu des températures imposées lors du test. Le résultat de l'analyse est présenté en Figure 39. D'autre part, des études menées sur le vieillissement physique des silicones réticulés ont mis en évidence des modifications structurales [17].

- Un vieillissement thermique 8000 h à 100 °C a montré l'augmentation de A 70 à A 88 sur l'échelle de dureté Shore, étant la conséquence d'une post-réticulation du réseau 3D du matériau.
- Vieillissement sous UV, 8000 h : Augmentation de la dureté Shore de A 70 à A 84, également liée à la post-réticulation du réseau 3D du matériau.

Ces fissures sont donc très probablement la conséquence d'une dégradation thermique couplée à une rigidification du matériau. L'image d'une puce décapsulée est présentée en Figure 38-b. Elle met en évidence un noircissement prononcé des vias de la structure ainsi que de nombreuses fissures dans le GaN, reliant les vias entre eux. L'épaisseur de la puce étant réduite au niveau des vias à 5 µm contre 10 µm pour le reste de la structure, les vias apparaissent comme des points de faiblesse mécanique de l'assemblage. De plus, le fort noircissement des vias est probablement dû à une formation d'intermétallique généralisée qui peut fortement rigidifier les vias et les rendre plus fragiles.

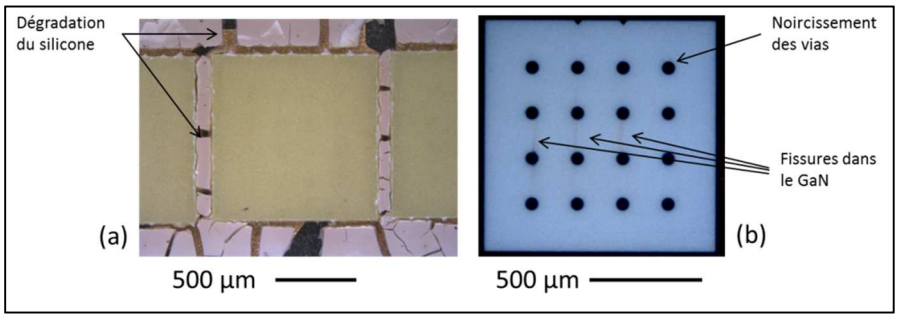


Figure 38 : Visualisation du module TFFC défaillant lors du test de robustesse en température.

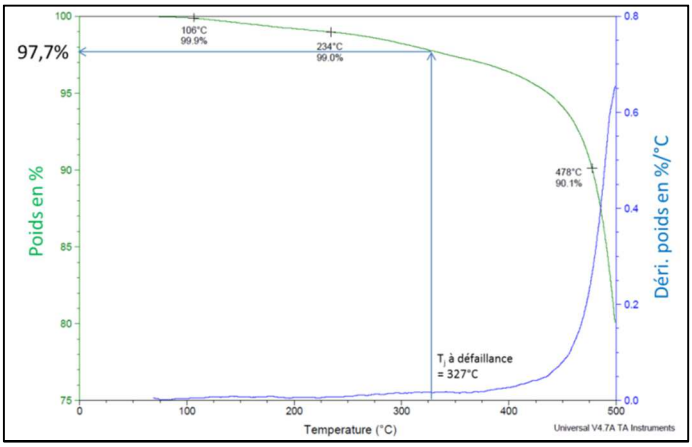


Figure 39 : Analyse par thermo-gravimétrie (ATG) du matériau silicone d'encapsulation de puces TFFC. Vitesse de chauffe 10 °C.min^{-1}.

Le module TFFC 09 ayant perdu la fonctionnalité d'une puce en tant que LED, l'analyse de ses paramètres électriques permet de tirer des conclusions quant à la nature de court-circuit (puce, jonction seulement). Si l'on réalise un court-circuit franc d'une puce sur un module de quatre puces en série, on s'attend à retrouver ¾ des caractéristiques électriques en régime de forte injection. Concernant la tension de seuil V_{th}, initialement à 11,2 V, ce raisonnement fonctionne puisque l'on trouve 8,4 V en ayant perdu une puce (3/4*11,2=8,4 V). Cependant, pour le paramètre R_s, on passe de 1,37 Ω à 1,36 Ω en ayant perdu une puce. Le raisonnement ne fonctionne donc pas pour le paramètre R_s, c'est pourquoi la dénomination « court-circuit de jonction » est utilisée. La résistance d'accès reste quasiment inchangée lors d'une perte d'une puce, comme illustrée en Figure 40.

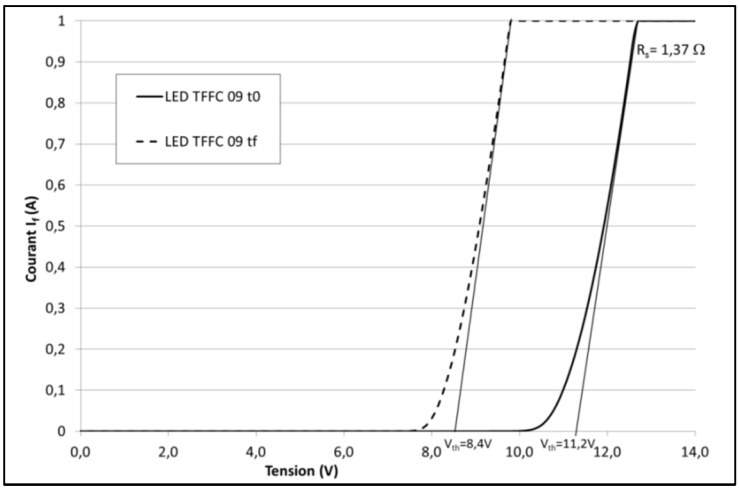


Figure 40 : Comparaison des paramètres électriques du module TFFC 09 avant et après défaillance lors du test en température.

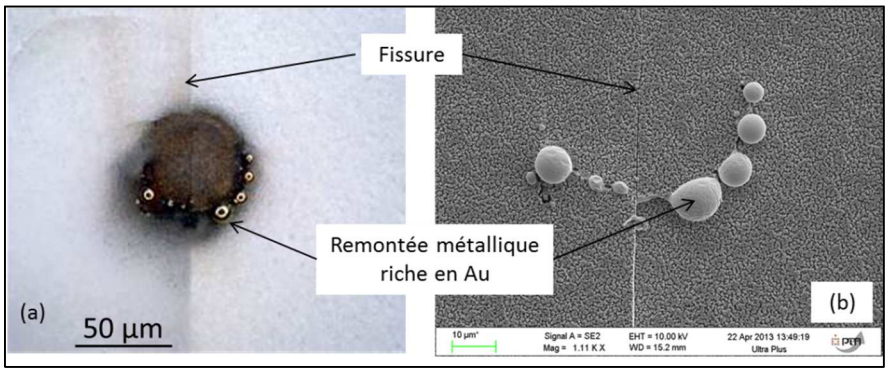


Figure 41 : Visualisation du via endommagé de la structure TFFC, responsable du court-circuit de jonction. (a), image optique, et (b), image MEB en électrons secondaires.

La défaillance du module a été caractérisée au niveau d'un via ayant subi de nombreuses fissures. L'image du via endommagé est présentée en Figure 41. La présence de ces fissures au niveau du via permet une remontée partielle du ou des matériaux de contact lors de la défaillance. Ce via a été caractérisé par thermographie infra-rouge comme étant un des points chauds de la puce en fonctionnement. L'analyse MEB et EDX de cette même zone a permis de caractériser les remontées métalliques, riche en Au. La zone de remontée métallique suit parfaitement le contour du via, ce qui conforte l'hypothèse d'une zone de faiblesse de la structure.

L'observation de la structure TFFC défaillante est présentée en Figure 42. L'analyse MEB met clairement en évidence la formation d'intermétallique sur la pleine surface des vias et plus généralement de la structure. La caractérisation EDX de cet alliage a confirmé la présence d'Au et d'Al. Cette constatation est cohérente avec un apport thermique sur l'ensemble du composant. En lien avec la défaillance caractérisée lors du test en courant, l'hypothèse d'une formation d'intermétallique thermiquement activée semble se confirmer. Des travaux effectués sur cette même structure TFFC ont permis d'identifier cet intermétallique par EDX sur lame mince afin de travailler en quantitatif. L'intermétallique identifié est le composé Au_4Al [16].

Les dérives électriques observées lors des analyses comparatives ont montrées d'une part une modification de V_{th} et d'autre part une modification de la résistance R_s. La Figure 43 présente différentes micro-sections effectuées et met en évidence des délaminations entre les couches actives et le réflecteur en argent.

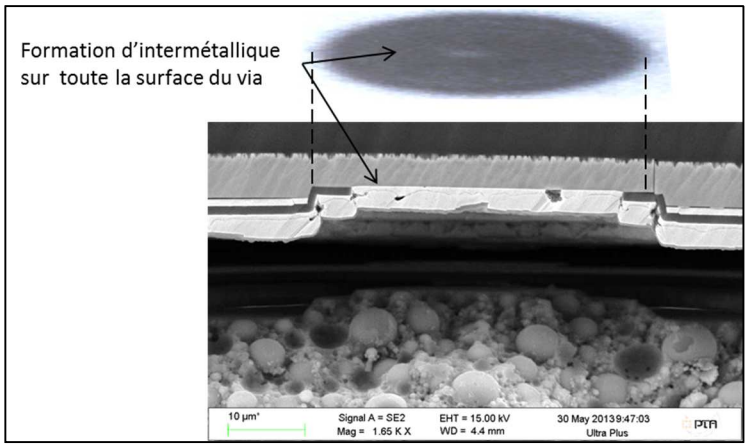


Figure 42 : Observation MEB en électrons secondaires, d'un via de la structure TFFC après le test de robustesse en température.

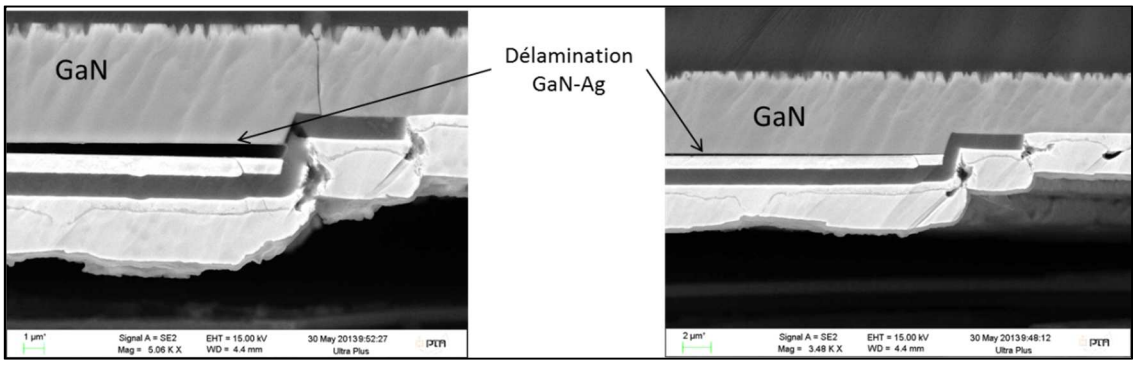


Figure 43 : Observation MEB en électrons secondaires de délaminations dans la structure TFFC suite au test de robustesse en température.

Nous n'écartons pas le fait que ces délaminations puissent être initiées lors de la préparation d'échantillon. Néanmoins, cela met tout de même en lumière une faiblesse mécanique à l'interface GaN-Ag.

Nous venons de présenter l'ensemble des résultats de dérives des grandeurs électriques, optiques et thermiques lors du test en courant appliqué à la technologie TFFC et l'analyse de défaillance associée aux dérives mises en lumière. A présent, nous allons nous attacher à décrire les résultats obtenus sur la technologie VTF.

5.3 Résultats obtenus pour les modules VTF

5.3.1 Analyses comportementales *in-situ*

a. Exemples de dérives électriques et thermiques

L'évolution du V_f des trois modules VTF au cours du test de robustesse en température est présentée en Figure 44.

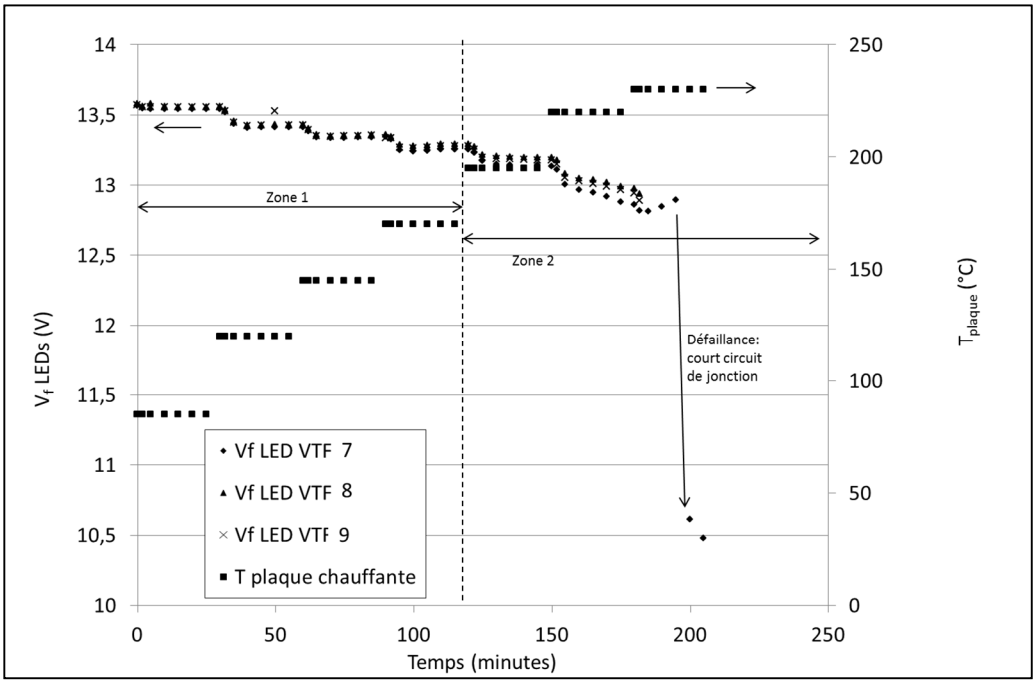


Figure 44 : Suivi électrique de la tension V_f à If= 1A lors du test de robustesse des modules VTF en température.

L'évolution du paramètre V_f des trois composants VTF permet de dégager deux zones : d'une part la « zone 1 » correspondant au fonctionnement normal (réduction du *band gap* en température), et la « zone 2 », qui montre une diminution de V_f plus marquée. Le paramètre V_f ne se stabilise plus sur les paliers thermiques, il continu de décroître. Un mécanisme de dégradation est donc activé à partir du palier à 195°C (T_{plaque}) et amorce une dérive vers un court-circuit d'une ou plusieurs puces. La défaillance est enregistrée au sein de la LED VTF 7, lors du passage au palier à 230°C (T_{plaque}). Une brusque chute de V_f de 18,6 % (jusqu'à 10,5 V) est enregistrée. Cette défaillance sera clairement associée à la perte d'une puce (court-circuit de jonction) lors des analyses de défaillance. Grâce à l'extraction et au couplage des paramètres électro-optiques avec la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de 5,5 $K.W^{-1}$ (création des lots représentatifs, chapitre 2), on peut donc dissocier les puissances électrique, thermique et optique et ainsi estimer la valeur moyenne de température T_j au cours du test en température. La Figure 45 permet d'apprécier la répartition des puissances et la valeur moyenne de T_j. L'évolution de la puissance électrique engagée dans le composant montre une décroissance, liée directement à la diminution de V_f avec l'augmentation de la température (facteur K). Concernant les puissances optique et thermique, la part de puissance optique au début du test (environ 2,3 W) diminue au cours du test par diminution du rendement optique du composant pour atteindre 0,4 W sur le palier à 230 °C. Cette perte de puissance optique est directement convertie en puissance thermique et peut traduire une augmentation des fuites électriques dans les puces. L'estimation de la température moyenne de jonction à défaillance est de 297 °C. Les deux derniers points du graphique étant non représentatifs car une puce est en court-circuit de jonction.

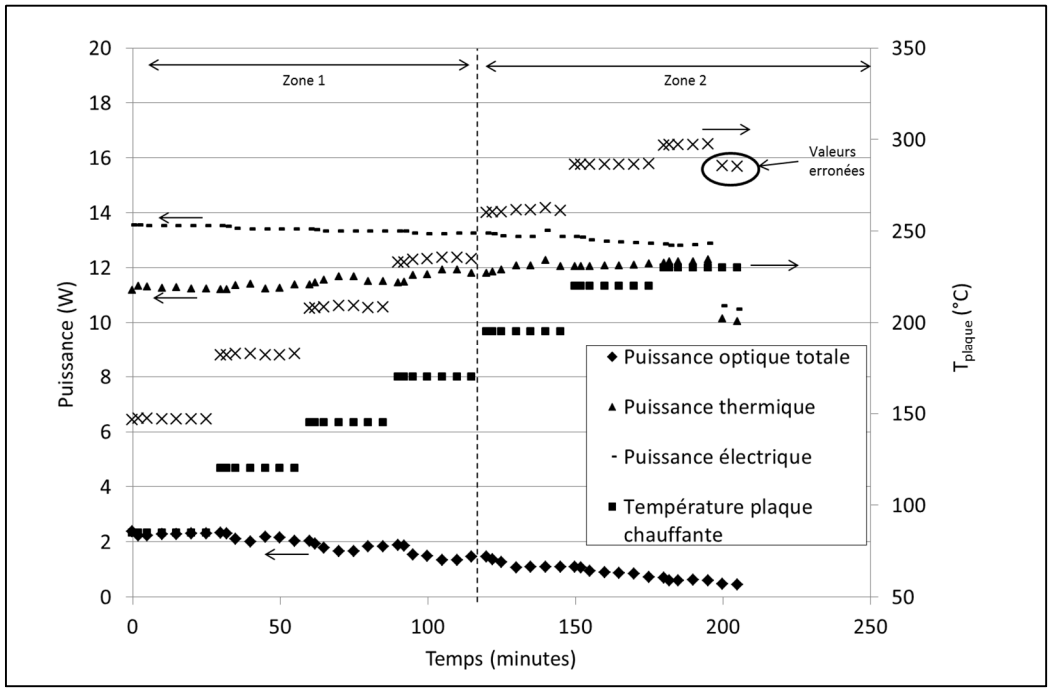


Figure 45 : Répartition des puissances électrique, thermique et optique au cours du test de robustesse de la technologie VTF, et estimation de la température T_j durant le test ($R_{thj\text{-}puits}$=5,5 $K.W^{-1}$). Exemple du module VTF 07.

b. Exemple de dérives optiques

L'évolution du spectre optique du module VTF en fonction de la température T_{plaque} est présentée en Figure 46. Les spectres de chaque palier sont enregistrés après stabilisation thermique du banc de test (20 minutes). Le suivi du spectre met en évidence la sensibilité du flux optique à la température de jonction de la structure VTF. A la fois le pic bleu et le pic jaune voient leurs hauteurs de pics diminuer avec l'augmentation de la température. On notera une dérive du pic bleu, passant de 448 nm (85 °C) à 457 nm (230 °C). Si la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ est considérée constante, il est

possible de caractériser la dérive de la longueur d'onde centrale du pic bleu en température (Figure 47). Elle est évaluée à 0,078 nm.K^{-1}, et calculée entre les paliers 85 et 195 °C (T_{plaque}) afin de rester comparable avec la technologie TFFC, et sans rentrer dans un domaine >195 °C (T_{plaque}), qui entraine des dérives et comportements anormaux. Cette dérive peut être confrontée à l'influence théorique de la température sur E_g, ce qui entraine une dérive sur λ. $E_g(T)$ est définie par la relation de VARSHINI définie précédemment (équation 2). Pour la technologie VTF, Les mesures donnent $E_g(0)$= 2,79 eV, α= 3.10^{-3}eV.K^{-1} et β =3000 K. La littérature rapporte des valeurs différentes sur le GaN : α= 0,84 meV.K^{-1} et β =789 K [11]. Ces différences peuvent provenir de l'influence de la couche de conversion optique, constituée de luminophores dispersés dans un silicone. Pour l'étude, nous considérerons cette dérive linéaire sur la gamme de température parcourue.

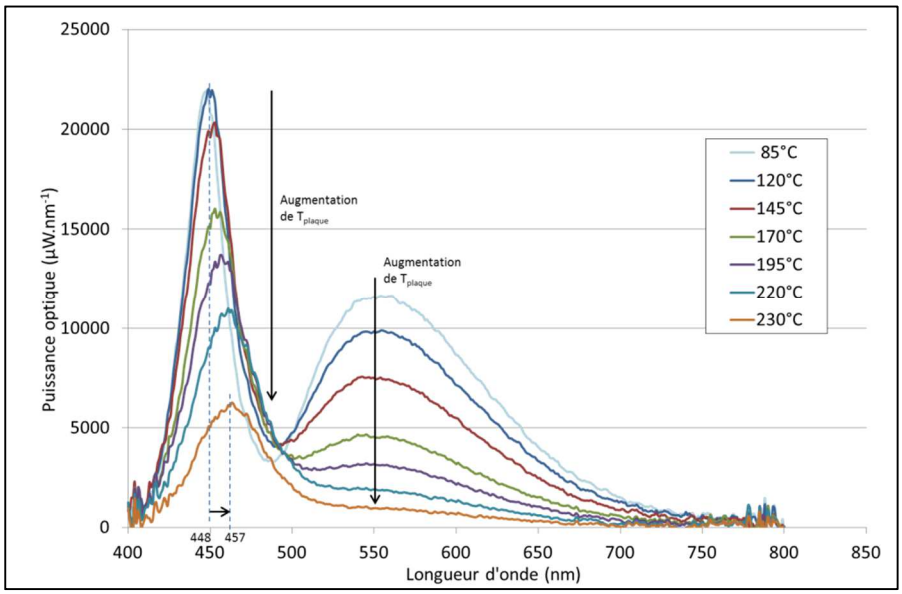


Figure 46 : Représentation de l'évolution du spectre de la technologie TFFC (LED 07) au cours du test en température.

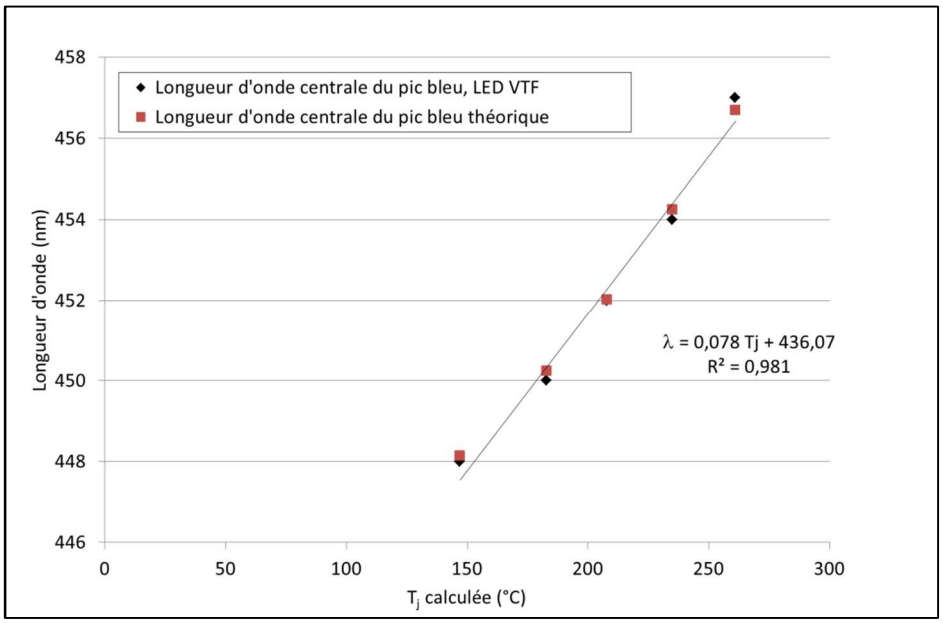


Figure 47 : Evaluation de la sensibilité de dérive du pic bleu en fonction de la température de jonction. Structure VTF (LED 7).

Les évolutions des rendements sont représentées en Figure 48. Si l'on décompose les différentes puissances optiques totale, bleue, et jaune au cours du test, on remarque un comportement atypique de la contribution bleue.. La tendance à la diminution est constatée pour le rendement optique total et jaune, les pertes de rendement sont respectivement de $-8{,}4.10^{-4}$ °C^{-1} et $-7{,}5.10^{-4}$ °C^{-1}. Cependant, pour le rendement optique bleu, une augmentation est constatée jusqu'à 145 °C (T_{plaque}) puis une diminution. L'augmentation du rendement de bleu (émission mère résiduelle) va à l'encontre de l'influence théorique de la thermique sur l'efficacité d'une LED (équation 3). Il n'est pas possible de définir une température caractéristique comme dans le cas de la technologie TFFC. Par conséquent, le luminophore dispersé dans le silicone a une influence très marquée sur le spectre optique en sortie de composant. L'exemple du palier à 145 °C est détaillé en Figure 49. On regarde précisément l'évolution des rendements bleu et jaune sur les paliers à 145 et 170 °C (T_{plaque}). On constate dans un premier temps une baisse des rendements (de 0 à 10 minutes) puis, dans un second temps, une augmentation à la fin du palier (30 minutes). La première phase peut s'expliquer par la thermalisation du composant en début de palier. La seconde phase (augmentation des rendements) est plus délicate à justifier. Nous verrons grâce aux analyses de défaillance que la couche de luminophore dispersé dans le silicone subit des contraintes thermiques telles que de nombreuses fissures apparaissent en son sein. Les hypothèses sont les suivantes :

- la formation de fissures dans l'épaisseur du luminophore permet une extraction directe des photons bleus incidents vers l'espace libre. L'absorption dans le luminophore est donc réduite et le nombre de photons bleus extraits directement de la puce augmente avec la propagation des fissures **[5]**.

- La stabilisation du silicone d'encapsulation (fin de réticulation) peut améliorer le couplage optique entre le GaN et la couche de conversion. Ce phénomène a été constaté sur des LEDs encapsulées en huile silicone (système non réticulé). Le vieillissement en température entraine une réticulation partielle de l'encapsulant [15] [18] [19].

- Il est possible que l'indice optique du silicone évolue permettant un meilleur couplage optique puce/couche de conversion.

- Concernant l'augmentation de rendement jaune, l'apparition de fissures peut représenter une texturation artificielle de la couche de luminophore, permettant d'augmenter l'extraction des photons jaunes. Des travaux de texturation de luminophores ont montré une augmentation du rendement d'extraction jusqu'à 5 % **[20]**. Ce même phénomène de texturation pourrait être mis en jeu avec cette dégradation de la couche de luminophores (fissures).

Le ratio Y/B de la technologie VTF est tracé en Figure 50. Son évolution au cours du test en température permet de caractériser la stabilité du point de couleur de la technologie VTF. La sensibilité maximale du ratio Y/B est évaluée à $-0{,}0128.°C^{-1}$ pour la technologie VTF.

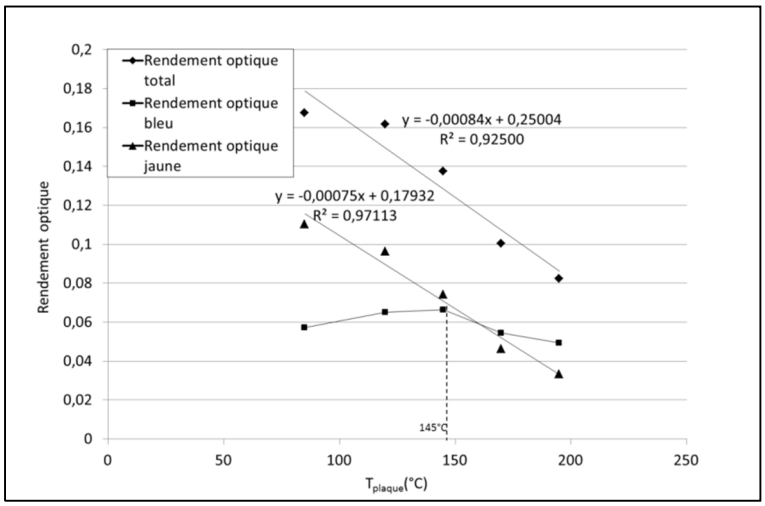


Figure 48 : Evolution des rendements optiques (total, bleu et jaune) en fonction de la température T_{plaque} pour la structure VTF (LED 07).

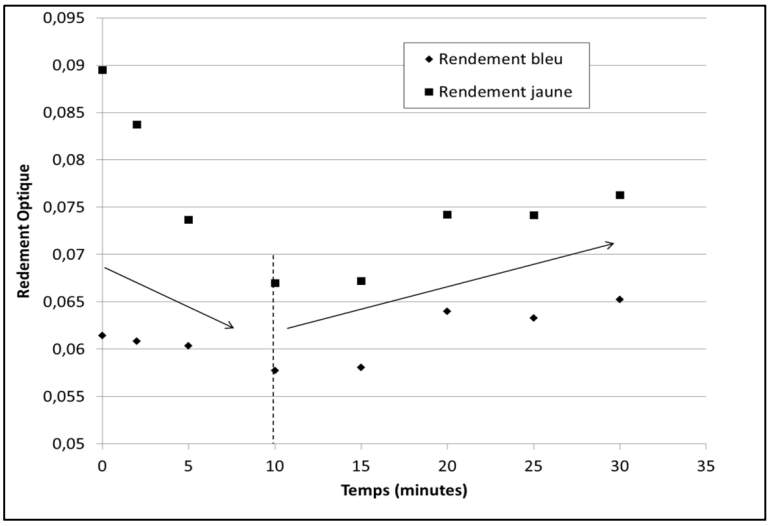


Figure 49 : Détail de l'évolution des rendements optiques bleu et jaune sur le palier à 145°C (T_{plaque}) pour la technologie VTF (LED 07).

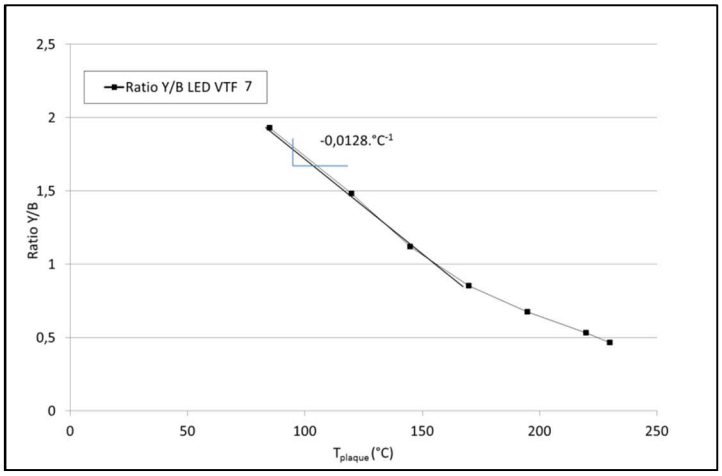


Figure 50 : Evolution du ratio Y/B au cours du test en température pour la technologie VTF (LED 7).

L'ensemble des informations collectées durant le test en température appliqué à la structure VTF viennent d'être présentées, passons maintenant aux mesures comparatives sur modules fonctionnels (avant et après le test).

5.3.2 Analyses comparatives des modules fonctionnels

Pour chaque partie, le composant VTF 08 a été choisi afin d'analyser les dérives paramétriques enregistrées. Les dérives enregistrées sur le second composant fonctionnel VTF 09 seront ensuite comparées en fin de paragraphe.

a. Paramètres électriques

L'évolution de la caractéristique I(V) du module VTF 02 est présentée en Figure 51. On peut noter, , une meilleure stabilité de ses paramètres électriques à fort niveau d'injection, vis-à-vis de la technologie TFFC. En effet, on constate une faible évolution de la valeur de la résistance R_p (950 à 874 MΩ) et aucune évolution de la valeur de résistance R_s ni du paramètre V_{th}. Cependant, la zone 2 met en évidence une augmentation de la valeur du courant et un changement de pente. En lien avec le modèle électrique équivalent, c'est E_{00} qui est concerné. Le dopage au niveau des contacts a probablement été modifié ce qui abaisse la barrière de potentiel Schottky. L'hypothèse probable est une diffusion de métal dans le semi-conducteur, activée par la contrainte thermique appliquée.

L'évolution des paramètres électriques du module VTF 09 est résumée dans le Tableau 12. On constate des dérives plus fortes sur le module VTF 09 mais les tendances sont cohérentes entre les deux modules.

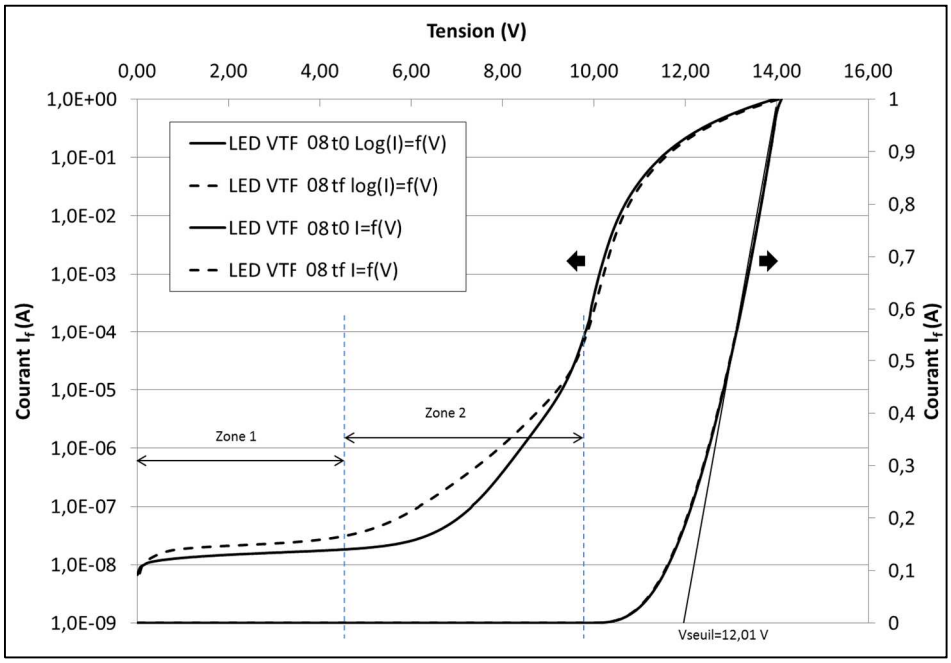


Figure 51 : Caractéristiques I(V) de la LED VTF 08 avant et après le test de robustesse en température.

	R_p	R_s	V_{th}	I_f à +6V
LED VTF 08	-8 %	-	-	multiplié par 2
LED VTF 09	-12 %	-	-	multiplié par 4

Tableau 12 : Evolution des paramètres électriques des LEDs VTF fonctionnelles avant et après le test de robustesse en température.

b. *Paramètres optiques*

L'évolution du rendement optique du module VTF 08 est présentée en Figure 52. On constate une faible modification du rendement optique du module VTF à la suite du test de robustesse en température. La perte de rendement est de -4,6 % à 1 A. Les analyses électriques comparatives n'ont montré aucune dérive des paramètres électriques à fort niveau d'injection (R_s et V_{th}). Cette analyse croisée permet de conclure à une dégradation du fonctionnement optique du module VTF. Soit la zone active a été dégradée, soit le chemin optique a été modifié. Si l'on s'intéresse aux composantes bleue et jaune, les mesures optiques mettent en évidence une perte de la puissance optique bleue de 9 % et une faible perte de la puissance optique jaune de 1,1 %. Les pertes optiques mesurées au niveau module sont donc principalement dues à la contribution bleue. Le Tableau 13 permet d'apprécier les évolutions des caractéristiques optiques dues au test de robustesse en température sur les composants VTF 08 et 09. Les évolutions sont cohérentes entre les deux modules fonctionnels.

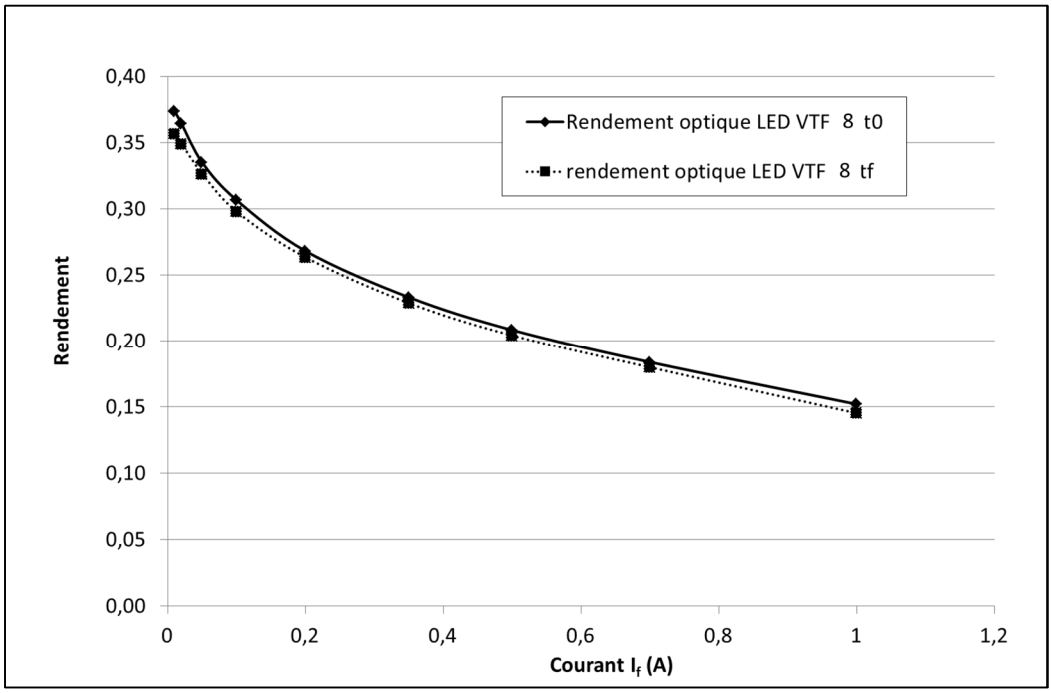


Figure 52 : Evolution du rendement optique en fonction du courant du module VTF 08 avant et après le test de robustesse en température.

	Rendement optique total	P_{opt}	P_{bleue}	P_{jaune}
LED VTF08	-4.6 %	-2.7 %	-9 %	-1.1 %
LED VTF 09	-6 %	-3.4 %	-11 %	-2 %

Tableau 13 : Evolution des paramètres optiques des LEDs VTF fonctionnelles à 1A avant et après le test de robustesse en température.

c. *Paramètres thermiques*

L'analyse comparative des paramètres thermiques du module de LEDs VTF 08 est présentée en Figure 53. Une augmentation de la résistance thermique totale est constatée passant de 5,1 à 6.5 $K.W^{-1}$. Si l'on affine l'analyse, une translation de la caractéristique initiale de 0,5 $K.W^{-1}$ permet une bonne correspondance avec la courbe finale, et met en évidence une dégradation des premiers niveaux du composant (puce ou brasure) à hauteur de 0,5 $K.W^{-1}$.Le composant LED VTF 09 a montré une évolution semblable avec une dégradation de la résistance thermique estimée à 0,4 $K.W^{-1}$. Le composant VTF 09, second module fonctionnel à la suite du test de robustesse en température, présente les mêmes évolutions, à savoir une dégradation de la résistance thermique totale de

1,2 $K.W^{-1}$, comprenant une dégradation de la résistance thermique au niveau puce de 0,2 $K.W^{-1}$ présentée dans le Tableau 14.

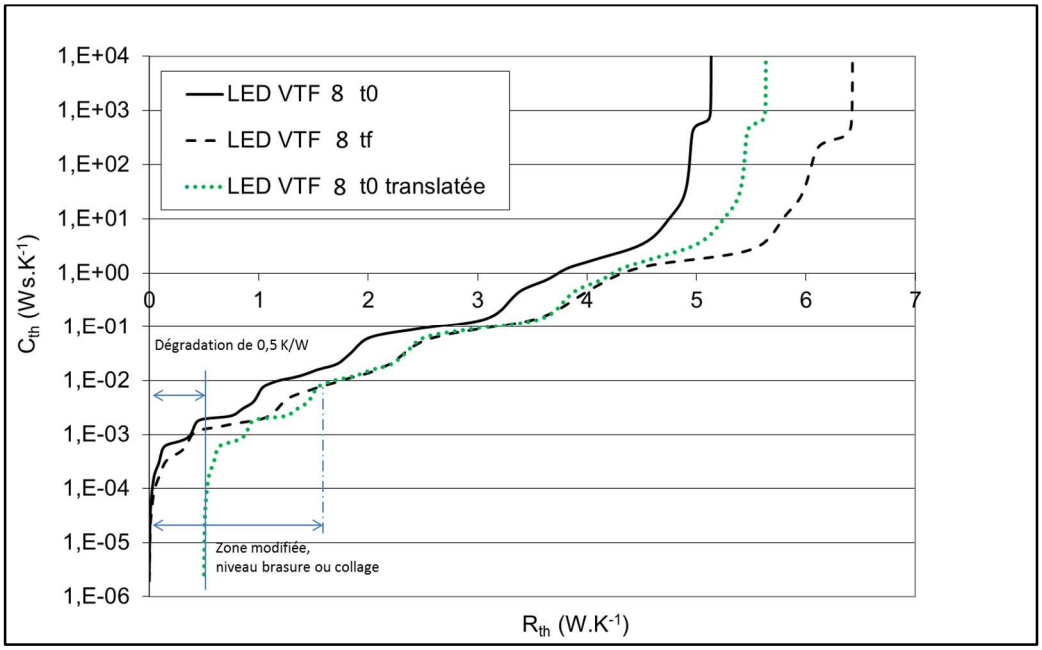


Figure 53 : Evolution de la résistance thermique de la LED VTF 08 avant et après le test de robustesse en température.

	$R_{thj\text{-}puits}$	$R_{th\ composant}$
LED VTF 08	+30 %	+16 %
LED VTF 09	+25 %	+15 %

Tableau 14 : Evolution des paramètres thermiques des LEDs VTF fonctionnelles avant et après le test de robustesse en température.

On compare à présent les conclusions de l'analyse T3Ster® du module VTF 08 aux images par radiographie X. On constate une concentration de défauts plus importante dans les brasures de puces du module VTF 08 (Figure 54-b) que dans un module neuf (Figure 54-a). Ces modifications pourraient être des manques de brasure de type Kirkendal [21] [22] [23]. Les conclusions tirées des analyses $C_{th}(R_{th})$ sont confirmées mais nécessitent d'être discutées. Les brasures de puces représentent une résistance thermique initiale de 0,07 $K.W^{-1}$ (calcul détaillé en chapitre 2) en prenant $\lambda_{Au80Sn20}$= 60 $W.m^{-1}K^{-1}$ et pour une épaisseur de 10 µm sur quatre puces de 1 mm². Cette valeur initiale de $R_{thAu80Sn20}$ est mineure devant la résistance thermique totale $R_{thj\text{-}puits}$ de 5,5 $K.W^{-1}$ (1,2 %). Par conséquent si la $R_{thAu80Sn20}$ double ou triple, respectivement pour des surfaces utiles de brasure réduite par deux ou trois (exemple de la Figure 54), les conséquences sur la $R_{thj\text{-}puits}$ seront difficilement décelables. La dégradation de R_{th} de 0,5 K/W constatée en Figure 53 est donc en partie due à la dégradation des brasures de puces.

Les brasures des puces VTF sont un élément du circuit électrique. La dégradation constatée devrait avoir des conséquences sur le paramètre R_s mais aucune modification n'est constatée. Nous supposons que compte tenu de la surface de brasure disponible pour le passage du courant, les dégradations observées ne sont pas à un stade suffisamment avancé pour avoir des conséquences mesurables.

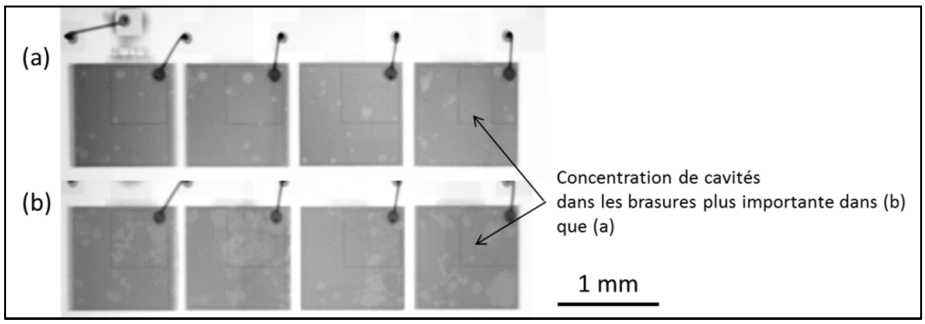


Figure 54 : Comparaison de l'état des brasures de puces de la technologie VTF neuve (a) et ayant subi le test de robustesse ne courant (b). Observation par tomographie X.

5.3.3 Analyses de défaillance

L'observation visuelle du module VTF défaillant permet de localiser la ou les zones dégradées. La Figure 55 présente une vue globale du module VTF 07 après le test en température. On remarque tout d'abord une tâche sombre à la surface du luminophore de la structure VTF. Cette tâche est le siège d'un court-circuit de la jonction de la puce. Ce court-circuit de jonction a été identifié comme point chaud de la structure par thermographie IR. De plus, on constate la présence d'un bourrelet de matière sur le substrat céramique sur chaque puce, du côté du câblage filaire. Cela correspond à une modification de la brasure des puces (fusion probable). La surface de la céramique étant métallisée côté câblage filaire, on observe un probable phénomène de mouillage. Ce point sera confirmé par la radiographie X en Figure 57. De plus, la sur-sollicitation thermique lors du test a entraîné une fissuration généralisée de la couche de conversion (luminophore dispersé dans le silicone). L'observation d'une puce fonctionnelle à bas courant (60 µA) permet de mettre les fissures en évidence. L'hypothèse avancée lors du test en courant est donc vérifiée : les fissures constatées dans la couche de conversion lumineuse sont la conséquence d'une contrainte thermique forte.

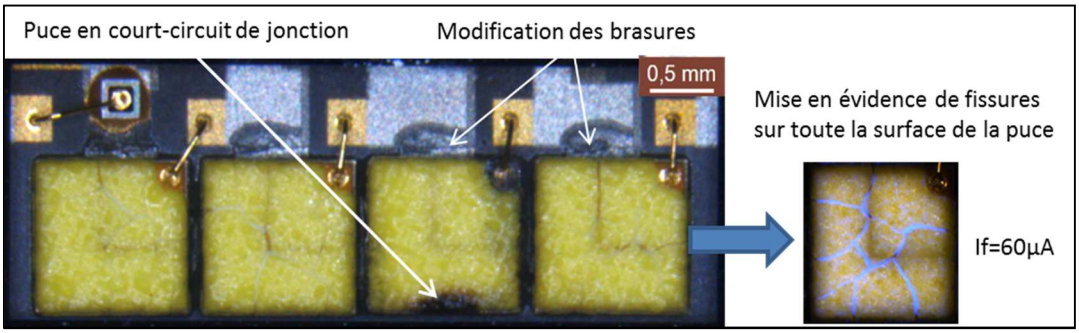


Figure 55 : Visualisation du module VTF 07 défaillant lors du test de robustesse en température.

Par une observation de la puce défaillante du module VTF étudiée en micro-section, des informations à la fois sur l'état de la brasure, du luminophore mais également des contacts peuvent être extraites. La Figure 56-a présente une image MEB de cette puce défaillante. On constate tout d'abord une dégradation évidente de la brasure de la puce, par de nombreux manques de matière. D'autre part, les couches actives ont été décollées de leur substrat en Ge durant le test. La séparation s'est produite entre le substrat et les couches composant le contact P. Ce décollement des couches actives est cohérent avec la température de jonction T_j moyenne estimée lors du suivi in situ des modules. La T_j estimée à défaillance est de 297 °C (voir Figure 45), supérieure à la température de fusion de l'alliage Au_{80}-Sn_{20}, présent dans l'empilement du contact P de la structure VTF. Le détail des contacts N et P est présenté en Figure 56-b. L'objectif est de caractériser d'éventuelles modifications de matériaux au niveau des contacts sur le GaN. Sur une partie « décollée » de la puce, l'analyse MEB ainsi qu'une analyse EDX ont confirmé la présence et la stabilité du réflecteur en Ag côté P ainsi que

la couche d'accroche en Ti côté N. En lien avec les mesures électriques comparatives, la stabilité des paramètres électriques constatée à fort niveau d'injection est en partie liée à une bonne stabilité des contacts N et P.

La dégradation de la brasure peut être mise en évidence par radiographie X. La Figure 57 établit une comparaison entre une image X avant et après le test de robustesse en température. La dégradation des brasures est très prononcée sur toute la surface des puces et conforte les observations en micro-section. D'autre part, la dégradation des brasures apparaît comme complémentaire à la formation d'excroissances de brasure côté câblage filaire.

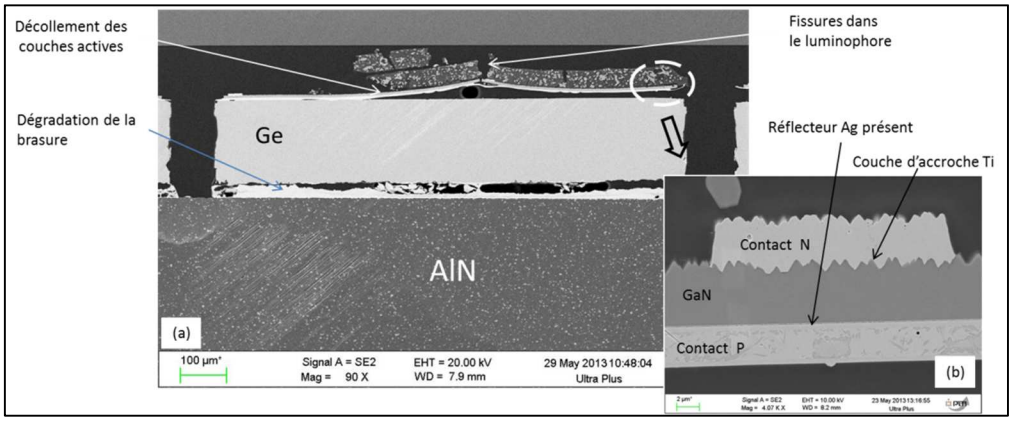


Figure 56 : Images MEB de la micro-section d'une puce VTF défaillante lors du test en température. Vue globale (a) et détail sur les contacts N et P (b). Module VTF 07.

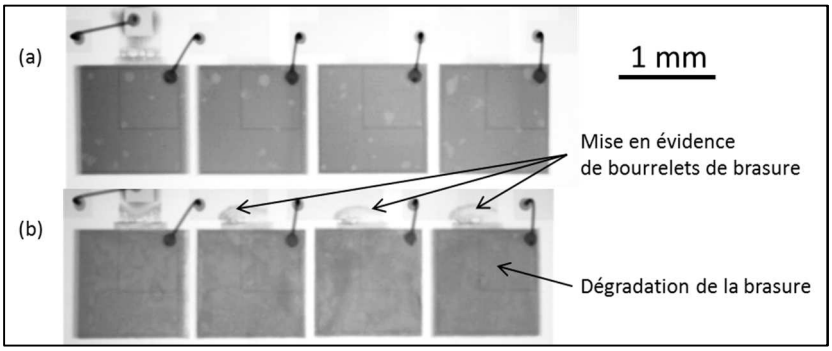


Figure 57 : Analyse comparative de la brasure des puce VTF par radiographie X sur module neuf (a) et sur le module défaillant suite au test en température. Module VTF 07.

La comparaison des paramètres électriques du module VTF défaillant permet de mettre en évidence le court-circuit de jonction, caractérisé par la perte de la fonctionnalité d'une puce tout en gardant les résistances d'accès aux couches actives, illustrée par la Figure 40. La tension de seuil V_{th} passe de 12,14 à 9,05 V (-25%), en cohérence avec la perte d'une puce (3/4*12,14=9,10 V). De plus, l'évolution du paramètre R_s montre la persistance de la résistance d'accès lors de la perte d'une puce, de 1,37 à 1,36 Ω.

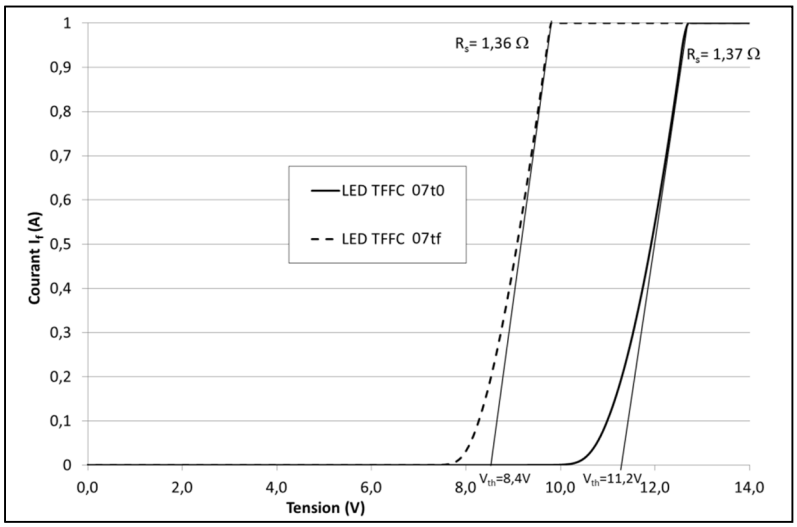


Figure 58 : Comparaison des paramètres électriques du module VTF 07 avant et après défaillance lors du test en température.

Nous venons d'analyser les signatures des défaillances de la technologie VTF face à une sur-sollicitation thermique. Cela clôture la présentation des résultats de l'étude de robustesse sur les technologies TFFC et VTF.

5.4 Bilan du test en température

Afin de conclure sur les constations et comportements électro-optiques et thermique du test en température, il est intéressant de rassembler l'ensemble des informations collectées dans un tableau synthétique permettant d'évaluer le comportement des technologies VTF et TFFC lors de sur-sollicitations thermiques.

		Technologie TFFC	Technologie VTF
	Défaillance	Court-circuit	Court-circuit
Thermique	T_{plaque} à première dérive électrique	220 °C	195 °C
	T_{plaque} à défaillance	260 °C	230 °C
	T_j calculée à défaillance	≈327 °C	≈297°C
	Puissance thermique à défaillance	12,8 W	12 W
Electrique	Tendance V_f avant défaillance	↗ (+40 %)	↘ (-5 %)
	V_f à défaillance	13,8 V (LED 7)	12,8 (LED1)
Optique	Dérive du pic bleu	+0,0492 $nm.K^{-1}$	+0,078 $nm.K^{-1}$
	Pente de rendement optique	$-8{,}8.10^{-4}$ $°C^{-1}$	$-8{,}4.10^{-4}$ $°C^{-1}$
	Pente de rendement optique bleu	$-1{,}45.10^{-4}$ $°C^{-1}$	Non mesurable
	Pente de rendement optique Jaune	-8.10^{-4} $°C^{-1}$	$-7{,}5.10^{-4}$ $°C^{-1}$
	Sensibilité maximale du ratio Y/B	-0,0113 $°C^{-1}$	-0,0128 $°C^{-1}$

Tableau 15 : Bilan de l'évaluation de la robustesse des technologies VTF et TFFC en température.

Contrairement au test de robustesse en courant, les forces et faiblesses des structures sont plus équilibrées. D'un point de vue thermique la première dérive est enregistrée à la température T_{plaque}= 195 °C pour la structure VTF contre 220 °C pour la TFFC. Le V_f affiche une forte dérive (+40 %) pour la structure TFFC due à la dégradation des contacts. la structure VTF enregistre une dérive de la tension V_f de -5 %. Optiquement, les deux technologies présentent des comportements similaires. Cependant une faiblesse est à noter pour la technologie VTF au niveau de la conversion lumineuse.

En effet la matrice silicone est dégradée (fissures) à la suite du test. Le luminophore fritté de la structure TFFC semble apporter une meilleure stabilité optique au cours du test.

6 Bilan de l'étude de robustesse

Deux technologies de LEDs blanches multi-puce (TFFC et VTF) viennent d'être étudiées au travers d'une campagne de robustesse, axée sur deux sollicitations environnementales, le courant et la température, susceptible de dé-fiabiliser les assemblages. Cette étude a permis de caractériser les modes de défaillance et mécanismes associés à chaque technologie dans le cadre de sollicitations non représentatives du profil de mission. Les signatures de défaillance caractérisées en robustesse et synthétisées ici ne devront donc pas apparaître lors des tests accélérés. De plus, les limites opérationnelles de fonctionnement ont été caractérisées et revêtent un intérêt tout particulier dans la définition des contraintes à appliquer dans l'étude de fiabilité. Les données essentielles sont ici résumées par catégorie de test afin d'être facilement exploitables pour la définition des contraintes à appliquer en vue de l'étude de fiabilité.

6.1 Test en courant

L'ensemble des données collectées lors des tests en courant permettent de dresser une représentation synthétique des comportements enregistrés. Le schéma est illustré en Figure 59, qui met en évidence une marge opérationnelle de fonctionnement jusqu'à 2,7 et 2,1 A, respectivement pour les technologies TFFC et VTF. Ces marges opérationnelles de fonctionnement sont définies par le courant correspondant à la première dérive paramétrique enregistrée (ici le paramètre V_f), et sont résumées dans le Tableau 16. Ces informations, confrontées aux données fabricants, seront exploitées pour la définition des vieillissements en fiabilité. On note une marge opérationnelle de fonctionnement en courant plus étendue pour la structure TFFC.

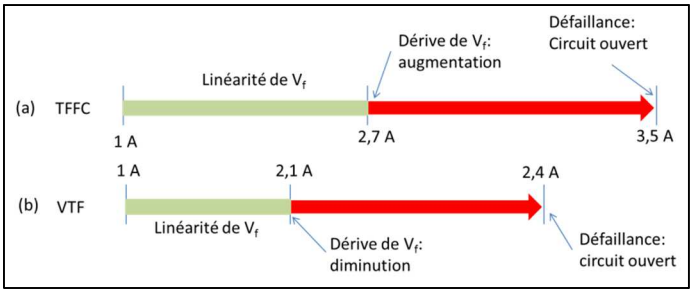


Figure 59 : Représentation synthétique des comportements des technologies TFFC (a) et VTF (b) durant le test de robustesse en courant (T_{plaque}= 85 °C).

	Courant à défaillance	Perte de linéarité du V_f	Courant maximal admissible (fiche technique)	Marge opérationnelle de fonctionnement en regard de la fiche technique
Structure TFFC	3,5 A	2,7 A	1,05 A	1,7 A
Structure VTF	2,4 A	2,1 A	1 A	1,1 A

Tableau 16 : Bilan des valeurs de courants remarquables durant le test en courant.

Les analyses comparatives des modules multi-puce ont permis de caractériser l'impact d'une sur-sollicitation en courant sur les paramètres physiques des composants. Le Tableau 17 rassemble les principales informations extraites de ces analyses comparatives du test en courant. D'un point de vue électrique, la technologie VTF présente une meilleure stabilité des paramètres électro-optiques face au test en courant. Concernant le rendement optique, la même tendance est observée avec une

faible perte du rendement pour la technologie VTF (-1,3 %) vis-à-vis de la technologie TFFC (-12,5 %). Cependant, pour les paramètres thermiques, la technologie TFFC montre une amélioration de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ d'environ 4 %, localisée au niveau puce ou fixation de puce TFFC (-0,2 $K.W^{-1}$). Cette modification est due à une amélioration de l'assemblage puce sur support. Pour la technologie VTF, la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ présente une dégradation de 5 % et est localisée principalement au niveau brasure ou collage (+0,2 $K.W^{-1}$). Le Tableau 18 présente et synthétise les principaux résultats des analyses de défaillance effectuées à la suite du test de robustesse en courant.

	Paramètre	Technologie TFFC	Technologie VTF
Electrique	R_s	+32 %	0 %
	V_{th}	0 %	0 %
	I_f à +6V	+84 %	+66 %
Optique	Rendement optique	-12,5 %	-1,3 %
Thermique	$R_{thj\text{-}puits}$	-4 %	+4 %
	Niveau thermique modifié	Niveau puce (- 0,2 $K.W^{-1}$)	Niveau brasure ou collage (+ 0,2 $K.W^{-1}$)

Tableau 17 : Bilan de l'analyse comparative de l'évolution des paramètres des technologies VTF et TFFC après le test en courant.

	Courant à défaillance	Mode de défaillance	Mécanisme associé	Physique de défaillance proposée	Forces	Faiblesses
Structure TFFC	3,5 A	Circuit ouvert brutal	Fusion d'une partie de la puce GaN	L'augmentation de la densité de courant entraîne un échauffement intense des zones les moins refroidies (espaces entre les plots en Au)	Les plots d'accueil de la structure TFFC empêchent d'avoir de fortes densités de courant	Le couplage thermique de la puce TFFC n'étant pas une couche continue, certaines zones sont mal refroidies
Structure VTF	2,4 A	Circuit ouvert brutal	Fusion du câblage filaire	L'augmentation de la densité de courant entraîne un échauffement intense du câblage filaire qui fond	La fixation de puce par brasure permet un couplage thermique plus homogène de la puce vers son embase	Le câblage filaire est le siège d'une forte concentration de courant

Tableau 18 : Bilan sur les analyses de défaillances suite au test de robustesse en courant.

6.2 Test en température

La représentation schématique des comportements enregistrés lors du test de robustesse en température est présentée en Figure 60. Elle met en évidence une première dérive électrique à 195°C et 220 °C pour T_{plaque}, respectivement pour les technologies VTF et TFFC. La technologie VTF présente une première dérive optique à la température T_{plaque}= 145 °C sur le ratio Y/B mais les mesures comparatives ont révélé un comportement réversible. Le Tableau 21 permet de situer ces dérives observées comparaison des valeurs annoncées par les fabricants.

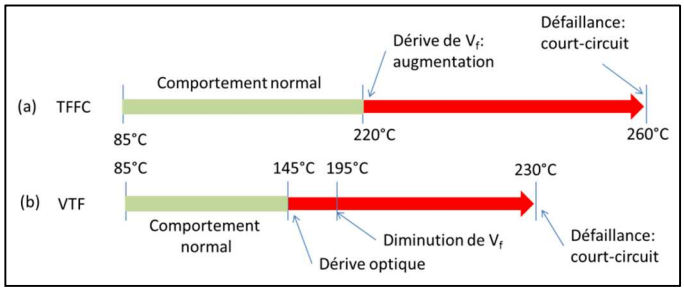


Figure 60 : Représentation synthétique des comportements des technologies TFFC (a) et VTF (b) durant le test de robustesse en température (T_{plaque}) (I_f=1 A).

Le Tableau 19 rassemble les principales informations extraites des analyses comparatives du test en température. D'un point de vue électrique, la stabilité des paramètres de la structure VTF est mise en avant, avec surtout, aucune modification du R_s et du $V_{th.}$ La structure TFFC présente de fortes dérives électriques (+95 % sur le R_s et +16 % pour V_{th}). Concernant l'optique, la perte de rendement est plus marquée pour la technologie TFFC (- 23 %) que pour la structure VTF (-4,6 %). Enfin, pour les analyses thermiques, les mesures mettent en lumière une dégradation des résistances thermiques des deux structures à hauteur de 14 % pour la structure TFFC et 30 % pour la structure VTF.

Le bilan des analyses de défaillance effectuées à la suite du test de robustesse en température est présenté dans le Tableau 20. Le tableau comprend une synthèse des analyses de défaillance et dégage les forces et faiblesses des deux technologies face à une sur-sollicitation thermique.

	Paramètre	Technologie TFFC	Technologie VTF
Electrique	R_p	Divisé par 100	-8 %
	R_s	+95%	0 %
	V_{th}	+16%	0 %
	I_f à +6V	Multiplié par 30	Multiplié par 2
Optique	Rendement optique	-23%	-4,6 %
Thermique	$R_{thj\text{-}plaque}$	+14%	+30 %
	Niveau thermique modifié	Niveau puce (+0,35.K.W^{-1})	Niveau Silpad (+0,5 K.W^{-1})

Tableau 19 : Bilan de l'analyse comparative de l'évolution des paramètres des technologies VTF et TFFC après le test en courant.

	Température T_{plaque} à défaillance	Mode de défaillance	Mécanisme associé	Physique de défaillance proposée	Forces	Faiblesses
Structure TFFC	270 °C	Court-circuit de jonction	Contact entre le GaN N et le contact P lors de la propagation de fissures autour des vias	L'augmentation de la température de la structure TFFC entraîne de fortes contraintes mécaniques, qui aboutissent à des fissures au niveau des zones fragiles de la structure : les vias	Bonne stabilité du point de couleur (paramètre Y/B) due à la présence d'un luminophore fritté	Dérive irréversible des paramètres électriques à partir de 195 °C T_{plaque}
Structure VTF	230 °C	Court-circuit de jonction	Contact entre le contact N et la métallisation côté P	L'augmentation de la température entraîne un décollement des couches actives du substrat en Ge. Des fissures apparaissent et le contact électrique devient possible entre les contacts N et P	Aucune modification des paramètres électriques sur les composants fonctionnels	La présence de luminophore dispersé dans un silicone entraine une forte sensibilité du point de couleur en température

Tableau 20 : Bilan sur les analyses de défaillances suite au test de robustesse en courant.

La description des évolutions paramétriques durant le test est décrite dans le Tableau 21. Il rassemble les éléments clés permettant de définir les températures associées aux premiers instants de dérive paramétrique et ainsi définir les marges opérationnelles de fonctionnement thermique. Ces informations seront exploitées pour la définition des conditions de vieillissement en fiabilité. On note une marge opérationnelle de fonctionnement en température plus étendue pour la structure TFFC (65 °C).

	Température T_{plaque} à défaillance	Température de $1^{ère}$ dérive paramétrique	Température T_{case} admissible (fiche technique)	Marge opérationnelle de fonctionnement sur T_{case} en regard de la fiche technique
Structure TFFC	270 °C	195 °C (électrique)	130 °C	65°C
Structure VTF	230 °C	145 °C (optique)	125 °C	20°C

Tableau 21 : Bilan des valeurs de température remarquables durant le test en température.

7 Préparation de l'étude de fiabilité

Lors de l'étude bibliographique sur l'utilisation des modules multi-puce à LEDs pour les applications de puissance en automobile, nous avons pu constater deux tendances quant à l'utilisation et l'intégration de ces nouveaux composants. D'une part, une tendance à piloter les modules à fort courant, proche ou égale au courant maximal admissible annoncé par les constructeurs. Cette alimentation à forte puissance permet une réduction du nombre de puces LEDs pour un même flux optique en sortie de projecteur. Les discussions et échanges sur les différentes technologies disponibles pour le pilotage en courant des sources à LEDs, ont permis de définir l'évolution potentielle de la consigne de courant de l'électronique d'alimentation dans le temps comme étant un risque mineur quant à l'utilisation des LEDs [24]. L'influence du courant ne sera donc pas étudiée en fiabilité et le courant d'alimentation sera fixé au courant maximal admissible par les deux technologies, à savoir 1 A pour tous les vieillissements. D'autre part, la gestion thermique

des modules de LEDs intégrés dans les projecteurs apparaît comme un point sensible quant à l'utilisation des LEDs et ce pour plusieurs raisons :

- La multitude de types de boîtiers disponibles sur le marché automobile induit des performances et comportements thermiques propres à chaque architecture.
- La présence de plusieurs puces (module multi-puce) impose de travailler avec des données thermiques moyennées (exemple de la T_j) qui ne prennent pas en compte des zones plus sollicitées thermiquement que d'autres. Ce comportement est également valable à l'échelle mono-puce mais est amplifié dans le cas des modules multi-puce.
- La conception thermique des projecteurs à LEDs est propre à chaque modèle de véhicule, ce qui entraîne autant de caractéristiques thermiques différentes (R_{th} et C_{th} projecteur)
- Des sondes de température permettent de contrôler la température d'une partie du chemin thermique (niveau carte par exemple) et permet de réguler la température moyenne de jonction des composants de manière indirecte. Cependant, l'évolution temporelle du rendement optique et de la résistance thermique du composant n'est généralement pas prise en compte ou intégré de manière approximative.
- Le profil de température, établi principalement entre -40 et 125°C, peut présenter dans certains cas des températures supérieures, même projecteur éteint.

Devant la multitude des configurations envisageables en termes de montage de LEDs en projecteur, la gestion thermique apparaît donc comme capitale pour garantir le bon fonctionnement de sources à LEDs en environnement automobile. Le test de robustesse a montré que la température constitue un paramètre environnemental majeur de dé-fiabiliser de tels dispositifs. La température étant dépendante de l'environnement, des températures situées dans la fourchette haute du profil de mission peuvent être atteintes, même avec le projecteur éteint. L'étude de fiabilité des modules à LEDs sera donc orientée principalement sur la thermique. Dans ce contexte, et suite à des échanges avec les fabricants de LEDs pour l'automobile sur les marges opérationnelles de fonctionnement, les températures T_{plaque} retenues seront égale à : 105, 125 et 145 °C [25]. Le vieillissement à 105 °C/1 A correspond à un point de fonctionnement situé dans les valeurs de courants et de températures spécifiées dans les fiches techniques (T_j estimée à 150 °C). Le vieillissement 125 °C/1A correspond à un point de fonctionnement situé au-dessus de la spécification maximale en température (T_j estimée à 175 °C) mais cohérente avec certains tests développés chez les fabricants de LEDs [25]. Le dernier vieillissement, 145 °C/1 A, correspond à un point de fonctionnement clairement au-delà des spécifications, avec une T_j estimée à 190 °C. L'étude de robustesse a permis de caractériser les limites opérationnelles de fonctionnement et les mesures *in-situ* n'ont révélé aucune dérive paramétrique irréversible, jusqu'à la température T_{plaque} = 195 °C. Trois conditions de vieillissement ont été définies afin de pouvoir extraire des informations et paramètres de fiabilité, à savoir des valeurs d'énergie d'activation ainsi que les accélérations en températures associées.

8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous venons de traiter l'analyse comportementale de deux technologies LEDs multi-puce pour l'automobile au travers d'une étude de robustesse axée sur deux contraintes environnementales susceptibles de dé-fiabiliser les dispositifs : le courant et la température. Les mesures *in-situ* des paramètres électro-optiques et thermiques ont permis de caractériser finement leurs évolutions au cours des tests. Les premières dérives paramétriques anormales ont défini les marges opérationnelles de fonctionnement des deux types de modules en regard des contraintes maximales admissibles définies par les constructeurs. A l'issue des tests, des mesures comparatives

et analyses de défaillance ont permis de caractériser l'origine des dérives paramétriques. Les analyses de défaillance non destructives et destructives ont constitué un support permettant d'identifier les causes de ces dérives paramétriques pour proposer des scénarii de défaillance. De la capitalisation de ces informations, on extrait les forces et limites des technologies étudiées en vue de définir les contraintes environnementales des tests de fiabilité, axés sur le principal risque de l'utilisation des LEDs en automobile, à savoir des vieillissements en température, détaillés dans le chapitres IV. Les principales données de sortie des tests de robustesse sont donc les limites opérationnelles de fonctionnement des modules :

La technologie TFFC présente une dérive paramétrique anormale de V_f à la température T_{plaque}=220°C. Cette dérive (augmentation de V_f) définit donc le niveau de contrainte thermique minimal à partir duquel des mécanismes de dégradation de « sur-accélération » sont engagés.

La technologie VTF présente une première dérive paramétrique optique anormale à la température T_{plaque}= 145°C, sans avoir de conséquence sur le flux optique (comportement réversible). La première dérive paramétrique non réversible est une augmentation du V_f à la température T_{plaque}= 195°C. C'est cette dernière qui sera retenue comme niveau de contrainte thermique minimal à partir duquel des mécanismes de dégradation de « sur-accélération » sont engagés.

Les marges opérationnelles de fonctionnement identifiées ont été discutées et confrontées aux tests réalisés chez les fabricants de LEDs pour l'automobile [25]. Les températures retenues pour les vieillissements sont les températures T_{plaque} = 105, 125 et 145 °C. La température T_{plaque}= 105 °C constitue un vieillissement dans les spécifications (T_j≈ 150°C), et les deux autres conditions sortent clairement des spécifications, avec des températures moyenne de jonction respectivement estimées à 175 et 195 °C. Cette analyse de robustesse, inscrite parfaitement dans la méthodologie de l'étude, permet d'une part de tester de nouveaux composants dans un temps réduit, et d'autre part d'ajuster les contraintes environnementales à appliquer aux composants dans le cadre de vieillissements accélérés que nous aborder dans le dernier chapitre. Cette démarche semble être la méthode optimale pour rencontrer dans un temps réduit, en fiabilité, des mécanismes de dégradation représentatifs d'un profil de mission automobile.

9 Bibliographie

1. **OSRAM.** *Fiche technique su composant Ostar 4 puces.* 2011.

2. **Philips Lumileds.** *Fiche technique du produit Altilon 1X4.* 2010.

3. **SCHUBERT, E.F.** *Light Emitting Diodes, partie 6, pages 103-104.* s.l. : Cambridge University Press, 2006.

4. **R. BAILLOT.** *Thèse: METHODOLOGIE D'ANALYSE DE DEFAILLANCE POUR L'EVALUATION DE LA FIABILITE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES GAN.* Université de Bordeaux 1, 2011.

5. **M.DAL, LAGO.** *Phosphors for LED-based light sources: Thermal properties and reliability issues.* Microelectronics Reliability, Volume 52, Issues 9–10, Pages 2164–2167, 2012.

6. **Mentor Graphics.** *Structure functions in T3Ster Master.* présentation, 2011.

7. —. *Support de présentation technique: Structure functions in T3Ster Master.* 2011.

8. **C.D. BREACH et al.** *New observations on intermetallic compound formation in gold ball bonds: general growth patterns and identification of two forms of Au4Al.* Microelectronics Reliability Volume 44, Issue 6, Pages 973–981, 2004.

9. **E.F. SCHUBERT.** *Light Emitting Diodes, chapitre 6, pages 103-104.* Cambridge University Press, 2006.

10. **J. SHAH.** *Estimating bond wire current-carrying capacity.* Power systems design, publication ON Semiconductor, 2012.

11. **K. B. NAM et al.** *Optical properties of AlN and GaN in elevated temperatures.* APPLIED PHYSICS LETTERS N° 85, NUMBER 16, 2004.

12. **E.F.SCHUBERT.** *Light-Emitting Diodes, chapitre 5, pages 98-100.* Cambridge University Press, 2006.

13. **TOYOTA GOSEI.** *General LED catalogue.* 2004.

14. **E.R. SCHUBERT.** *Light Emitting-Diodes, chapitre 4, pages 63-71.* Cambridge University Press, 2006.

15. **R. BAILLOT.** *Manuscrit de thèse: METHODOLOGIE D'ANALYSE DE DEFAILLANCE POUR L'EVALUATION DE LA FIABILITE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES GAN.* Université de Bordeaux 1, 2011.

16. **B. HAMON et al.** *N-contacts degradation analysis of white flip chip LEDs during reliability tests.* IRPS conference, 2014.

17. **F. DELOR-JESTIN et al.** *Durability of crosslinked polydimethylsyloxane: the case of composite insulators.* Sci. Technol. Adv. Mater.Volume 9, N° 2, 2008.

18. **F. VIRLOGEUX et al.** *Evaluation of cross-linking after accelerated photo-ageing of silicone rubber.* Polymer international, Volume 53, Issue 2, pages 163–168, 2004.

19. **K.XIANG et al.** *Accelerated thermal ageing studies of polydimethylsiloxane (PDMS) rubber.* Journal of polymer research, vol. 19, no5, pp. 1-7, 2012.

20. **H.C.CHEN.** *Improvement on lumens efficiency in White LEDs by roughened dispensing package.* Nanoelectronics Conference (INEC), 2011 IEEE 4th International, page 1-2, 2011.

21. **K. ZENG et al.** *Kirkendal void formation in eutectic SnPb solder joints on bare Cu and its effect on joint reliability.* JAP vol 97 issue 2, 2005.

22. **C. LEI et al.** *Void formation and surface energies in Cu(InGa)Se2.* J. Appl. Phys. 100, 073518, 2006.

23. **H. Xu et al.** *Intermetallic phase transformations in Au-Al wire bonds.* Intermetallics, Volume 19, Issue 12, Pages 1808–1816, 2011.

24. **RENAULT.** *Rapports sur les projecteurs à LEDs avec les référents composants, électonique, optique et thermique.* 2012.

25. **RENAULT.** *Rapports internes avec les fabricants de LEDs pour l'automobile.* 2012.

Chapitre IV : Méthodologie d’analyse et résultats de la fiabilité de modules à LEDs multi-puce

Chapitre IV : Méthodologie d'analyse et résultats de la fiabilité de modules à LEDs multi-puce

1 Introduction ..... - 178 -

2 Rappels de fiabilité ..... - 178 -

2.1 Généralités ..... - 178 -

2.2 Définition mathématique de la fiabilité ..... - 179 -

2.3 Evolution du taux de défaillance ..... - 180 -

2.4 Principales lois de fiabilité ..... - 181 -

2.5 Fiabilité d'un système ..... - 182 -

3 Méthodologie appliquée et définition des tests ..... - 183 -

3.1 Méthodologie appliquée ..... - 183 -

3.2 Définition des tests de fiabilité ..... - 185 -

3.3 Conception du banc de vieillissement ..... - 185 -

3.4 Suivi des LEDs témoins ..... - 186 -

4 Résultats pour les modules VTF ..... - 187 -

4.1 Evolutions paramétriques ..... - 187 -

4.2 Analyse de défaillance ..... - 196 -

4.3 Extraction de paramètres ..... - 203 -

5 Résultats pour les modules TFFC ..... - 208 -

5.1 Evolutions paramétriques ..... - 208 -

5.2 Analyses de défaillance ..... - 214 -

5.3 Extraction de paramètres ..... - 223 -

6 Synthèse et comparaison des technologies en vieillissement ..... - 228 -

6.1 Dérives paramétriques ..... - 228 -

6.2 Analyses de défaillance ..... - 229 -

6.3 Comportement en vieillissement (fiabilité module) ..... - 229 -

6.4 Durée de vie des modules en environnement automobile ..... - 232 -

7 Indicateurs précoces de défaillance ..... - 234 -

7.1 Technologie VTF ..... - 234 -

7.2 Technologie TFFC ..... - 236 -

7.3 Bilan.....- 237 -

8 Conclusion.....- 238 -

9 Bibliographie .....- 240 -

1 Introduction

Les tests de robustesse ont permis de dégager les marges opérationnelles de fonctionnement des technologies étudiées vis-à-vis des contraintes acceptables définies par les constructeurs. En se basant sur ces marges, trois conditions de vieillissement accéléré ont finalement été retenues en se basant sur les températures T_{plaque}= 105, 125 et 145 °C. Le courant I_f est fixé à 1 A pour toutes les conditions. Notons que la condition basse à la température T_{plaque}= 105°C est en accord avec les contraintes maximales admissibles de température définie par les fiches techniques [1] [2]. Chaque condition de vieillissement se base sur une population de dix modules de chaque technologie montés sur le banc de test dédié à l'étude. Après quelques rappels sur les grandeurs usuelles associées à la prévision de fiabilité et la méthodologie suivie, nous aborderons dans ce dernier chapitre, les résultats des vieillissements en distinguant trois phases :

- Les dérives paramétriques électro-optiques et thermiques.
- Les analyses de défaillance non destructives et destructives.
- L'extraction des paramètres de fiabilité pour la prévision de durée de vie des modules de LEDs étudiés.

A l'issue de ces résultats, une comparaison des deux technologies sera effecetuée, permettant de confronter :

- Les comportements en vieillissement en fonction des stratégies d'assemblage.
- Les conséquences en terme de fiabilité à l'échelle du module.
- Les projections des durées de vies des deux types de modules dans un profil de mission automobile.

Enfin, les analyses croisées des dérives paramétriques en vieillissement avec les mesures initiales aboutiront à la définition d'indicateurs précoces de défaillance, permettant d'identifier, au sein d'une population de composants donnée, les modules présentant une fragilité impactant directement leur fiabilité.

2 Rappels de fiabilité

2.1 Généralités

D'après la norme de la Commission Internationale d'Electrotechnique, « la fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pour une « période de temps donnée » [3].

La fiabilité est une science relativement récente dont le début se situe approximativement vers les années 1960. Son développement a été rapide, et il trouve des applications dans de nombreux domaines. Pour des raisons de sécurité et de sureté de fonctionnement, il est nécessaire que certains matériels assurent un fonctionnement sans défaillance ; on peut donner comme exemple les systèmes de défense, le stockage et la centralisation de données, le spatial, l'avionique, la production d'énergie, mais également l'automobile, qui impose un niveau élevé de fiabilité. A titre d'exemple sur les projecteurs dans le domaine automobile, les valeurs de durées de vie sont spécifiées par les constructeurs automobiles vers les fournisseurs de projecteurs.

En général, on considère qu'un matériel est constitué de composants ou pièces, alors qu'un système est un ensemble de composants ou de matériels interconnectés et/ou en interaction. Dans cette étude, les modules de LEDs étudiés sont donc des systèmes constitués de quatre puces connectées en série.

2.1.1 Défaillance et critère de défaillance

La défaillance est considérée comme la fin de l'aptitude d'un dispositif ou d'un système à accomplir la fonction que l'on attendait de ce matériel et on lui associe un critère de défaillance. Dans le cas des LEDs, comme nous l'avons abordé en chapitre 1, ce critère de défaillance est défini lorsque la source lumineuse a atteint 70% de son flux initial (noté L_{70}). Comme l'a précisé l'état de l'art sur le domaine (chapitre 1), les technologies LEDs présentent deux types de défaillance : la défaillance brutale et la défaillance graduelle [4]. Le critère de défaillance pourra donc être franchi de deux manières différentes (appelées modes de défaillance).

2.1.2 Temps à la défaillance

L'intervalle de temps entre défaillances ou « temps de bon fonctionnement » est la durée de fonctionnement d'un dispositif réparable entre deux défaillances successives. On lui associe le MTBF ou « temps moyen entre défaillances ». Dans le cas des dispositifs non réparables comme les LEDs, on introduit alors la notion de durée de vie, qui correspond à la durée moyenne de fonctionnement jusqu'à la défaillance (t_{L70B50}). On rappelle que l'indice « B50 » indique que la moitié des composants testés sont défaillants.

2.2 Définition mathématique de la fiabilité

On met en service, au temps t=0, n matériels identiques fonctionnant dans les mêmes conditions. Si l'on relève le nombre de matériels défaillants toutes les x heures, on définit alors N(t) qui correspond au nombre de matériels survivants à chaque date x [3].

A partir de ce relevé N(t), on peut alors déterminer :

- Le nombre de matériels défaillants à chaque date t : $\Delta N(t)=N(t-1)-N(t)$.
- Le pourcentage de survivants à chaque date t ou fréquence relative des survivants qui est : $R(t)=N(t)/N(0)$.
- La proportion de défaillants dans l'intervalle (t-1, t) ou fréquence relative des défaillants qui est :

$$f(t)=\frac{N(t-1)-N(t)}{N(0)}=R(t-1)-R(t) \qquad \textbf{Équation 1}$$

- Le taux moyen de défaillance :

$$\lambda(t)=\frac{N(t-\Delta t)-N(t)}{N(t-\Delta t)}=\frac{R(t-\Delta t)-R(t)}{R(t-\Delta t)}=\frac{f(t)}{R(t)} \qquad \textbf{Équation 2}$$

Avec l'ensemble de ces paramètres, la fiabilité d'un dispositif au temps t est la probabilité pour que la variable aléatoire T, non négative, représentant la durée de vie de ce dispositif, soit supérieure à une valeur t définie par :

$$R(t)=\Pr(T>t)=1-\Pr(T<1)=1-F(t) \qquad \textbf{Équation 3}$$

R(t) est la fiabilité du dispositif et F(t) la fonction de défaillance cumulée, c'est-à-dire la probabilité d'être totalement défaillant au temps t. L'évolution générale de ces deux variables est présentée en Figure 1.

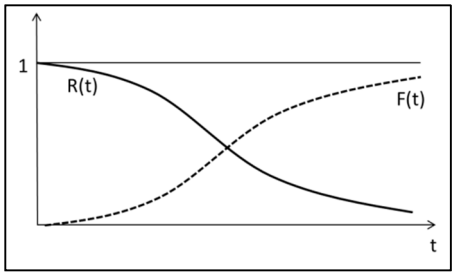


Figure 1 : Relation entre la fonction de répartition F et la fiabilité R d'un groupe d'objets identiques, en fonction du temps.

2.3 Evolution du taux de défaillance

Dans la plupart des cas, la courbe représentant le taux de défaillance d'un dispositif en fonction de son âge, a une forme caractéristique, l'allure générale de cette fonction est représentée par la « courbe dite « en baignoire », présentée en Figure 2 . Le taux de défaillance s'exprime en FIT (*Failure In Time*) en nombre de panne par heure et par composant. Le nombre de FITs est une unité de mesure usuelle du taux de défaillance d'un lot de composant (h^{-1}.composant^{-1}) et 1 FIT correspond à une défaillance pour 10^9 heures cumulées de fonctionnement.

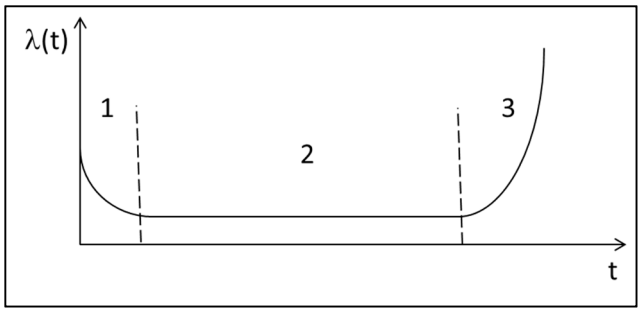


Figure 2 : Taux de défaillance en fonction du temps présentant trois périodes. Courbe dite « en baignoire ».

On distingue trois phases :

- Une première phase dite « période de jeunesse » ou période de mortalité infantile due à des erreurs de fabrication ou de conception des composants. Le taux de défaillance d'abord très élevé, décroit rapidement. Cette phase peut ne pas être présente dans le cas de composants déverminés. Le déverminage consiste à appliquer une séquence de contraintes environnementales sur les composants en sortie de chaine de fabrication. Cela a pour but d'éliminer les défauts présents dans cette période « de jeunesse » dans une production donnée de composants électroniques.
- Une deuxième phase où le taux de défaillance est constant et généralement peu élevé. Cette période correspond à des défaillances aléatoires. Une valeur anormalement haute du taux de défaillance sur cette phase traduit généralement une mauvaise maîtrise du procédé de fabrication.
- La dernière phase est caractérisée par un taux de défaillance croissant de manière rapide. Les défaillances sont dues à l'usure, ou à des dégradations matériaux. Elle marque la fin de vie utile du dispositif.

2.4 Principales lois de fiabilité

La préoccupation principale de la fiabilité est de prédire la probabilité d'occurrence d'une défaillance ou d'un système (panne). Ceci se fait en établissant une loi de fiabilité. Nous allons aborder les deux lois principales utilisées dans ce domaine : la loi exponentielle et la loi de Weibull.

2.4.1 Loi exponentielle

Cette loi s'applique à des dispositifs fonctionnant sans usure. Ces dispositifs sont, par exemple, la majorité des composants électroniques, circuits intégrés, semi-conducteurs Si. Ils sont caractérisés par un taux de défaillance λ constant. Cela correspond à la région 2 de la courbe en baignoire (Figure 2).

Le taux de défaillance étant égal à une constante λ, on obtient facilement la fonction de survie :

$$R(t) = e\left[-\int_0^t \lambda du\right] = e^{-\lambda t} \qquad \textbf{Équation 4}$$

Par $F(t)=1-R(t)$, on en déduit donc la fonction de défaillance cumulée $F(t)=1-e^{-\lambda t}$, d'où $Ln[1-F(t)]=-\lambda t$.

Si l'échantillon est représentatif de la population, le tracé de $Ln[1-F(x)]$ en fonction de t présentera des points expérimentaux alignés. La détermination de la pente de la droite appliquée à cette dernière équation permet d'estimer la valeur de λ .

2.4.2 Loi de Weibull

La loi exponentielle s'applique aux dispositifs dont le taux de défaillance peut être considéré comme constant, au moins sur la période de vie utile. Or, cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée. Dans ce contexte, cette loi empirique proposée en 1951 par le mathématicien suédois Weibull, permet de représenter la fiabilité de dispositifs dont le taux de défaillance évolue avec le temps.

La fonction de défaillance cumulée de Weibull est définie par :

$$F(t) = 0 \quad \forall\ t < \gamma$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \forall\ t \geq \gamma \qquad \textbf{Équation 5}$$

La fonction de répartition de cette loi dépend de trois paramètres positifs β, γ, et η.

- γ est un paramètre de position qui a la même dimension que t. Il permet une translation sur l'axe des temps (Il peut être égal à 0).
- η est un paramètre d'échelle, et est parfois appelé caractéristique de vie de la distribution,
- β est un paramètre de forme, sans dimensions.

En prenant γ= 0 le taux de défaillance pour la loi Weibull est égal à :

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \qquad \textbf{Équation 6}$$

Le taux de défaillance peut présenter différentes tendances :

- Décroissant si $\beta < 1$, correspondant à la période de défaillances précoces, période de rodage.
- Constant si $\beta = 1$, correspondant à la loi exponentielle.
- Croissant si $\beta > 1$, dispositifs soumis à l'usure.

2.5 Fiabilité d'un système

2.5.1 Fiabilité de type série

Un système à structure série est caractérisé par la propriété suivante : la défaillance d'un composant entraîne la défaillance du système.

Soit R la fiabilité du système, R_i celle du composant i. Si les défaillances sont supposées être indépendantes entre elles, on obtient pour la fiabilité R du système :

$$R_{serie}(t) = R_1(t).R_2(t)x...xR_n(t) \qquad \textbf{Équation 7}$$

La fiabilité d'un système à structure série est donc toujours plus faible que celle de son composant le plus faible. L'exemple typique est celui d'un résultat issu d'une suite de processus consécutifs. Si un processus est défaillant, le résultat ne peut aboutir.

2.5.2 Fiabilité de type parallèle

Un système à structure parallèle est défaillant si tous ses composants sont défaillants. Cette propriété se traduit par la relation :

$$R_{para}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - Ri(t)] \qquad \textbf{Équation 8}$$

La fiabilité d'un système à structure parallèle est toujours supérieure à celle de son composant le plus sûr. L'exemple typique est celui des systèmes de sauvegarde d'information, qui réalisent plusieurs sauvegardes parallèles afin de garantir un haut niveau de fiabilité.

2.5.3 Application au cas des modules de LEDs multi-puce

Une des problématiques de l'association de LED en module multi-puce réside dans leur comportement en fiabilité. Si l'on considère le critère de défaillance L_{70}, un module de LEDs multi-puce connecté électriquement en série présente un comportement mixte au sens de la fiabilité. En effet, en fonction du mode de défaillance, et si l'on fait l'hypothèse que les puces présentent le même comportement dans le temps, un module tendra soit vers un comportement série, soit parallèle au sens de la fiabilité :

- Une défaillance catastrophique au sein d'une puce entraînera la défaillance du module ; c'est le comportement série au sens de la fiabilité. Ce comportement est généralement lié à un cout-circuit de jonction ou circuit ouvert.
- Une défaillance graduelle d'une puce n'entrainera pas systématiquement la défaillance du module ; c'est le comportement parallèle au sens de la fiabilité. L'ensemble du flux lumineux du module reste supérieur à 70% du flux initial si une seule puce franchit le critère de défaillance de manière graduelle.

Le comportement en fiabilité de modules à LEDs multi-puce dépend donc du mode de défaillance. Ces comportements seront pris en compte lors de l'extraction des paramètres de fiabilité.

3 Méthodologie appliquée et définition des tests

3.1 Méthodologie appliquée

Le résultat des tests de fiabilité est très dépendant des conditions de vieillissement choisies. Si l'on applique un niveau de contrainte trop élevé, cela engendrera vraisemblablement des défauts, mais sans garantie que ceux-ci soient la conséquence d'un mécanisme de vieillissement dans des conditions normales d'utilisation. Nous utiliserons dans ce manuscrit le terme « sur-accélération ». Un stress trop faible permet de visualiser des défauts représentatifs d'un composant en vieillissement, mais il n'est généralement pas possible d'obtenir des résultats dans des temps raisonnables.

La définition d'une méthodologie résulte donc d'un compromis. Celle développée dans ce manuscrit est basée sur les méthodes des tests accélérés. Le concept d'accélération en fiabilité peut être décrit comme l'ensemble des actions mises en place dans un processus pour faire apparaître en laboratoire (de façon expérimentale), dans un composant ou un système, des défauts identiques à ceux susceptibles d'apparaître en fonctionnement normal (sur le terrain) et ce, dans un temps de fonctionnement plus court.

On peut donc dire que l'accélération « idéale », du point de vue expérimental pour la génération de défaut dans un composant ou un système électronique, est une homothétie de son profil de mission dans les limites de ses spécifications. Cependant, dans le cas des LEDs pour l'automobile, même en se plaçant à des points de fonctionnement sévères (valeurs maximales admissibles de courant et température), il est difficile d'obtenir des résultats dans des temps compatibles avec un projet de thèse.

L'étude de robustesse, détaillée en chapitre 3, a permis de dégager les marges opérationnelles de fonctionnement des composants au-delà de leurs spécifications. Cela va nous permettre d'ajuster les niveaux de contraintes pour l'étude de fiabilité, avec des conditions de vieillissements en régime accéléré mais garantissant la mise en jeu de mécanismes de dégradation comparables à ceux mis en jeu dans le profil de mission automobile. Comme développé au chapitre 3, le principal risque identifié quant à l'utilisation des LEDs en automobile est la température ; le cœur de l'étude portera donc sur des vieillissements en température.

D'un point de vue pratique, il s'agira d'appliquer une température au composant en fonctionnement. Les tests de fiabilité seront réalisés sur plaque chauffante au moyen d'un outil approprié pour assurer l'alimentation électrique. Nous considérerons que le système d'alimentation des LEDs ne subit pas de vieillissement. Un suivi de la consigne de courant ainsi qu'une caractérisation des alimentations ont été réalisées et les résultats seront explicités en partie 4.1.

Pour quantifier l'accélération générée par l'application d'une certaine température par rapport à la température de fonctionnement « normale » du composant, le modèle le plus fréquemment utilisé est le modèle d'Arrhenius. Ce modèle, à l'origine utilisé pour l'étude des réactions chimiques activées thermiquement, a été « détourné » de son utilisation première pour être appliqué de façon plus large à de nombreux phénomènes activés en température.

Il se résume à la loi d'Arrhenius, qui est la suivante :

$$C_T = A.e^{-\frac{Ea}{k_B T}} \qquad \textbf{Équation 9}$$

avec :

- C_T : coefficient de vitesse de la réaction.
- A qui est une constante.
- k_B qui est la constante de Boltzmann en $eV.K^{-1}$.
- E_a : l'énergie d'activation (énergie nécessaire à activer le processus de dégradation) en eV.
- T : La température en K.

Dans notre cas, C_T est assimilable à un critère de défaillance. On peut alors décrire la durée de vie à la température T par :

$$L_T = k_T . e^{\frac{-Ea}{k_B T}} \qquad \textbf{Équation 10}$$

avec $k_T \propto \frac{1}{A}$.

Le facteur d'accélération (AF) se déduit de la façon suivante :

Soient L_{T0} la durée de vie en conditions opérationnelles et $L_{Tstress}$ la durée de vie en conditions accélérées, définies comme :

$$L_{T0} = k_T \times e^{\frac{-Ea}{k_B T_0}} \qquad \textbf{Équation 11}$$

$$L_{T_{stress}} = k_T \times e^{\frac{-Ea}{k_B T_{stress}}} \qquad \textbf{Équation 12}$$

Alors :

$$AF = \frac{L_{T_0}}{L_{T_{stress}}} = e^{\frac{Ea}{k_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{stress}}\right)} \qquad \textbf{Équation 13}$$

Ainsi, pour définir l'accélération, il faut définir l'énergie d'activation. Pour l'extraire, on écrit l'équation de la façon suivante :

$$\ln(L_T) = \frac{Ea}{k_B T} + \ln(k_T) \qquad \textbf{Équation 14}$$

On obtient alors une fonction affine dont il suffit de calculer le coefficient directeur pour déduire E_a.

Expérimentalement, cela se résume à la démarche suivante :

- Réalisation de trois tests à des températures adaptées et différentes. Pour valider ou non la linéarité des points, il faut donc un minimum de trois points T_1, T_2, T_3.
- Détermination d'un critère de défaillance.
- Relevé des durées de vie (L_{Tx}) déterminées par le temps mis par les composants pour atteindre ce critère de défaillance à chaque température.
- Tracé des L_{Tx} en fonction de 1/T et détermination du coefficient directeur de la droite.

Dans cette étude, le critère de défaillance est défini ainsi : un module multi-puce est défaillant si sa puissance optique (P_{opt}) passe le seuil de 70 % de la puissance optique initiale ou s'il perd la fonctionnalité d'une puce en tant que LED.

Dans la définition de l'énergie d'activation, on peut entrevoir une contrainte supplémentaire à cette méthode. En effet, l'énergie d'activation est l'énergie qu'il faut apporter à un système pour démarrer une réaction donnée (ou dans notre cas, générer un défaut). On comprend alors qu'à chaque type de défaut, va correspondre une énergie d'activation. Sur un système complexe comme celui d'un module LEDs multi-puce, il n'est pas rare que plusieurs mécanismes de dégradation se superposent et entrent en compétition pour générer un défaut. Nous verrons donc dans la suite du manuscrit comment nous pourrons détecter et traiter en terme de fiabilité, la mise en jeu de plusieurs mécanismes de dégradation.

3.2 Définition des tests de fiabilité

Le choix des températures de vieillissement a été détaillé et argumenté en regard des comportements observés en robustesse, plus précisément vis à vis des marges opérationnelles définies sur les composants étudiés. Le Tableau 1 résume les trois conditions retenues pour la campagne de test de vieillissements accélérés.

Se pose maintenant le choix des intervalles de temps de test entre deux reprises de mesure. Compte tenu des constantes de temps liées aux phénomènes de dégradations et comme préconisé par la norme LM80, les dates de reprises ont été assez simplement placées toutes les 1000 heures de vieillissement. Cependant, la bibliographie montre que, comme dans beaucoup de cas de vieillissement de matériaux III-V comme le GaN mais aussi l'GaAs et l'InP, des phénomènes particuliers apparaissent durant les toutes premières heures de vieillissements [5] [6] [7]. Nous avons donc décidé d'appliquer une surveillance accrue sur les mille premières heures de test, en réalisant des mesures de reprise plus rapprochées, comme décrit dans le Tableau 2.

Condition	Température T_{plaque} (°C)	Courant I_f (A)	Nombre de composants TFFC	Nombre de composants VTF
1	105	1	10 (Lot TFFC1)	10 (Lot VTF1)
2	125	1	10 (Lot TFFC2)	10 (Lot VTF2)
3	145	1	10 (Lot TFFC3)	10 (Lot VTF3)

Tableau 1 : Définition des tests de vieillissement accélérés en température.

Reprise de mesure	0h	24h	48h	96h	168h	500h	1000h	2000h.....6000h	
Electrique	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Optique	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Thermique	x								x
Photographie	x								x
Luminescence à bas courant	x								x

Tableau 2 : Détail des reprises de mesures effectuées au cours des vieillissements accélérés en température.

3.3 Conception du banc de vieillissement

Les tests de vieillissements accélérés sont pris en charge par le banc de test de l'étude, présenté en chapitre 2. Chaque condition de vieillissement est constituée de deux bancs de test (un pour chaque technologie) qui accueillent chacun dix composants. Ces deux bancs de tests sont disposés sur une plaque chauffante commune. L'alimentation de chaque composant est assurée par un régulateur de courant à I_f= 1 A. Les dix régulateurs de courant sont connectés à une alimentation extérieure 220 VAC/ 24 VCC de 300 W. Le schéma du banc de vieillissement est présenté en Figure 3.

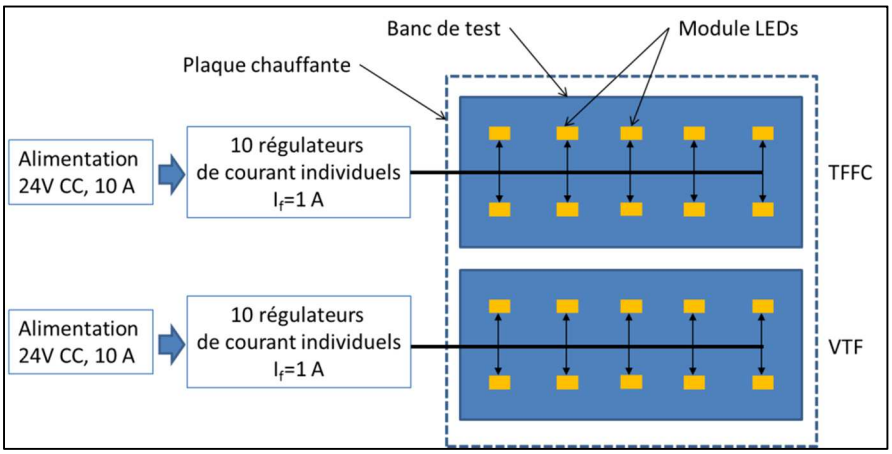


Figure 3 : Schéma de principe de l'utilisation du banc de test en configuration vieillissement.

Les modèles de régulateurs de courant commerciaux utilisés sont les A009 D V 1000 de LuxDrive®. Nous avons tout d'abord caractérisé électriquement les régulateurs de courant afin de garantir l'absence de « pic » de courant dans les LEDs à l'allumage du système. Le V_f aux bornes d'un module multi-puce est présenté en Figure 4 lors de l'allumage et permet de valider ce point. De plus, nous considérons que le système d'alimentation n'a pas subi de vieillissement au cours du temps. Le suivi du courant dans les LEDs a été réalisé sur trois régulateurs afin de garantir une stabilité du courant dans le temps. Aucune dérive de courant vers des valeurs hautes (I_f > 1 A) n'a été enregistrée sur 6000h de vieillissement.

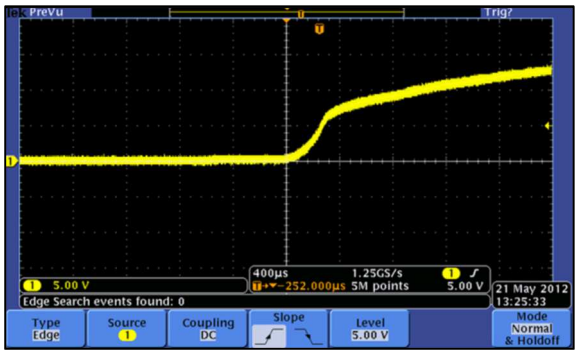


Figure 4 : Chronogramme du V_f aux bornes d'un module LEDs multi-puce à la mise en route du système montrant l'absence de « pic » de tension.

3.4 Suivi des LEDs témoins

Le suivi des paramètres électro-optiques de composants dans le temps nécessite de mettre en œuvre un système de mesure stable, calibré et maîtrisé d'un point de vue métrologique. Deux composants de chaque référence ont été identifiés comme témoins de l'étude. Ils ont été caractérisés à chaque reprise de mesure mais ne subissent pas de vieillissement (stockage « sur étagère »). On supposera donc que leurs paramètres électro-optiques n'évoluent pas dans le temps. Le Tableau 3 présente l'amplitude maximale des mesures optiques (P_{opt}) et électriques (R_s) au cours de la période de vieillissement en fiabilité, de Janvier 2013 à Mai 2014.

Composant témoin	TFFC 28	TFFC 87	VTF 87	VTF 103
Variation de P_{opt} (%)	±2,8%	±3%	±3,3%	±3,5%
Variation de R_s (%)	±0,2%	±0,2%	± 0,7%	±1,3%

Tableau 3 : Variations maximales des mesures optiques et électriques appliquées aux quatre modules témoins mesurés entre Janvier 2013 et Mai 2014.

4 Résultats pour les modules VTF

Nous venons de décrire les bases de l'étude de fiabilité, depuis des rappels de fiabilité à la description du banc de vieillissement en passant par la méthodologie adoptée permettant d'extraire les paramètres de fiabilité d'une campagne de tests accélérés. Abordons maintenant les résultats au niveau système de cette étude, avec tout d'abord, la technologie VTF. Le niveau système permet d'assimiler un module multi-puce à une source unique de lumière sans discriminer les quatre puces le constituant. Après une présentation des résultats, un bilan sera dressé quant aux évolutions paramétriques observées et des hypothèses seront émises sur l'origine des dégradations. Les analyses de défaillance seront ensuite détaillées et confrontées aux hypothèses. Enfin les paramètres de fiabilité seront extraits et permettront d'estimer la durée de vie en environnement automobile.

4.1 Evolutions paramétriques

Les évolutions paramétriques de la technologie VTF sont présentées ci-après. Cette partie s'attache à présenter les résultats « bruts » des mesures afin d'apprécier les évolutions, dispersions et comportements des trois lots VTF en vieillissement. Pour chaque paragraphe, l'évolution paramétrique d'un module représentatif de la population sera analysée puis nous étendrons l'analyse à la population étudiée.

4.1.1 Mesures optiques

La Figure 5 présente l'évolution du spectre du module VTF 20 en fonction du temps, vieilli sous la condition intermédiaire T_{plaque}= 125 °C et présentant un flux optique total à 6000 h situé à la médiane du flux du lot VTF 2. Sachant que les variations paramétriques enregistrées sont similaires sur les trois conditions de vieillissement, nous considérerons ce module comme représentatif de la population VTF étudiée. Notons une diminution des puissances optiques P_{bleue} et P_{jaune} au cours du temps. L'évolution de la longueur d'onde centrale du pic bleu sera discutée lors des analyses croisées.

Les mesures optiques sont présentées dans le Tableau 4. Elles sont normalisées par rapport aux valeurs initiales en vue des futures extractions de paramètres de fiabilité. Ce tableau regroupe l'ensemble des conditions de vieillissement (températures T_1, T_2, T_3) ainsi que les paramètres optiques suivis au cours du temps, à savoir les puissances optiques, totale bleue et jaune, respectivement P_{opt}, P_{bleue} et P_{jaune}, ainsi que le rapport Y/B.

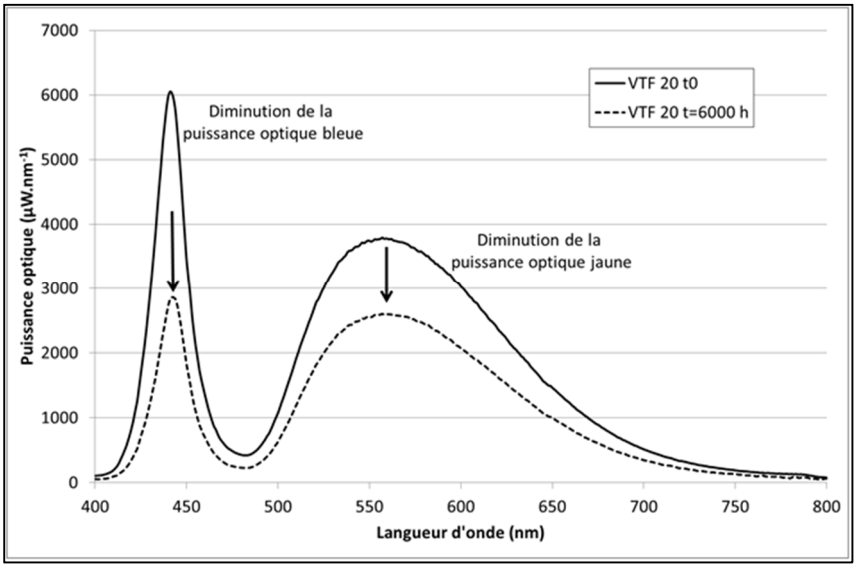


Figure 5 : Evolution du spectre optique du module VTF 20 entre 0 et 6000 h.

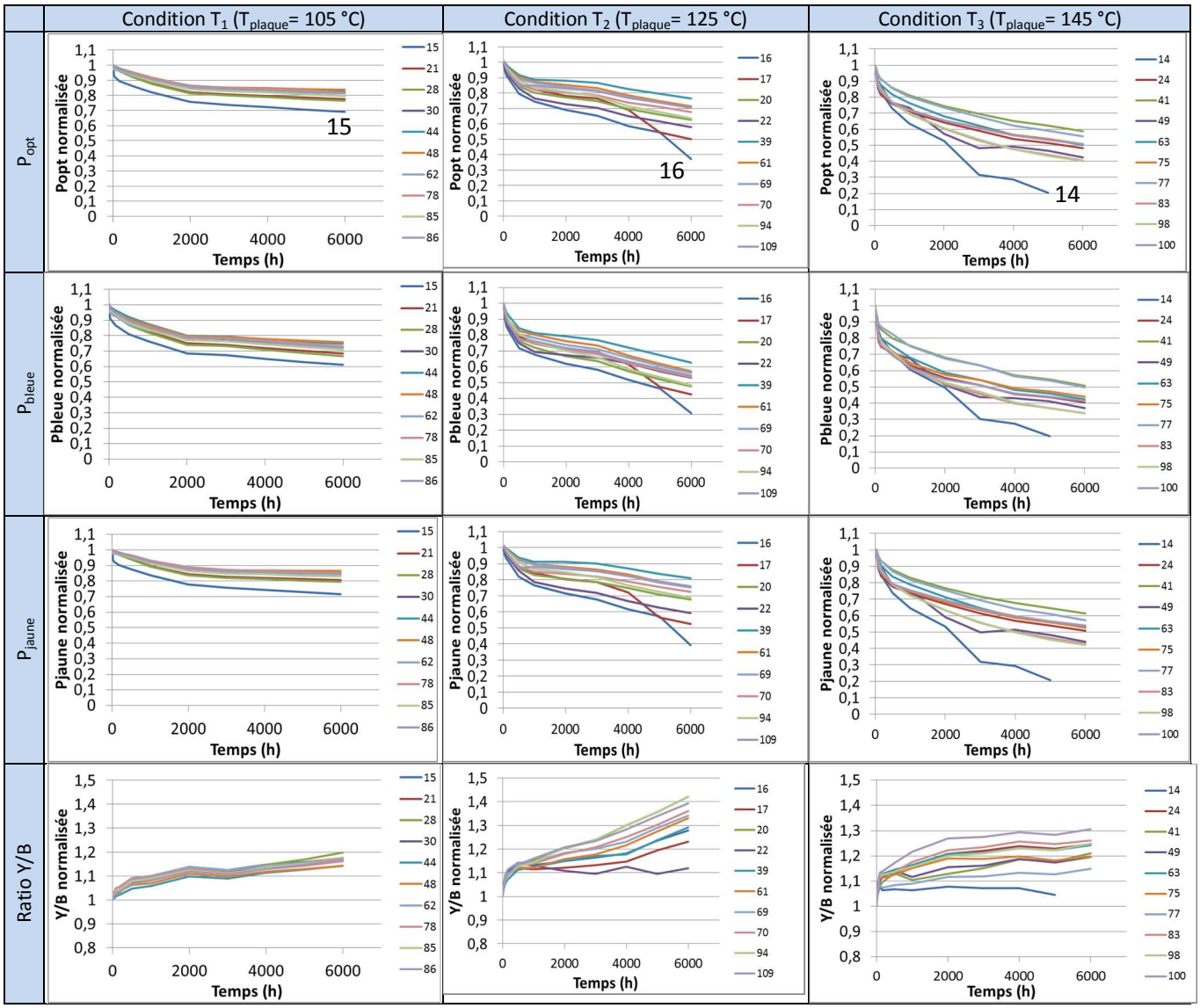


Tableau 4 : Bilan des mesures optiques au cours du vieillissement de la technologie VTF.

Le suivi du flux optique montre une dérive graduelle de l'ensemble des modules qui ont franchi le crièrtère L_{70}. Le mode de défaillance de la technologie VTF est donc de type dérive.

Si l'on considère tout d'abord l'ensemble des 6000 h de vieillissement, la perte du flux optique P_{opt} montre une accélération en fonction de la température de vieillissement T_{plaque}. Ensuite, si l'on analyse plus finement les évolutions, on remarque que les vitesses de décroissance de P_{otp} dépendent du temps. A titre d'exemple, on peut discriminer trois cinétiques de vieillissements par trois zones sur le vieillissement à la température T_{plaque}= 125 °C (Figure 6). Le constructeur a publié un document traitant de ces phases typiques du vieillissement de leurs LEDs [6] : tout d'abord, une décroissance rapide que l'on attribue à la stabilisation initiale des composants, située entre 0 et 1000 h de vieillissement (zone 1). Ensuite une dégradation « normale » de 1000 à 3000 h (zone 2), puis une dégradation à long terme, de 3000 à 6000 h (zone 3). La distinction de ces trois zones présentant des cinétiques différentes permettent d'émettre l'hypothèse qu'au moins trois mécanismes de dégradation sont en compétition et contribuent à la perte de flux de la technologie VTF dans le temps. En supposant que les cinétiques sont accélérées par la température T_{plaque}, le vieillissement à 105 °C révèle seulement les zones 1 et 2, et le vieillissement à 145 °C reflète uniquement un vieillissement de type « zone 3 », les mécanismes de dégradation relatifs aux zones 1 et 2 étant masqués.

L'analyse des puissances optiques P_{bleue} et P_{jaune} met en évidence une décroissance plus rapide de la contribution « bleue » par rapport à la « jaune », et ce pour les trois conditions de vieillissement. Malgré que P_{jaune} soit une conversion d'une partie de P_{bleue} incidente, nous avançons deux hypothèses : soit la puce voit son efficacité décroître plus rapidement que la conversion jaune, soit la couche de conversion optique de luminophore dispersé dans un silicone voit son rendement d'extraction augmenter par l'apparition de fissures comme constaté en robustesse. Ces évolutions de puissance optiques entraînent logiquement une augmentation du rapport Y/B dans le temps. Cette dérive du point de couleur vers le jaune peut être corrélée à l'évolution de la température proximale de couleur, plus connue dans le domaine, par « température de couleur ». Cela peut constituer un indicateur simple de dérive de température de point de couleur par l'analyse du spectre. L'exemple donné en Figure 7 est celui de la LED VTF 109. Il est ainsi possible d'établir une correspondance entre le rapport Y/B et la dérive de température de couleur égale à -17 $K.\%^{-1}_{Y/B}$.

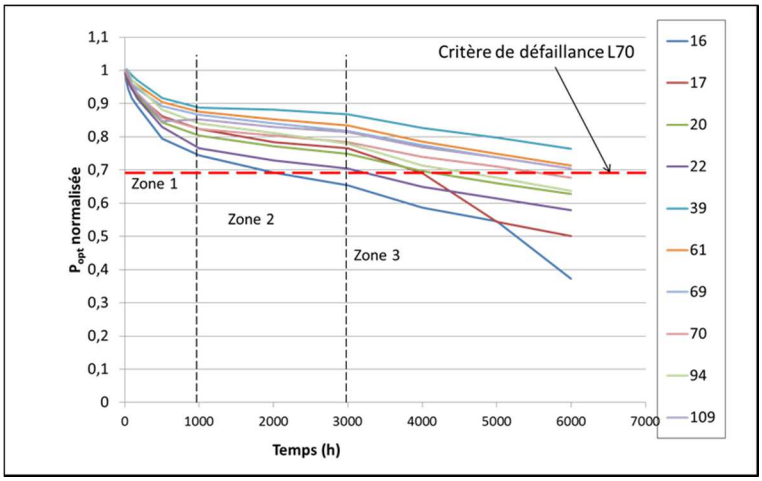


Figure 6 : Détail du vieillissement de la technologie VTF à T_{plaque}= 125°C. Mise en évidence de trois cinétiques spécifiques de dégradation.

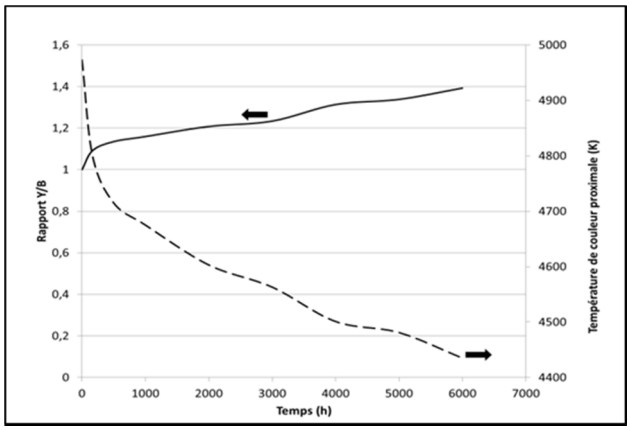


Figure 7 : Correspondance entre le rapport Y/B et l'évolution de la température de couleur proximale du module VTF 109 en fonction du temps après vieillissement à T_{plaque}=125 °C.

4.1.2 Mesures électriques

La Figure 8 présente l'évolution du spectre du module VTF 39 en fonction du temps. Il a vieilli en condition intermédiaire T_2 (T_{plaque}= 125 °C) et présente une valeur de résistance R_s à 6000 h situé à la médiane du lot VTF 2 à ce même temps de vieillissement. Sachant que les variations paramétriques enregistrées sont similaires sur les trois conditions de vieillissement, nous considérerons ce module comme représentatif de la population VTF étudiée. On note tout d'abord une nette augmentation des courants liés à la barrière Schottky en zone 2 et 3, respectivement pour les contributions des

courants I_{ET} et I_{ETE}. Cette augmentation du niveau de courant s'élève jusqu'à 2,5 décades à +6 V. La modification majeure est le changement de pente du courant I_{ET} sur la zone 2. Cette évolution peut se rapporter à une modification de la concentration de dopants au voisinage des contacts par la contribution de E_{00} [5] [8]. D'autre part, on constate une stabilisation de la valeur de R_p autour de 100 MΩ, contre 100 GΩ au départ. Enfin, une stabilité des paramètres V_{th} et R_s est mise en évidence à fort niveau d'injection (courbes inchangées).

L'évolution des paramètres électriques des modules VTF en vieillissement est présentée dans le Tableau 5. Il regroupe les évolutions de R_p, R_s et V_{th} en fonction du temps pour chaque condition de vieillissement.

Le suivi de R_p en fonction du temps montre une stabilisation de sa valeur à environ 1.10^8 Ω après vieillissement. La cinétique de stabilisation semble ne pas être dépendante de la température car ce « plateau » est atteint après 1000 h de vieillissement et ce, pour les trois conditions de vieillissement. La résistance de fuite R_p traduit généralement les effets de conduction par les bords de puce [8] [9] [10]. Ces derniers et plus largement les fuites au sein de la technologie VTF présentent une bonne stabilité (structurale et chimique) dans le temps. Concernant le suivi de la résistance R_s, si on s'intéresse à la tendance des trois lots en vieillissement, aucune évolution n'est constatée pour les vieillissements à la température 105°C et 125°C. Pour le vieillissement à 145°C, une légère augmentation est enregistrée. En écartant le module VTF 14, qui présente une dérive différente du lot, la moyenne des valeurs de R_s de ce lot présente une augmentation de 8 % entre t= 0 et 6000 h. Cette augmentation de la résistance R_s est liée à une dégradation d'une partie du chemin électrique dans la structure VTF (contacts sur le semi-conducteur). Notons que les modules VTF 14 et 16 présentent une augmentation de la résistance R_s plus prononcée que les autres modules de leur lot respectif. Cette augmentation entrainera une charge thermique plus importante au sein du composant ce qui présentera un argument supplémentaire quant aux origines des dérives observées, lors des analyses de défaillance.

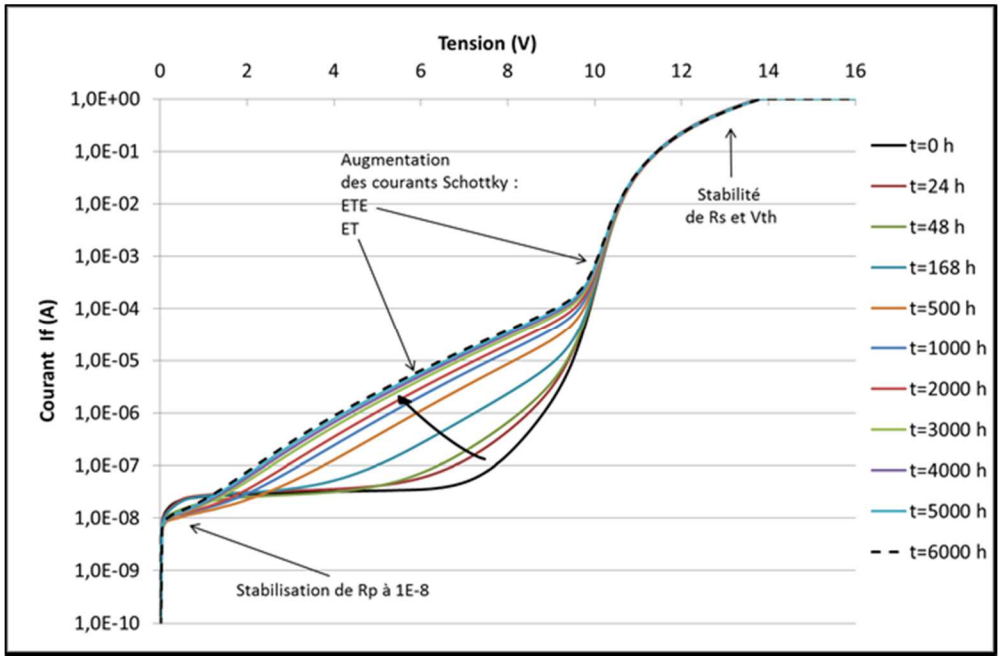


Figure 8 : Evolution de la caractéristique I(V) du module VTF 39 entre 0 et 6000 h, après vieillissement à la température T_{plaque}=125 °C.

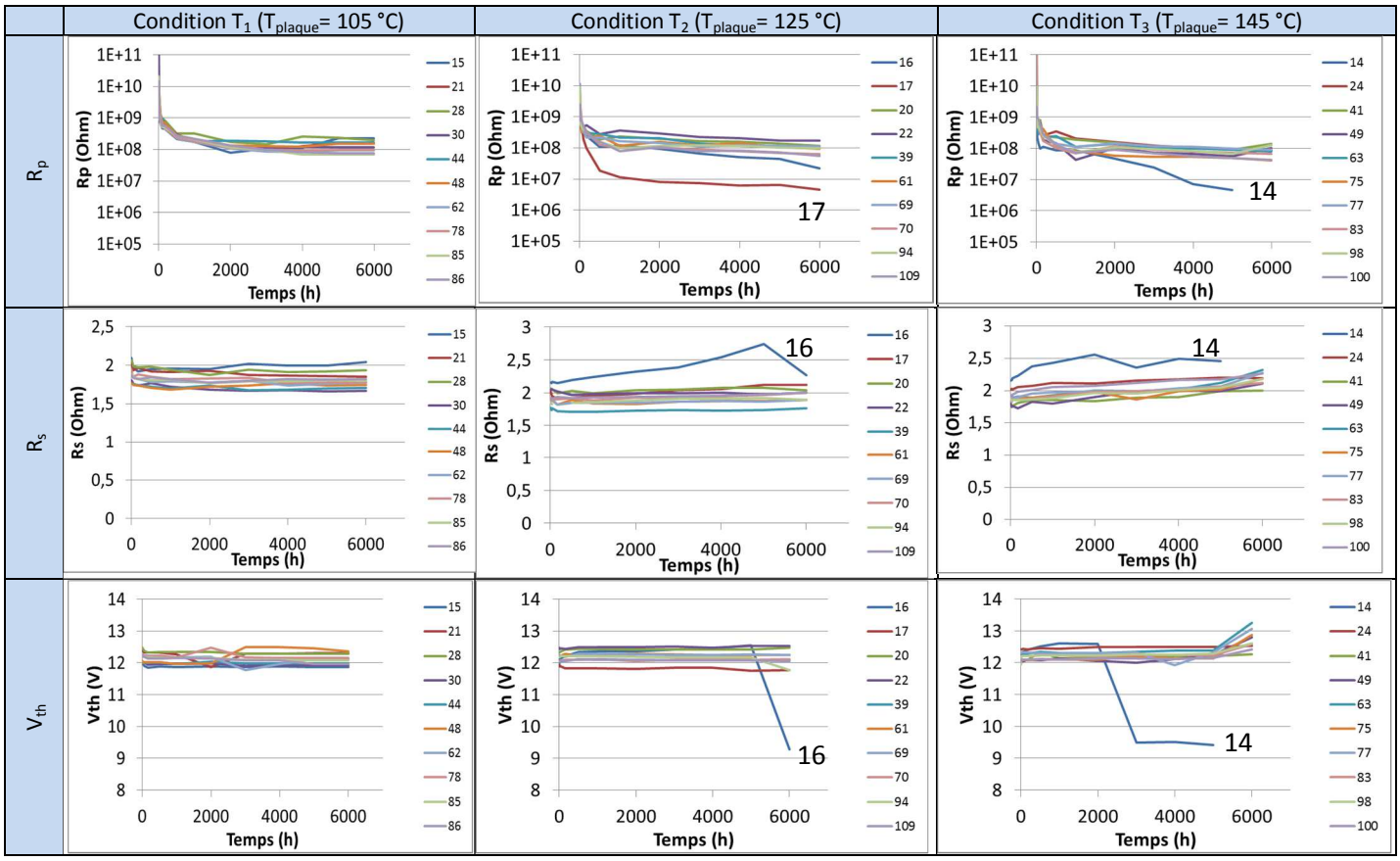


Tableau 5 : Bilan des mesures électriques au cours du vieillissement de la technologie VTF.

Enfin, la tension V_{th} des modules VTF ne présentent aucune évolution sur la majorité des composants, sauf modules 14 et 16 qui ont perdu la fonctionnalité d'une puce en tant que LED. Nous avons montré que les contacts sur les LEDs à base de GaN présentent des comportements liés à la présence d'une barrière de potentiel Schottky. La modification éventuelle de la tension V_{th} au cours du temps aurait pu être la signature d'une dégradation des contacts. Or, la stabilité de la tension V_{th} conforte l'hypothèse d'une bonne stabilité de l'interface métal/semi-conducteur et des prises de contacts N et P dans le temps.

Deux modules présentent des comportements atypiques. La valeur de tension V_{th} des modules VTF 14 et 16 a chuté chuter brusquement pour se stabiliser autour d'une valeur située à 9,5 V. Le caractère brutal de cette dérive de V_{th} est dû à la perte d'une puce au sein du module. Les analyses de défaillance permettront de confirmer clairement ce point. Notons que cette variation brusque du paramètre V_{th} n'aura pas d'incidence sur l'extraction de paramètres de fiabilité car elle apparaît après le passage du critère de défaillance, défini dans cette étude à 70 % du flux optique initial (L_{70}). De plus, suite à la perte de fonctionnalité d'une puce, la valeur de R_s est conservée. Nous avons donc à faire à un court-circuit de jonction.

4.1.3 Mesures thermiques

Les mesures thermiques transitoires effectuées à la fin des vieillissements n'ont pas été effectuées sur tous les composants VTF et ce pour deux raisons : d'une part certains composants présentent des instabilités sur la mesure de V_f à 1 mA (courant de mesure) dont l'origine n'a pas été identifiée et d'autre part les composants VTF 14 et 16 ont perdu la fonctionnalité d'une puce en tant que LED ce qui rend impossible la mesure thermique (écoulement thermique modifié au sein de la structure). Les évolutions mesurées (moyennes) par rapport aux mesures initiales sont faibles et en

limite de la reproductibilité de la mesure (± 2,6%). Cependant, les résultats révèlent une tendance à l'amélioration de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ sur les trois conditions de vieillissement (moyennes). Les valeurs sont également plus dispersées qu'initialement. La Figure 9 donne l'exemple d'un cas atypique de dégradation de la résistance $R_{thj\text{-}puits.}$ Cette dégradation est identifiée comme étant localisée aux premiers niveaux de la structure puce ou brasure. Cette localisation est confirmée par analyse comparative en radiographie X, comme indiqué en Figure 10.

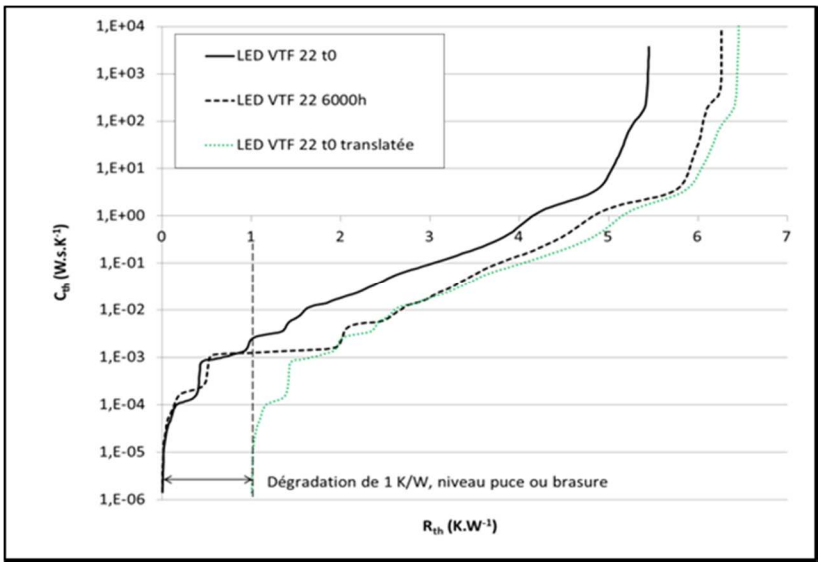


Figure 9 : Comparaison des tracés $R_{th}(C_{th})$ du module VTF 22 avant et après 6000 h de vieillissement à T_{plaque} = 125 °C.

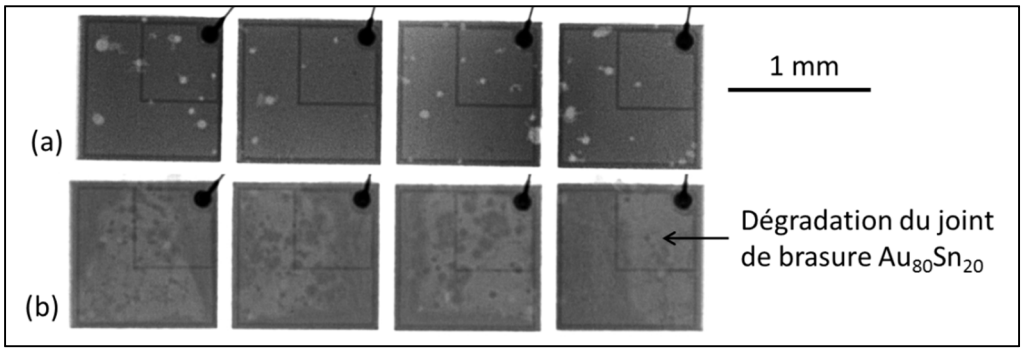


Figure 10 : Mise en évidence par radiographie X de fortes dégradations au niveau brasure de puce de la structure VTF. (a), module neuf et (b), module VTF 22 après 6000 h de vieillissement à T_{plaque} = 125 °C.

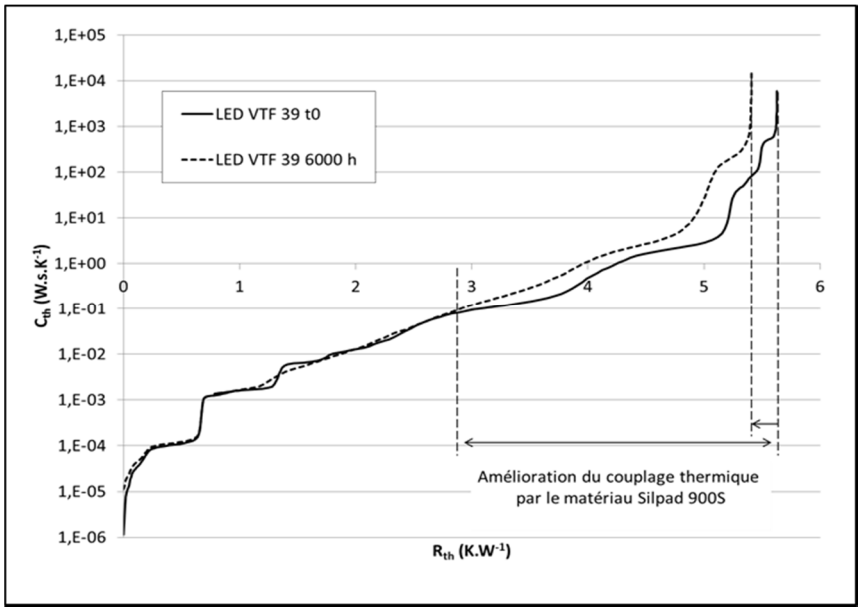


Figure 11 : Comparaison des tracés $R_{th}(C_{th})$ du module VTF 39 avant et après 6000 h de vieillissement à T_{plaque} = 125 °C.

La Figure 11 illustre l'autre cas atypique d'une amélioration, identifiée au niveau de l'interface thermique entre le composant et le banc de test (matériau Silpad 900S).

Les mesures thermiques sont synthétisées en Tableau 6. On notera une dispersion plus importante des mesures à t= 6000 h et une tendance à l'amélioration de la valeur $R_{thj\text{-}puits}$ de la technologie VTF. Nous pouvons affirmer que statistiquement, la valeur de $R_{thj\text{-}puits}$ des modules VTF dans le temps n'a pas subi de variations. Les moyennes calculées sur les composants en fin de vieillissement montrent même une tendance à une réduction de la valeur de $R_{thj\text{-}puits}$. Cette amélioration de la résistance $R_{thj\text{-}puits}$ serait due à une stabilisation de l'interface thermique module/banc de test.

	Condition T_1 (T_{plaque}= 105 °C)	Condition T_2 (T_{plaque}= 125 °C)	Condition T_3 (T_{plaque}= 145 °C)
Moyenne des $R_{th\ J\text{-}puits}$ initale ; Ecart-type	5,31; 0,15	5,76; 0,35	5,87; 0,14
Nombre de composants exploitables après vieillissement	10/10	8/10	9/10
Moyenne des $R_{th\ J\text{-}puits}$ à t=6000 h; Ecart-type	5,28 ; 0, 17	5,60 ; 0,42	5,72 ; 0,26
Evolution de $R_{thj\text{-}puits}$ en % entre t=0 et t=6000 h (moyenne)	-0,56 %	-2,8 %	-2,5 %

Tableau 6 : Synthèse des mesures de $R_{thj\text{-}puits}$ sur les lots VTF après vieillissement à 6000 h.

4.1.4 Bilan, analyses croisées et hypothèses

L'analyse des mesures a permis de caractériser l'évolution des paramètres physiques des modules de LEDs VTF dans le temps. Les évolutions des paramètres optiques, électriques et thermiques vont maintenant être discutées et croisées afin de dégager des hypothèses quant aux mécanismes possibles de dégradations.

Commençons par les paramètres thermiques. Le premier point est la stabilité de la $R_{thj\text{-}puits}$ au cours du temps pour la plupart des modules VTF. On peut donc affirmer que l'évolution de la $R_{thj\text{-}puits}$ n'a pas contribué à un emballement thermique des composants. Ce n'est donc pas l'origine des pertes de flux observées. Après analyse de défaillance, aucune modification majeure n'a été observée le long du chemin thermique depuis la puce jusqu'au puits thermique et lors des micro-sections des modules VTF, excepté pour les modules VTF 14, 16 et 22. En effet, pour le module 22, la

mesure thermique transitoire a révélé une dégradation de la résistance thermique du niveau puce/brasure estimée à 1 $K.W^{-1}$ (Figure 9). On s'attend à constater une dégradation du joint de brasure $Au_{80}Sn_{20}$ des puces lors des micro-sections. Concernant les modules 14 et 16, ils n'ont pas pu être caractérisés thermiquement. Le paragraphe suivant va permettre de dégager des hypothèses relatives aux mécanismes physiques de défaillance afin d'expliquer les comportements observés.

D'un point de vue électrique, la tendance à l'augmentation de la valeur de R_s de 8 % pour la condition haute uniquement à la température T_{plaque}= 145°C permet d'émettre l'hypothèse que cette dérive est thermiquement activée. Si l'on suit l'évolution de R_s pour les composants atypiques VTF 14 et 16 (Cf. Tableau 5), on constate une augmentation plus prononcée que les autres modules. Si l'on considère l'hypothèse précédente, cette dérive de R_s serait due à une augmentation de la température de jonction des puces, donc une augmentation potentielle de la $R_{thj\text{-}puits}$ globale du composant au cours du temps. Si cette hypothèse est vérifiée, des modifications morphologiques du chemin thermique pourront être observées. Pour la plupart des autres composants, la stabilité des valeurs de R_s et V_{th} reflètent un bon état des contacts et du chemin électrique de manière générale. Lors des micro-sections, on s'attend donc à constater peu ou pas de modification des contacts N et P sur le semi-conducteur GaN. Cependant, en lien avec la Figure 8, la caractéristique I(V) du module VTF 39, représentatif de la population en terme de I(V), montre une augmentation de I_{ET0} et η_1. Cela traduit une augmentation du niveau de courant par effet tunnel (I_{ET}). Cette contribution est due à une diminution de la barrière de potentiel métal/semi-conducteur dans la structure (Φ_B). La Figure 12 confirme ce point par des I(V) à différentes températures qui mettent en évidence une augmentation du niveau de courant avec la température tout en conservant la pente. En lien avec le modèle électrique présenté en chapitre 2, cette augmentation de I_{ET0} provient soit de l'augmentation de Φ_B soit de E_{00}, l'énergie caractéristique. Tous deux dépendent de la densité de dopants (Na). L'hypothèse avancée ici serait donc une migration des dopants ou d'éléments métalliques à proximité des contacts. En conséquence, la barrière Φ_B est abaissée et le niveau de courant I_{ET} plus important pour une même tension d'alimentation.

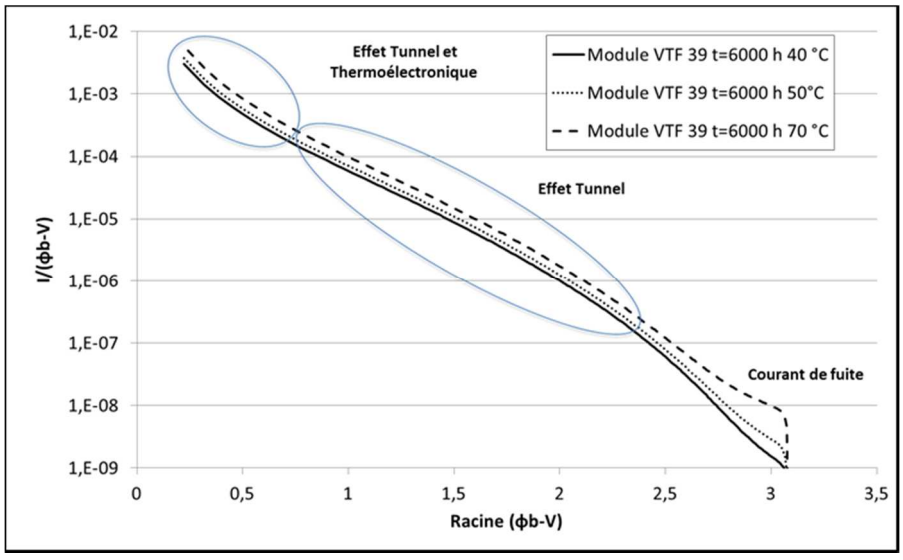


Figure 12 : Caractéristique I(V) en température sur le module VTF 39 à 6000 h. Mise en évidence de l'augmentation du courant par effet tunnel au cours du vieillissement.

Concernant les paramètres optiques, les composants étudiés présentent tous un mode de défaillance de type dérive (jusqu'à L_{70}) pour les puissances optiques, P_{opt}, P_{bleue} et P_{jaune}. Suite aux constatations thermiques et électriques, et l'état de l'art présenté en chapitre 1, les dérives

graduelles de flux dans les LEDs peuvent donc provenir de plusieurs contributions. Les pertes de flux bleu incident (puce) peuvent provenir de la création de défauts cristallins, dislocations ou diffusions de dopants à proximité des zones actives. Ces défauts thermiquement activés sont des centres de recombinaisons non radiatives et contribuent à la perte d'efficacité de la puce [9]. L'étude étant axée à un niveau système, la présence ou développement de ce type de défauts ne sera pas étudiée en analyse de défaillance. Les pertes de flux peuvent également provenir de la couche de conversion (luminophore + silicone). Le rendement de conversion peut diminuer dans le temps, soit par perte de rendement intrinsèque des luminophores, soit par une dégradation du silicone par dégradation de ses propriétés optiques : dégradation de l'interface luminophore/silicone ou changement d'indice optique local. En regard de l'évolution du ratio Y/B vers le haut au cours du temps, on peut penser que les mécanismes mis en jeu sont similaires à ceux observés en robustesse. Le vieillissement entraîne une amélioration de la conversion optique par le luminophore qui comprend l'absorption, la conversion et l'extraction. A puissance bleue incidente constante, la contribution jaune va être plus importante. Les hypothèses sont donc, soit une augmentation de l'extraction par texturation du luminophore (fissures), soit par une amélioration globale de la conversion, par stabilisation et/ou fin de réticulation du silicone [11] [12]. Des études sur le vieillissement physique des polymères à base de silicone (PDMS pour Polydiméthylsiloxane) ont confirmé l'existence d'une post-réticulation des matrices silicone lors de vieillissement en température et sous rayonnement ultra-violet [10] [13] [14]. Si l'on compare l'évolution du rapport Y/B pour les températures T_{plaque} de 125 et 145 °C, on constate une dérive moins importante à 145 °C (+ 30 %) qu'à 125 °C (+ 40 %). On peut donc intégrer le temps dans nos hypothèses : une première phase relative à l'augmentation du ratio Y/B correspond à une stabilisation de la couche de conversion, et une seconde phase liée à la dégradation intrinsèque des luminophores, visible uniquement à T_{plaque}=145 °C entraîne la baisse du ratio Y/B.

La dégradation du flux optique aura pour conséquence une charge thermique plus importante dans la structure. Si cette augmentation de charge thermique est assez importante, la température de jonction augmentera et une dérive de la longueur centrale du pic bleu (« detuning ») pourra être constatée optiquement vers les grandes longueurs d'onde [15].

Les dérives paramétriques en vieillissement permettent d'estimer l'évolution de la T_j moyenne entre 0 et 6000 h par deux méthodes :

- Méthode spectrale : la dérive de longueur d'onde du module VTF 20 est de 1,37 nm en conditions de mesures à I_f = 200 mA. Si on se réfère à la dérive du pic bleu en température caractérisée en robustesse (0,078 nm.K^{-1}), cela correspond à une augmentation moyenne de T_j de 14 °C.
- Méthode électro-optique et thermique : les dérives paramétriques donnent accès à P_{opt}, les paramètres électriques et la R_{th}. L'augmentation du ΔT_j moyenne est donc calculable et donnée par :

$$\Delta T_j = T_{jf} - T_{j0} = (P_{thermf} . R_{thj-puitsf}) - (P_{therm0} . R_{thj-puits0}) = +1,77°C$$

avec T_{ji} les températures de jonction (°C), P_{thermi}, les puissances thermiques (W), et $R_{thj-puitsi}$, les résistances thermiques de l'assemblage. Les indices « 0 » et « f » correspondent respectivement aux valeurs initiales et après vieillissement.

Les deux démarches aboutissent à une estimation différente de l'augmentation de la température de jonction au cours du vieillissement, ce qui a été constaté sur deux autres modules. La

dérive de longueur d'onde dans le temps pourrait donc être la conséquence d'un mécanisme de dégradation agissant sur la longueur d'onde centrale du pic bleu. On peut proposer une modification de la zone active des puces sans écarter une perte de transparence du silicone de la couche de conversion ou une modification de son indice optique.

Pour les modules 14 et 16, ils présentent une chute brutale des paramètres de puissance optique, respectivement à 3000 et 6000 h (Cf. Tableau 4). Ces évènements peuvent être mis en lien avec les dérives brutales électriques de V_{th}. Si cette dernière correspond à la mise en court-circuit d'une des quatre jonctions, l'analyse de défaillance de ces modules devrait rapporter une absence d'émission lumineuse sur une des quatre puces.

Le croisement d'informations a permis d'émettre certaines hypothèses quant aux dégradations possibles au sein des modules multi-puce VTF étudiés en vieillissement. Nous allons maintenant procéder à l'analyse de défaillance de ces modules afin de vérifier la validité de ces hypothèses.

4.2 Analyse de défaillance

Les analyses de défaillance sont présentées en deux phases. Tout d'abord, les analyses non destructives, qui prennent en charge l'ensemble des observations et mesures à l'échelle du module. Ensuite, les analyses par micro-section qui permettront d'observer les structures au niveau puce (zone active, contacts, brasure…). Nous ferons ici l'hypothèse que les vieillissements ont été réalisés à iso-mécanismes de dégradations. Sachant que les modules analysés ont largement dépassé le critère de défaillance optique L70, les observations présentées ici constituent donc une aggravation des dégradations que l'on aurait pu constater en stoppant les vieillissements lors du passage du critère de défaillance (t_{L70}).

4.2.1 Analyses non destructives

La Figure 13 présente deux photographies du module VTF 14 avant et après vieillissement à la température T_{plaque}= 145°C à 6000 h. Nous avons choisi ce module car il est représentatif de l'ensemble des dégradations observées sur les modules VTF : Il est représentatif des dérives optiques observées, présente une chute brutale de V_{th} et une augmentation de son courant de fuite (R_p). La comparaison entre l'état initial et final du module met en évidence deux types de dégradations : d'une part un changement morphologique de la couche de conversion optique, avec l'apparition de fissures et d'autre part une dégradation (tache sombre) autour du câblage filaire.

L'apparition de fissures dans la couche de conversion optique semble confirmer l'hypothèse émise en paragraphe 4.1.4. Sachant que la luminescence à bas courant permet de visualiser parfaitement la localisation des fissures, la Figure 14 présente trois puces vieillies aux trois conditions de vieillissement étudiées (6000 h). Si l'on compare l'état de cette couche de luminophore dispersé dans le silicone pour les trois conditions de vieillissement (en termes de largeur et longueur des fissures), le développement des fissures semble être accéléré par la température. Cela conforte donc l'hypothèse de deux mécanismes concurrents : d'une part les fissures et la stabilisation du silicone qui augmente le rendement d'extraction et d'autre part la perte de rendement intrinsèque du luminophore dans le temps. La concurrence de ces deux mécanismes est illustrée en Figure 15.

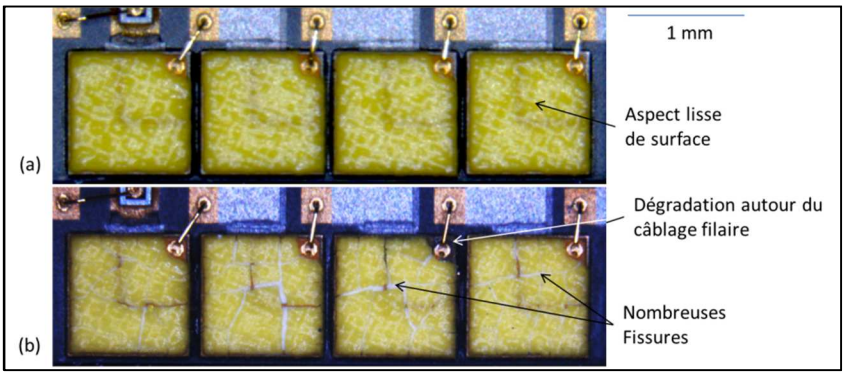


Figure 13 : Photographies du module VTF 14 avant (a) et après (b) vieillissement à T_{plaque}= 145 °C.

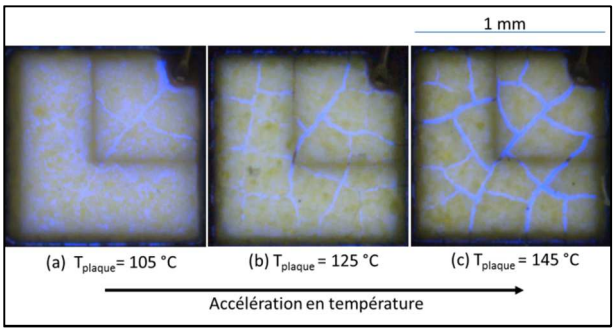


Figure 14 : Luminescence à bas courant (<500 µA) de trois puces vieillies 6000 h pour les trois conditions de vieillissement : 105°C (a), 125 °C (b) et 145 °C (c).

Nous allons maintenant nous focaliser sur les modules VTF 14 et 16, dont le comportement est atypique. Si l'on analyse électriquement le module VTF 14 par des I(V) à l'échelle puce et multi-puce, il est possible de mesurer les paramètres électriques de chaque diode pour ensuite les injecter dans le modèle multi-puce développé en chapitre 2. L'analyse électrique comportementale du module est présentée en Figure 16, qui intègre également les modifications des paramètres électriques à l'échelle puce. Les paramètres de la diode de protection et Schottky du modèle multi-puce développé n'ont pas été modifiés. Le module est alimenté à I_f= 8 mA. Les puces 1 et 2 présentent des comportements « normaux » de puce LED. Les deux paramètres électriques modifiés sont le η_1 et I_{ET}. La puce n °3 présente un court-circuit de jonction : en effet, la puce n'est plus fonctionnelle en tant que LED, elle assure la continuité du circuit électrique ($R_p \approx 0$) et présente une résistance R_s mesurée à 0,36 Ω, soit une diminution de 20%. La valeur de R_s était initialement de 0,43 Ω. Elle garde donc une majeure partie de sa résistivité (80 %), c'est donc un court-circuit de jonction, uniquement. La puce n° 4 présente un comportement intermédiaire. En effet, son I(V) met en évidence un courant de fuite très important. Sa résistance de fuite R_p est de 240 Ω contre 10 GΩ initialement. Nous supposons que cet état est un état intermédiaire entre un fonctionnement normal et un court-circuit de jonction établi. Les points chauds identifiés sur les puces 3 et 4 ont été caractérisés par thermographie IR qui localise précisément les fortes fuites et/ou court-circuit de jonction. La Figure 17 donne l'exemple de la caractérisation du point chaud de la puce 3.

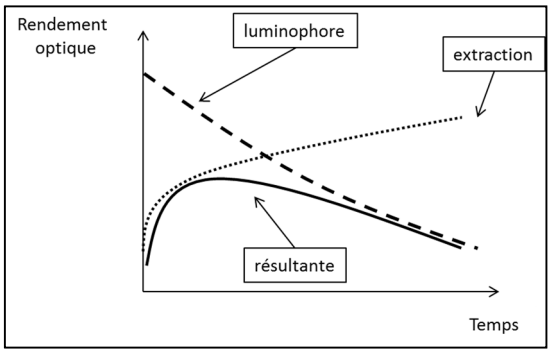
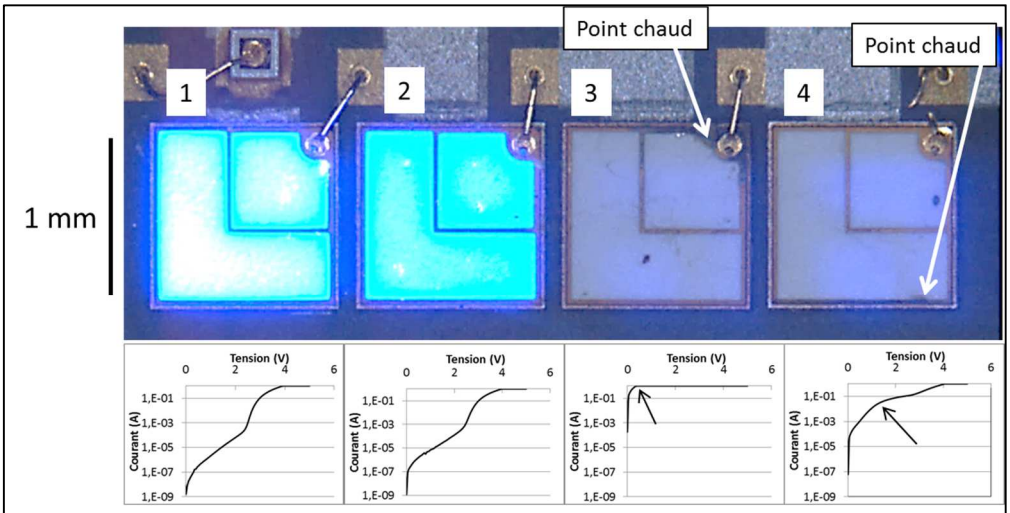


Figure 15 : Illustration des deux mécanismes concurrents dans l'évolution du ratio Y/B de la technologie VTF.



	Comportement initial	Comportement initial	Court-circuit de jonction	Fuites fortes
R_p	1,1 MΩ	5 MΩ	-	240 Ω
η_1	10	10	-	10
I_{ET0}	1.10^{-7} A	3.10^{-7} A	-	1.10^{-4} A
η_2	1	1	-	1
I_{ETE0}	5.10^{-38} A	5.10^{-38} A	-	5.10^{-38} A
R_s	0,51Ω	0,56 Ω	0,36 Ω	0,90 Ω

Figure 16 : Caractérisation électrique à l'échelle puce du module VTF 14 après vieillissement.

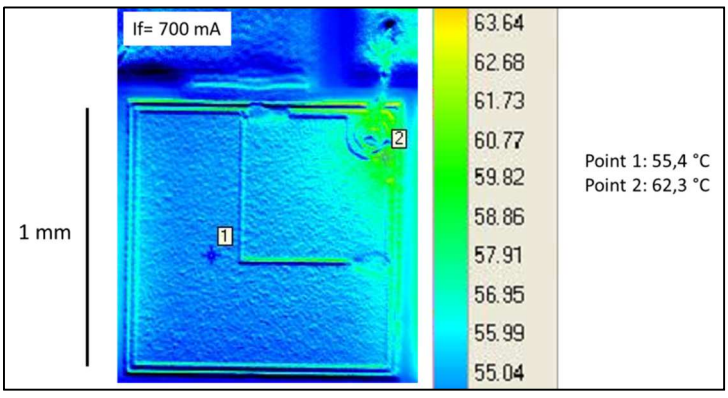


Figure 17 : Mise en évidence de la présence de point chaud par thermographie IR sur la puce 3 (non fonctionnelle) du module VTF 14. T_{plaque} = 145 °C.

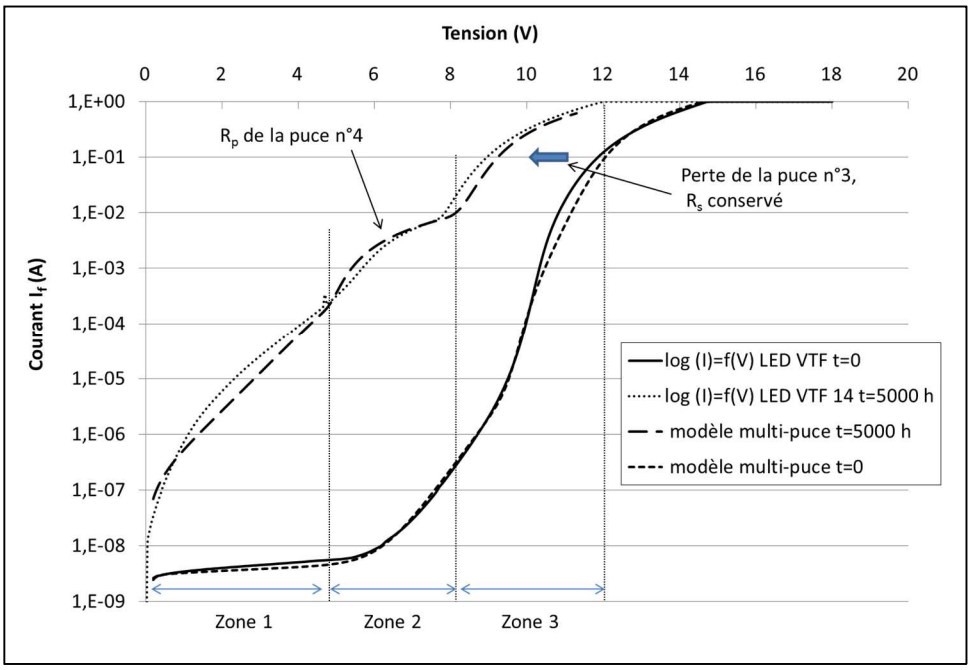


Figure 18 : Comparaison de la caractéristique I(V) du module VTF 14 à t=0 et t=5000h avec la caractéristique I(V) modélisée en utilisant le modèle multi-puce développé. T_{plaque} = 145 °C.

Les paramètres électriques au niveau puce permettent de mieux comprendre les comportements au niveau module. L'injection de ces paramètres dans le modèle développé au niveau multi-puce permet de caractériser le comportement d'une architecture LEDs multi-puce en vieillissement. La comparaison entre la mesure et la simulation à l'échelle module est présentée en Figure 18 pour ce module VTF 14.

Le résultat donné par le modèle n'est pas parfait mais présente une allure cohérente avec la caractéristique I(V) du module à t=5000 h. Le comportement électrique du module VTF 14 après vieillissement présente trois principales zones :

- La zone 1 : elle correspond aux faibles niveaux d'injection dans la structure : I_f < 1µA. La résistance de fuite au niveau boîtier et les courants I_{ET} des puces 1 et 2 sont visibles. Les résistances R_p des puces 3 et 4 sont sollicitées par la continuité électrique mais sont non visibles.
- La zone 2 : elle correspond aux niveaux moyens et forts d'injection pour les puces 1 et 2. Les résistances R_p des puces 3 et 4 sont sollicitées. Tandis que la puce 3 assure la continuité électrique (R_s), c'est la résistance R_p de la puce 4 qui limite le courant (240 Ω). Nous avons donc ici un comportement du type R_s avec $R_s \approx R_{p\text{-puce }4}$. Seules les puces 1 et 2 émettent de la lumière dans cette zone 2.
- La zone 3 : elle correspond à un régime de moyenne et forte injection de courant pour toutes les puces 2 (I_{ETE} et R_s). Les résistances R_s des puces 1 et 2 sont sollicitées. La puce 3 assure la continuité électrique par R_s. Le niveau de courant devient suffisamment fort pour solliciter la résistance R_s de la puce 4. Cette zone correspond au comportement R_s classique : le R_s mesuré à l'échelle multi-puce est la somme des résistances R_s des quatre puces.

Au final, ce modèle équivalent multi-puce permet de détecter l'apparition d'un court-circuit de jonction d'une ou plusieurs puces d'un module par une chute brutale de V_{th}. De plus, l'apparition de fuites au sein d'une ou plusieurs puces dans un module est décelable par plusieurs zones de comportement « R_s » sur l'I(V) au niveau module.

Les puces, ayant perdu leur fonctionnalité par court-circuit de jonction au sein des modules VTF 14 et 16, sont des puces situées au centre du module, qui sont les moins bien refroidies du module. En effet, une mesure de température moyenne de surface de puce par thermographie IR permet de mettre en évidence une température plus élevée sur les puces centrales des modules VTF. Les résultats sont présentés en Figure 19 sur un module VTF initial. A un courant I_f= 1A, la différence de température entre puce extérieure et puce intérieure est estimé à 6 °C. C'est une des problématiques des architectures multi-puce et les cinétiques de dégradation peuvent être accélérées sur les puces centrales.

De manière générale on peut donc s'attendre à constater sur les puces centrales des dégradations à un stade plus avancé que sur les puces externes.

Concernant la faible évolution des résistances $R_{thj\text{-}puits}$ des composants VTF au cours de vieillissement, aucune modification majeure ne doit être constatée au niveau de l'écoulement thermique dans les modules VTF. La Figure 20 permet d'apprécier l'état des brasures de puces par radiographie X, sur le module VTF 39, vieilli 6000 h à la température T_{plaque} = 125 °C, représentatif de la population. On constate des modifications morphologiques des brasures de puces mais de manière « diffuse » par rapport au module VTF 22 présenté précédemment dans la Figure 10. Cependant, et comme détaillé lors des conclusions thermiques en chapitre 3, la contribution résistive de la brasure est négligeable (0,07 $K.W^{-1}$ initialement) devant celle du composant (5,5 $K.W^{-1}$). Si l'on considère une perte de performance thermique d'un facteur 2 des brasures de puces dans l'écoulement thermique (hypothèse considérée pour la Figure 20), la résistance thermique $R_{thAu80\text{-}Sn20}$ allouée aux brasures sera théoriquement doublée (0,14 $K.W^{-1}$). Cette variation de R_{th} reste faible et difficilement observable via le T3Ster®. A un stade de dégradation plus avancé (Figure 10), des modifications de la résistance thermique R_{th} seront décelables par T3Ster.

Les analyses de défaillance non destructives ont permis de caractériser les modifications morphologiques des modules VTF, par une dégradation de la couche de conversion. Le développement de fissures a été constaté et il est activé thermiquement. Electriquement, les puces d'un module défaillant ont été caractérisées individuellement. Les paramètres électriques ont été injectés dans le modèle électrique équivalent multi-puce, ce qui a permis de comprendre le comportement électrique d'un module et de détecter une puce défaillante (court-circuit de jonction ou fuites fortes). Thermiquement, la mesure T3Ster® n'a pas détecté de dérive de valeur de R_{th}. Cependant, des dégradations ont été constatées au niveau brasure (radiographie X) mais sans conséquence significative sur la $R_{thj\text{-}puits}$.

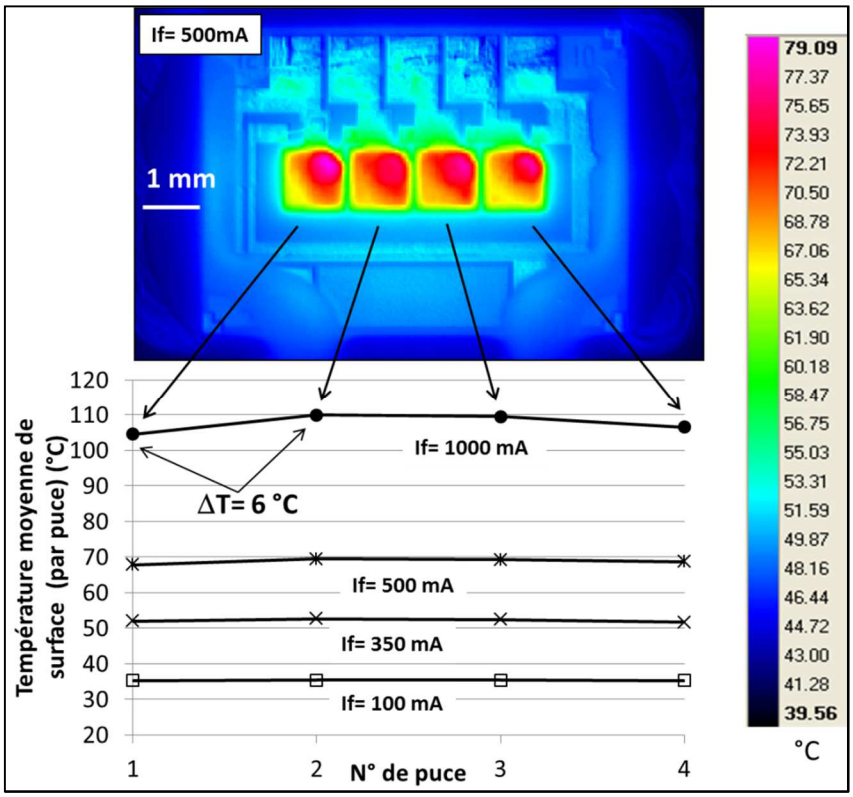


Figure 19 : Mise en évidence de l'inhomogénéité de la température de surface des puces d'un module VTF initial (avec luminophore) par thermographie IR.

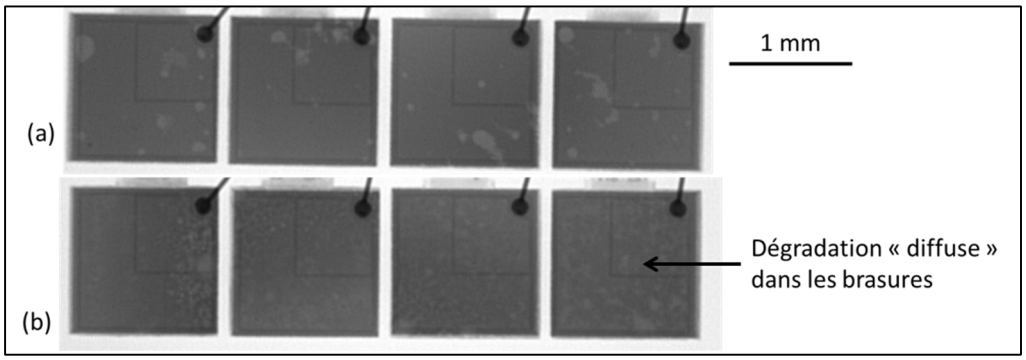


Figure 20 : Image par radiographie X du module VTF 39, (a) à t=0 et (b), vieilli 6000 h à T_{plaque}=125 °C.

4.2.2 Analyses destructives

L'évolution des paramètres électriques des LEDs VTF au cours du temps a montré une bonne stabilité pour la majorité des modules. Nous avons vu que cette stabilité électrique des paramètres R_s et V_{th} devrait être reliée à une stabilité structurelle des contacts N et P et plus généralement au chemin électrique. La Figure 21 représente l'image MEB du module VTF 14 (puce 2) après 5000 h de vieillissement à la température T_{plaque} = 145 °C. Aucune modification sur les contacts N et P n'est à noter. La structure des contacts n'est pas modifiée. Le détail des contacts N et P sont donnés en chapitre 2, Figure 12.

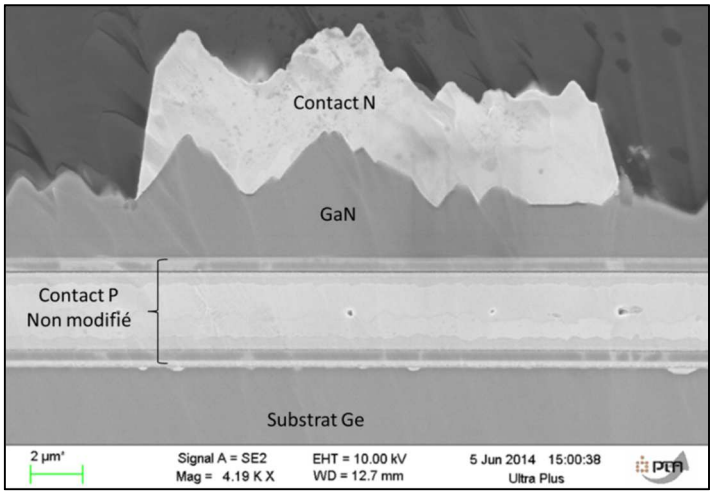


Figure 21 : Image MEB en électrons rétrodiffusés des contacts N et P de la puce 2 du module VTF 14 après 6000 h de vieillissement.

L'état des contacts de la puce 4 du module VTF 14 est détaillé dans la Figure 21. Si l'on analyse plus précisément la zone responsable des fuites identifiées par thermographie IR, (conduisant à une valeur faible de R_p égale à 240 Ω), on constate une modification des contacts N et P sur la prise de contact périphérique de la structure VTF. Le contact P est dégradé et la présence d'un alliage ou intermétallique Au_XGe_Y a été identifié par analyse EDX du côté du substrat en Ge. Côté N le contact Ti/Au est également dégradé. L'analyse EDX à ce niveau a révélé uniquement la présence de Ti. La migration d'Au du contact N vers le contact P est confirmée et plusieurs mécanismes sont envisageables : migration dans le GaN, ou migration dans des fissures. Cette dégradation observée peut être amorcée par un défaut géométrique local. La texturation de surface du GaN par gravure KOH lors de la fabrication des puces peut créer des concentrations locales de densité de courant par réduction de l'épaisseur du GaN. Le domaine du solaire photovoltaïque utilise des procédés de gravure chimique pour texturer la surface des cellules et augmenter ainsi le rendement d'absorption optique. Des études montrent que la texturation est un facteur de dé-fiabilisation des cellules et se traduit par une forte baisse de la tension de claquage des cellules [16] [17] [18]. Ce même processus pourrait expliquer les dégradations observées sur la technologie VTF étudiée.

Nous venons de présenter les analyses de défaillance appliquées à la technologie VTF après vieillissement et nous avons commenté l'ensemble des évolutions paramétriques. Le Tableau 7 répertorie l'ensemble des informations collectées à travers l'étude de ces modules VTF. Nous rappelons l'hypothèse que les vieillissements ont été considérés à iso-mécanismes de dégradation. Les dégradations constatées à 6000 h sont donc plus importantes qu'à t_{L70} et considérées comme issues des mêmes mécanismes de dégradation.

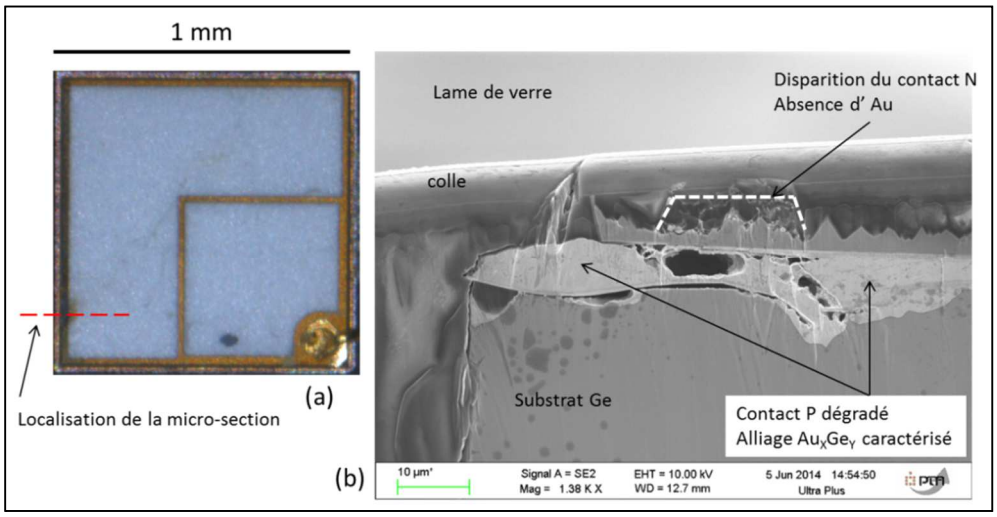


Figure 22 : Image optique (a) et MEB en électrons secondaires (b) des contacts au niveau du point chaud identifié de la puce 4 du module VTF 14. Mise en évidence de la dégradation des contacts, responsable d'un courant de fuite important.

Evolutions paramétriques jusqu'à défaillance (t_{L70})	
Optique	• Dérive graduelle de P_{opt} pour tous les modules • Augmentation du ratio Y/B (maximum + 20 %) à la température T_{plaque} = 125 °C
Electrique	• Stabilisation de la valeur R_p à 100 MΩ à 1000 h (indépendante de la température T_{plaque}) • Stabilité de R_s (maximum + 8 %) à la température T_{plaque}= 145 °C • Stabilité de la tension V_{th} (aucune dérive mesurée)
Thermique	• Stabilité de la résistance $R_{thj\text{-}puits}$ (aucune dérive significative enregistrée à 6000 h)
Analyse de défaillance à 6000 h	
Modes de défaillance observés	• Dérive graduelle de la puissance optique P_{opt} • Perte du rendement quantique de la puce (hypothèse) • Diminution de la puissance optique bleue • Augmentation du ratio Y/B • A terme, court-circuit de jonction à proximité du contact N (point chaud). Observé sur les modules 14 et 16 seulement.
Mécanismes probables de défaillance	• Augmentation de la densité de défauts, recombinaisons non-radiatives dans la puce • Perte de transparence optique du silicone • Court-circuit de jonction dû à un défaut ou forte densité de courant locale (contact N)

Tableau 7 : Bilan des évolutions paramétriques et de l'analyse de défaillance des modules de LEDs VTF étudiés en vieillissement.

4.3 Extraction de paramètres

Cette partie traite de l'extraction des paramètres de fiabilité des mesures, afin de caractériser le vieillissement des modules, déduire une énergie d'activation $E_{a\ VTF}$, et ainsi définir l'accélération appliquée lors des trois conditions de vieillissement. Il sera ensuite possible de désaccélérer les comportements enregistrés et ainsi définir une durée de vie des modules VTF dans un profil de mission automobile.

4.3.1 Méthodologie

Comme expliqué en partie 3.1, afin d'extraire les données de fiabilité des mesures, il faut tout d'abord fixer un critère de défaillance. Ce dernier est défini lorsque le flux optique a atteint 70 % du flux optique initial (noté L_{70}). La première étape consiste donc à relever pour chaque module, le temps nécessaire pour atteindre L_{70}. Dans notre étude, deux cas de figure se présentent :

- Le critère de défaillance (L_{70}) a été dépassé pendant les vieillissements. Dans ce cas, le temps t_{L70} est déterminé par régression linéaire sur les deux points qui encadrent le passage du critère à L_{70}. C'est le cas du vieillissement à la température T_{plaque}= 145 °C.
- Le critère de défaillance (L_{70}) n'a pas été atteint lors des vieillissements. Dans ce cas, une extrapolation est nécessaire afin de déterminer le t_{L70}. C'est le cas des vieillissements aux températures T_{plaque} = 105 et 125 °C. Si l'on suit la démarche des normes LM80 et TM21 dédiées à l'éclairage général (décrites au chapitre 1), les extrapolations se basent sur les données de vieillissement entre 6000 et 10000h pour des tests à 55 et 85°C en température d'ambiance. La non prise en compte des données entre 0 et 6000 h est due au fait que les LEDs ne présentent pas une dérive de flux représentative d'un vieillissement à long terme sur cette période. Ces temps ne sont pas compatibles avec notre étude et le profil de mission automobile. Ainsi, pour nos vieillissements, nous avons choisi d'appliquer les extrapolations sur les tendances de vieillissement à 6000 h. Les extrapolations seront donc basées sur les périodes 2000-6000 h et 3000-6000 h respectivement pour les vieillissements aux températures T_{plaque}= 105 et 125°C. Le choix de ces périodes est illustré en Figure 23.

Concernant le modèle d'extrapolation, les membres de l'IES (Illuminiting Engineering Society) ont mené des études de variance sur neuf modèles d'extrapolation appliqués au vieillissement des LEDs. Il en ressort que le modèle exponentiel (détaillé au chapitre 1) est le plus adapté à la prédiction des temps de défaillance appliquée aux LEDs [19]. C'est le modèle usuellement utilisé dans le domaine des LEDs. Afin de valider ce modèle d'extrapolation, nous avons pris l'exemple des données de vieillissement entre 2000 et 6000 h du module VTF 78 afin de comparer la corrélation des modèles aux mesures. Le Tableau 8 synthétise et compare les trois modèles principaux : linéaire, exponentiel et puissance [20].

En se basant sur le coefficient de corrélation R^2, nous avons retenu le modèle exponentiel pour l'extrapolation des données de vieillissement. En accord avec le suivi des LEDs témoins, le banc de mesure optique assure une précision de ± 3,5 %. Cette incertitude sera prise en compte lors de l'extraction des temps à défaillance. La méthodologie appliquée pour l'extraction des paramètres de fiabilité est maintenant décrite. Les résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

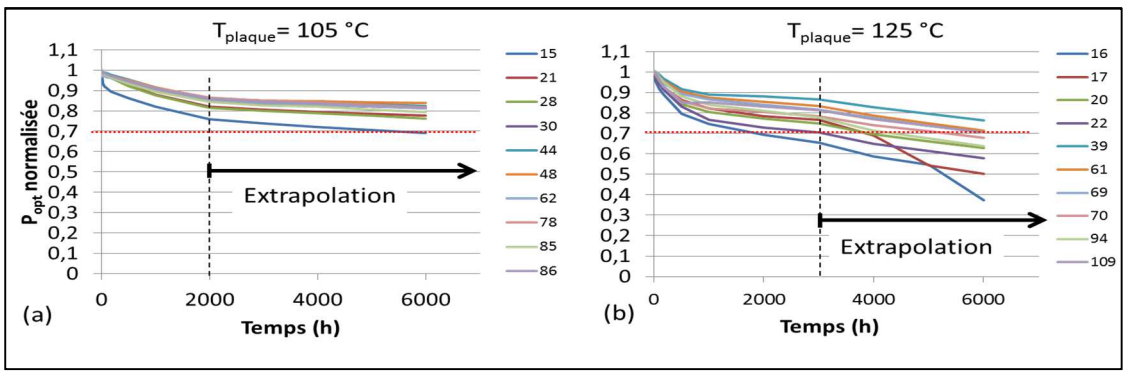


Figure 23 : Périodes identifiées pour l'extrapolation de la puissance optique jusqu'au critère de défaillance L_{70} des modules VTF. Vieillissements à 105 °C (a) et 125 °C (b).

Modèle	Coefficient de corrélation R^2
Linéaire $P_{opt} = -\alpha t + B$	0,9925
Exponentiel $P_{opt} = B.e^{(-\alpha t)}$	0,9927
Puissance $P_{opt} = B.t^{-\alpha}$	0,9655

Tableau 8 : Justification du modèle d'extrapolation utilisé pour les vieillissements. Exemple appliqué au module VTF 78 entre 2000 et 6000 h à T_{plaque}= 105 °C.

4.3.2 Fonction de défaillance cumulée

Les valeurs des temps t_{L70} de chaque module de LEDs sont présentées dans le Tableau 9 regroupant pour les trois conditions de vieillissement, les t_{L70} ainsi que l'incertitude liée au banc de mesure pour chaque module. Les t_{L70} sont classés dans l'ordre croissant.

T_1 : T_{plaque}=105 °C			T_2 : T_{plaque}=125 °C			T_3 : T_{plaque}=145 °C		
Module	t_{L70} (h)	Incertitude (h)	Module	t_{L70} (h)	Incertitude (h)	Module	t_{L70} (h)	Incertitude (h)
15	5400	± 1170	16	1969	± 292	14	661	± 106
28	11466	± 1480	17	2058	± 415	83	986	± 137
21	13183	± 1663	22	2822	± 401	98	986	± 138
85	15092	± 1619	20	3976	± 424	24	1138	± 303
86	17515	± 1731	94	4456	± 344	49	1208	± 123
78	17538	± 1651	70	5316	± 509	100	1319	± 311
62	18522	± 1925	***109***	6221	± 507	75	1329	± 302
30	20933	± 2290	***69***	6286	± 470	3	1769	± 243
44	22428	± 2258	***61***	6495	± 545	77	2612	± 360
48	32524	± 3378	***39***	8480	± 558	41	2914	± 399

Tableau 9 : Résultats des vieillissements accélérés de la technologie VTF. Les extrapolations ont été appliquées sur les modules en caractère *italique*.

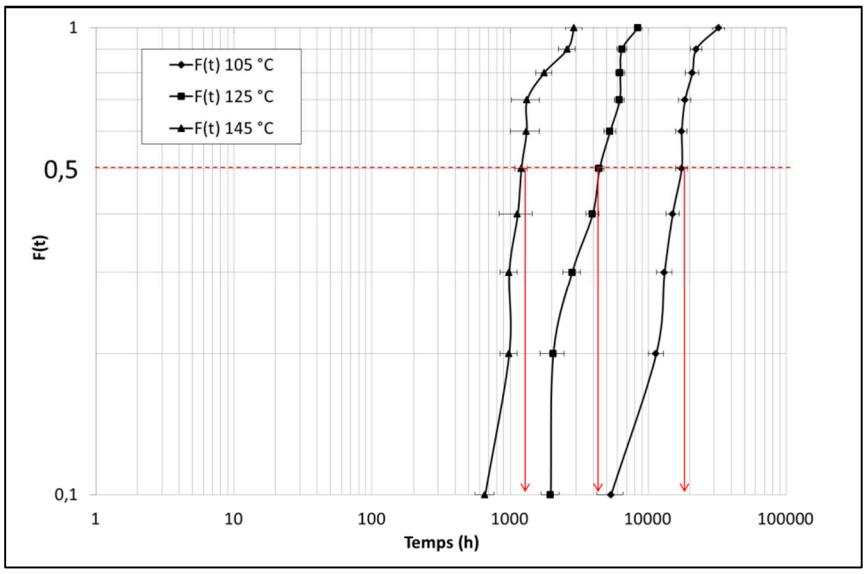


Figure 24 : Fonction de défaillance cumulée F(t) des modules VTF pour les trois conditions de vieillissement.

Condition	T_1 : T_{plaque}=105 °C	T_2 : T_{plaque}=125 °C	T_3 : T_{plaque}=145 °C
t_{L70B50} (h)	17515 ± 1731	4456 ± 344	1208 ± 123

Tableau 10 : Valeurs de t_{L70B50} des trois lots VTF pour les trois conditions de vieillissement.

A partir des données du Tableau 9, on peut définir et tracer F(t), la fonction de défaillance cumulée. Les fonctions F(t) pour les trois conditions de vieillissement sont représentées en Figure 24. Cette représentation permet d'extraire les valeurs t_{L70B50}, qui seront utiles à la détermination de l'énergie d'activation des mécanismes de dégradation engagés. Les valeurs de t_{L70B50}, sont présentées dans le Tableau 10.

On peut ainsi déduire de ces données, l'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ à partir de l'équation 2 introduite en partie 2.2. Le tracé de $\lambda(t)$ est présenté en Figure 25. On constate tout d'abord une non-linéarité, en retrouvant la caractéristique de la courbe en baignoire. Après un temps de stabilisation inversement proportionnel à la température, le taux moyen de défaillance augmente avec le temps. On retrouve donc les trois zones typiques de la courbe en baignoire :

- Les défauts de jeunesse : diminution de λ.
- La période de vie utile : λ constant.
- Le vieillissement des composants : augmentation de λ.

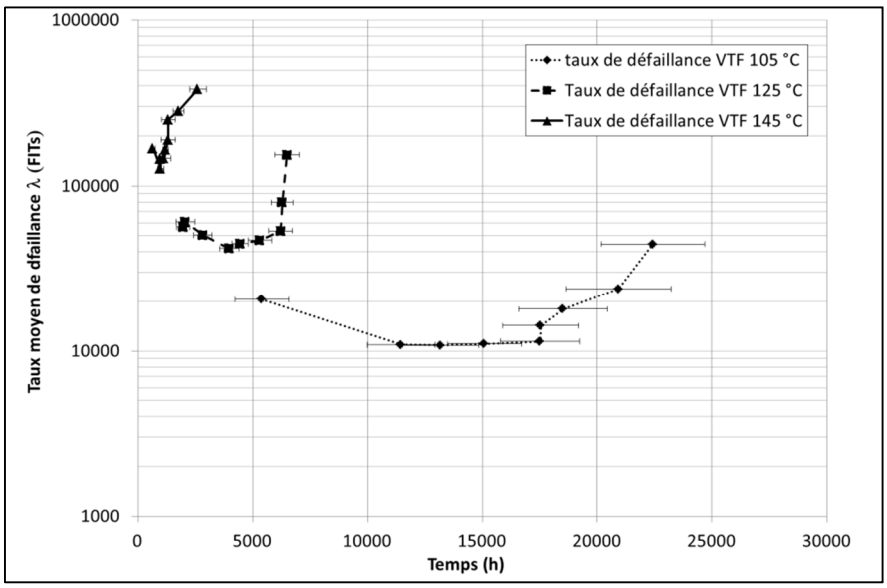


Figure 25 : Evolution du taux moyen de défaillance de la technologie VTF en fonction du temps et de la température de vieillissement T_{plaque}.

4.3.3 Détermination de l'énergie d'activation E_a

En se basant sur les valeurs t_{L70B50} aux trois températures des vieillissements, on peut déterminer l'énergie d'activation moyenne E_a (équation 14). En traçant $Ln(t_{L70B50})= f(1/T)$, chaque température de vieillissement donne un point et la pente de la droite est égale à Ea/k_b. Le tracé est présenté en Figure 26.

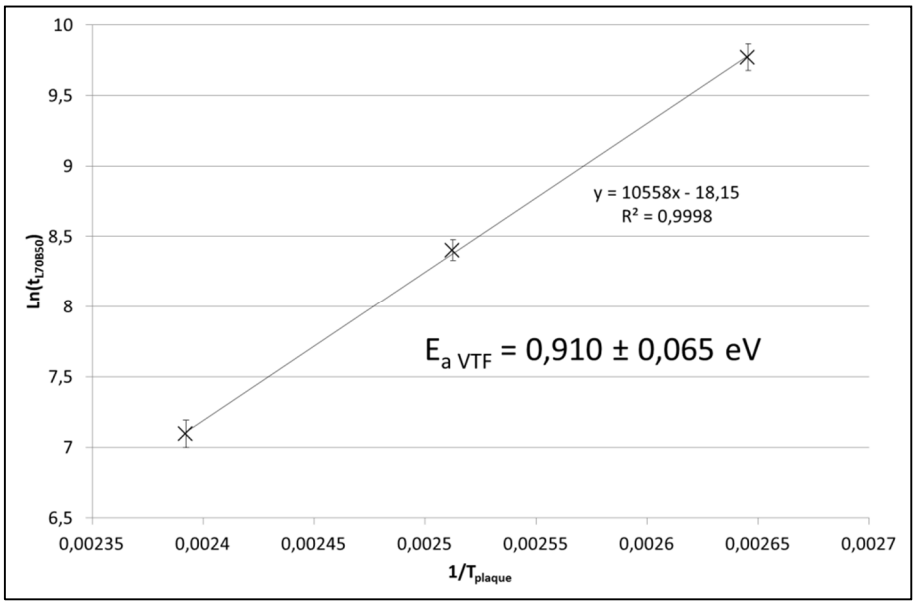


Figure 26 : Tracé de Ln(t_{L70B50})=f (1/T). Détermination de l'énergie d'activation en température des mécanismes de dégradation dans les modules VTF.

L'énergie d'activation $E_{a\ VTF}$ est de 0,910 ± 0,065 eV. Le coefficient de corrélation R^2 est très bon (0,9998), il n'y a pas de changement de pente en fonction de la température de vieillissement, cela confirme que nous avons travaillé à iso mécanismes de dégradation pour les trois températures de vieillissement. Le comportement de type dérive tend vers un comportement parallèle au sens de la fiabilité. Cette valeur est en accord avec les valeurs mises en lumière dans la bibliographie, généralement comprises entre 0,5 et 1,2 eV pour les vieillissements en température [7] [5].

4.3.4 Fonction de répartition de Weibull

Nous avons constaté que le taux de défaillance λ n'est pas constant au cours du temps (Figure 25). Cela traduit que la fonction de répartition associée au vieillissement des modules VTF correspond à une loi Weibull. Si l'on applique le changement de variable X=Ln(t) et Y= Ln (-Ln (1-F(t))) à la fonction de répartition de Weibull, cela donne une droite qui permet d'extraire les paramètres β et η de la fonction de répartition de Weibull, par l'équation :

$$Y = \beta(X - Ln\,\eta) \qquad \textbf{Équation 15}$$

La pente de la droite donne la valeur de β, et l'intersection de la droite avec la droite Y=0 donne la valeur de η. Le tracé Y=f(X) est présenté en Figure 27. Les paramètres β et η de la fonction de répartition de Weibull sont donnés dans le Tableau 11.

Les paramètres β sont supérieurs à 1 pour les trois conditions, ce qui signifie que les modules VTF ont été soumis à l'usure lors des vieillissements accélérés et que les défauts observés sont non aléatoires et ne correspondent pas à des défauts de jeunesse. La projection des droites à 0,5 % de défaillance permet d'extraire des temps $t_{L70B0,5}$ de 1580, 370 et 170 h, respectivement pour des températures T_{plaque} de 105, 125 et 145 °C (avec un courant I_f= 1 A). Ces données de sorties seront exploitées ultérieurement lors de la projection de la durée de vie des modules à un profil de mission automobile.

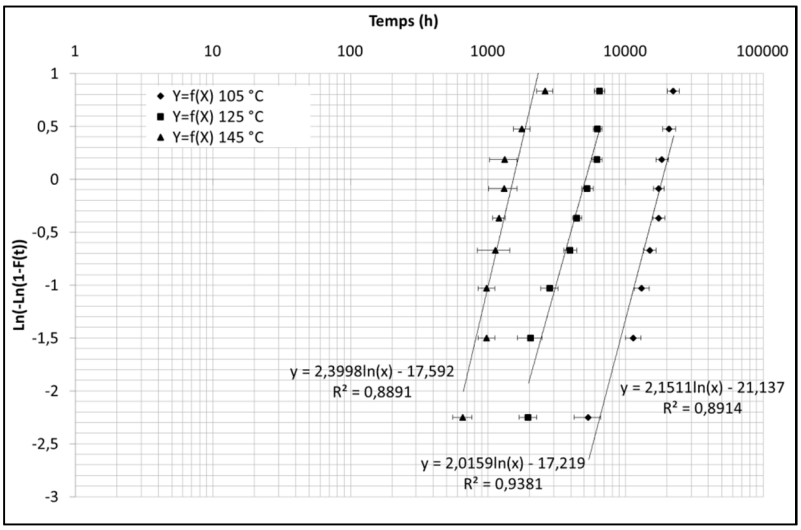


Figure 27 : Tracé de Weibull pour l'étude de vieillissement des modules VTF.

Condition	T_1 : T_{plaque}=105 °C	T_2 : T_{plaque}=125 °C	T_3 : T_{plaque}=145 °C
β	2,151	2,016	2,400
η	18511 h	5123 h	1526 h

Tableau 11 : Extrapolation des paramètres de la fonction de répartition de Weibull pour les modules VTF.

5 Résultats pour les modules TFFC

Suivant la même démarche que pour la structure VTF, nous allons maintenant aborder les résultats pour la structure TFFC en vieillissement, en commençant par l'analyse des évolutions paramétriques, puis les analyses de défaillance, pour finir par l'extraction des paramètres de fiabilité, données de sortie de l'étude.

5.1 Evolutions paramétriques

Les évolutions paramétriques de la technologie TFFC sont présentées ci-après. Cette partie s'attache à présenter les résultats « bruts » des mesures afin d'apprécier les évolutions, dispersions et comportements des trois lots TFFC en vieillissement. Pour chaque paragraphe, l'évolution paramétrique d'un module représentatif de la population sera analysée puis nous étendrons l'analyse à la population étudiée.

5.1.1 Mesures optiques

La Figure 28 présente l'évolution du spectre en fonction du temps, du module TFFC 21 qui a vieilli sous la condition intermédiaire à la température T_2 (T_{plaque}= 125 °C). Il est représentatif de l'évolution du flux optique de la population dans le temps, et cela pour les trois conditions de vieillissement. Les modules TFFC présentent les deux types de modes de défaillance : d'une part la dérive graduelle, ce sont les zones 1 et 3, et d'autre part la dérive brutale, en zone 2. La dérive graduelle est liée à une dégradation progressive des performances du dispositif alors que la dérive brutale est reliée à la perte de la fonctionnalité d'une ou plusieurs puces au sein du module. La dérive du pic bleu sera caractérisée ultérieurement lors des analyses croisées.

L'ensemble des paramètres optiques est présenté dans le Tableau 12. Les valeurs sont normalisées en perspectives des futures extractions de paramètres de fiabilité. Ce tableau regroupe l'ensemble des conditions de vieillissement (températures T_1, T_2, et T_3) ainsi que les paramètres optiques suivis au cours du temps, à savoir les puissances optiques, totale bleue et jaune, respectivement P_{opt}, P_{bleue} et P_{jaune}, ainsi que le rapport Y/B.

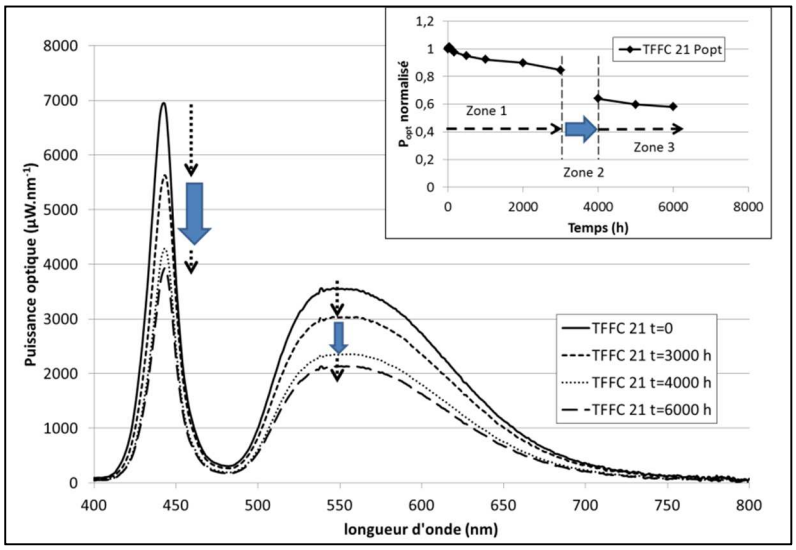


Figure 28 : Evolution du spectre du module TFFC 21 entre t=0 et 6000 h. I_f= 200 mA.

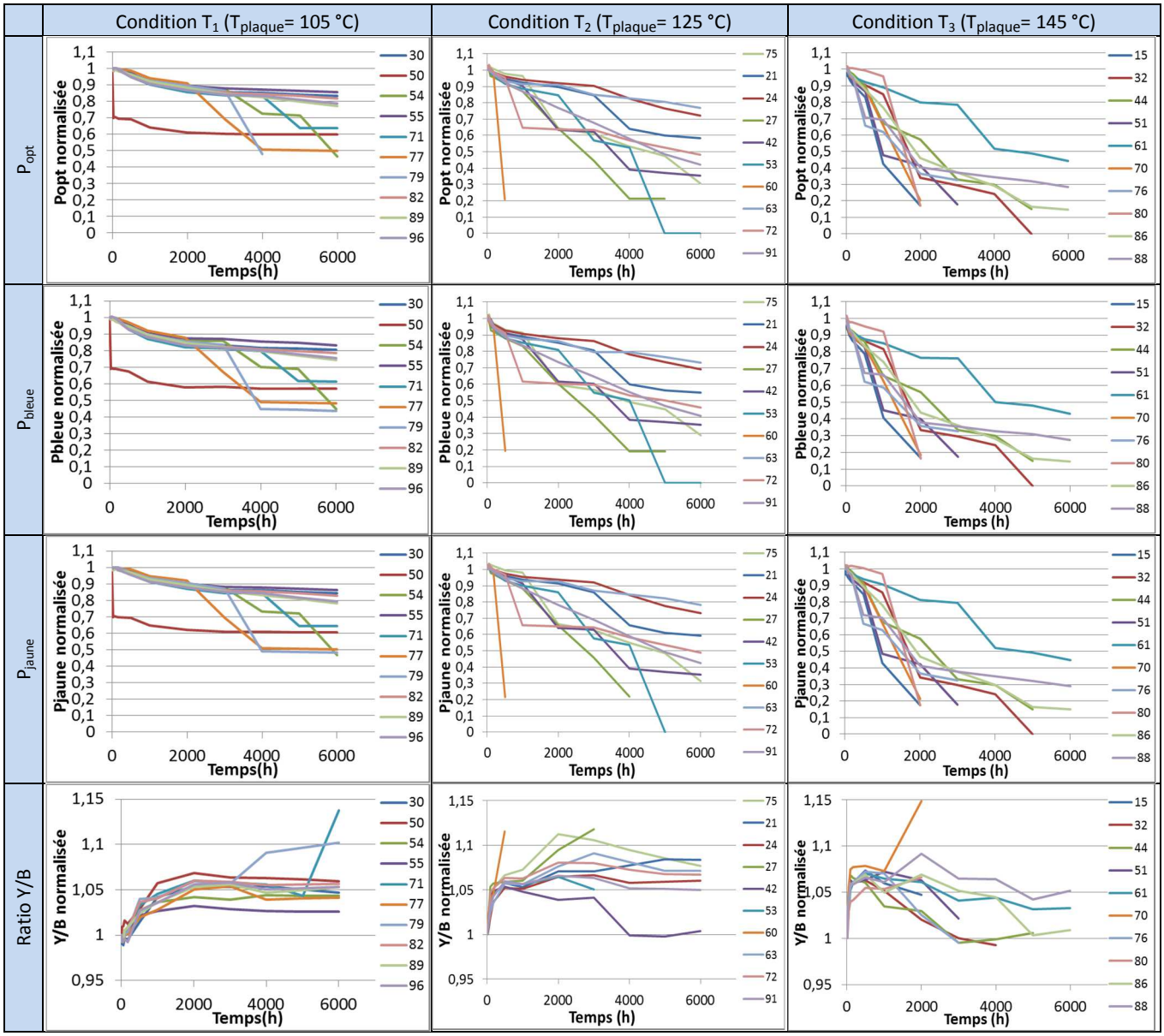


Tableau 12 : Bilan des mesures optiques réalisées au cours du vieillissement en température de la technologie TFFC.

Le suivi du flux optique met en lumière une accélération logique de la perte de flux avec la température. Cependant, on constate qu'une grande partie des modules TFFC atteint le critère de défaillance (L_{70}) par une dérive brutale du flux optique. Les mesures I(V) confirment un nombre très important de courts circuits de jonctions. Le mode de défaillance observé de la technologie TFFC est donc exclusivement catastrophique. Les modules qui affichent, à 6000h, une puissance optique > 70% du flux initial ont tous leurs quatre puces encore fonctionnelles. Ces modules « fonctionnels » à 6000 h sont au nombre de 5 pour le vieillissement à la température T_{plaque}= 105 °C et 2 pour le vieillissement à 125 °C. Les paramètres P_{bleue} et P_{jaune} affichent des tendances similaires à la puissance optique P_{opt}. Par conséquent le ratio Y/B dérive peu, + 5 % et + 7 % respectivement pour les vieillissements à 105 °C et 125 °C. Concernant le vieillissement à 145 °C, on constate une augmentation rapide du ratio Y/B jusqu'à + 7 % à 1000 h puis une tendance à la diminution. Cette dérive du ratio peut être corrélée à une dérive de température de couleur proximale. Une augmentation du rapport Y/B entraîne une diminution de la température de couleur, à raison de -24 $K.\%^{-1}_{Y/B}$.

5.1.2 Mesures électriques

La Figure 29 présente l'évolution de l'I(V) du module TFFC 21 en fonction du temps pour la condition intermédiaire à la température T_2 (T_{plaque}= 125°C). Sachant que les variations paramétriques enregistrées sont similaires pour les trois conditions de vieillissement, nous considérerons ce module comme représentatif de la population TFFC étudiée.

On note tout d'abord une nette augmentation du courant de fuite lié à la résistance R_p, entre 0 et +5 V. Elle masque la contribution du courant I_{ET} entre 0 et +5 V et on retrouve cette contribution de fuite en sollicitation inverse. Cette augmentation du niveau de courant s'élève d'environ 6 décades à +5 V. Ensuite, on constate de fortes modifications pour le régime de forte injection de courant. Deux phases se dégagent en vieillissement :

- La dérive des paramètres R_s et V_{th} entre t=0 h et 3000 h. Cette phase (a) est identifiée sur la Figure 29 et aboutit à une augmentation de la tension V_f (+16 % ici).
- La chute brutale du paramètre V_f entre 3000 et 4000 h correspond à la perte de fonctionnalité d'une puce (court-circuit de jonction). Cette dérive brutale (b) correspond donc à la disparition de l'effet de seuil de la LED défaillante.

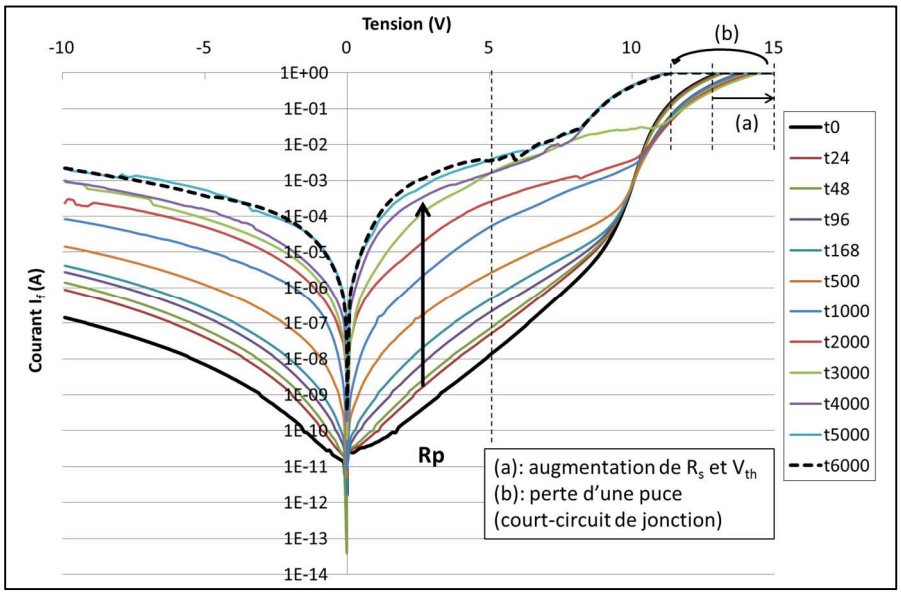


Figure 29 : Evolution de la caractéristique I(V) du module TFFC 21 entre 0 et 6000 h.

Les évolutions des paramètres électriques des modules TFFC en vieillissement sont présentées dans le Tableau 13. Il regroupe les paramètres $R_{p,}$ R_s et V_{th} en fonction du temps. Les trois conditions de vieillissement montrent une accélération de la diminution de la résistance de fuite R_p avec la température, avec un effet de stabilisation, mais sans la présence de « plateau ». L'augmentation du courant de fuite au sein des modules TFFC est donc présente tout au long de la vie du composant. A titre d'exemple, la résistance R_p du module TFFC 44 est passée de 100 MΩ à 3,9 kΩ en 5000 h. L'évolution de la résistance série R_s met en évidence une augmentation en fonction du temps pour les trois conditions de vieillissement. A 6000 h, les augmentations s'établissent en moyenne à 22 %, 28 %, et 73 % respectivement pour les vieillissements aux températures T_{plaque} = 105, 125 et 145 °C. De plus, le suivi du paramètre V_{th} des modules TFFC met en évidence deux évolutions distinctes :

- D'une part une augmentation progressive de la valeur de V_{th}. Cette évolution est visible surtout sur les vieillissements à 105 et 125 °C.
- D'autre part, une chute brutale liée à la perte de fonctionnalité de puce(s). La présence de paliers autour de 9, 6 et 3 V, respectivement pour 3, 2 et 1 puce(s) fonctionnelles restante(s) par module TFFC.

On notera la corrélation d'une plus forte proportion de modules présentant une chute brutale de V_{th} avec l'augmentation de la température.

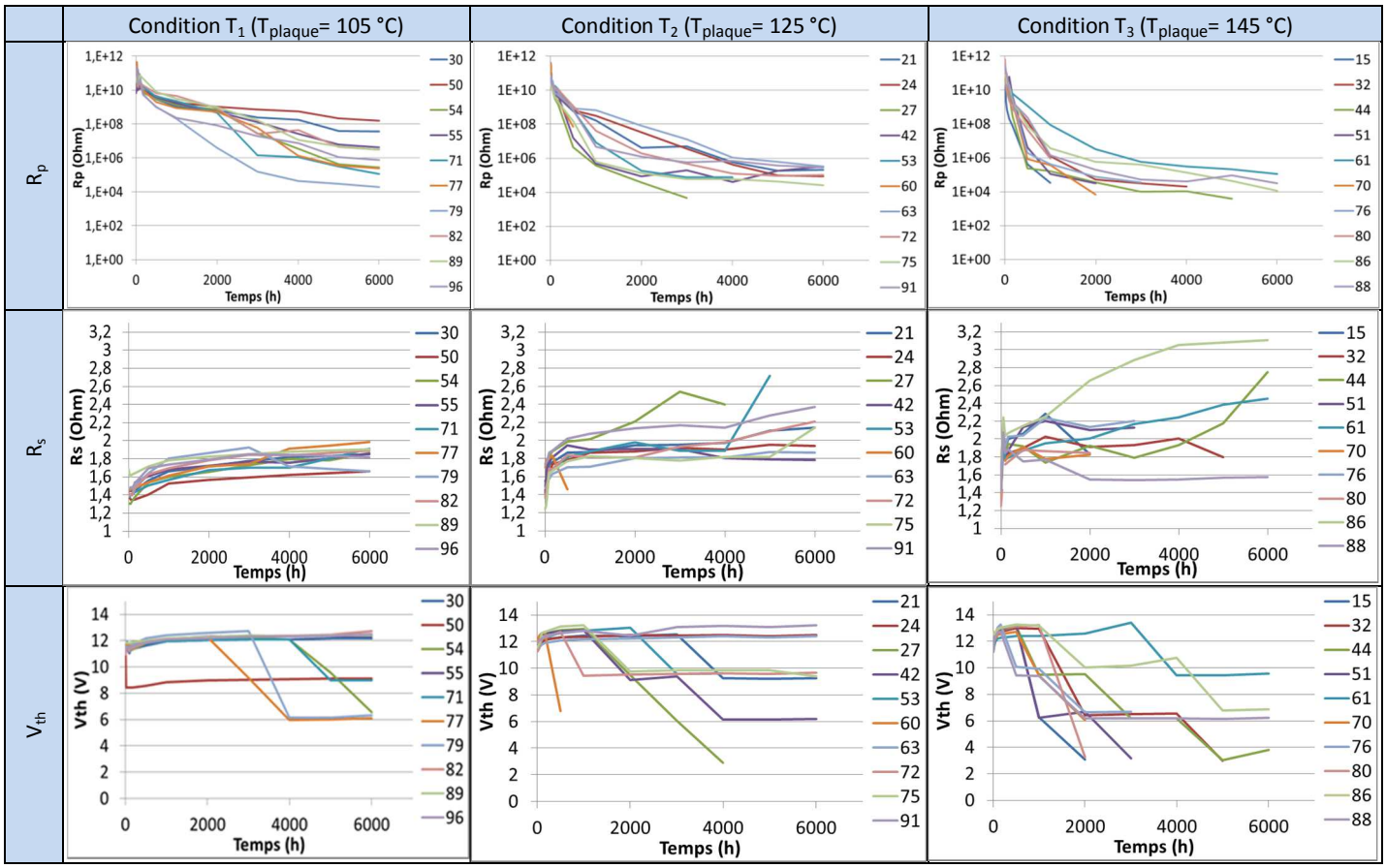


Tableau 13 : Bilan des mesures électriques réalisées au cours du vieillissement en température de la technologie TFFC.

5.1.3 Mesures thermiques

Les mesures thermiques transitoires effectuées en fin des vieillissements n'ont pas été réalisées sur tous les composants TFFC et ce pour deux raisons :

- Certains composants présentent des fuites trop importantes pour la mesure de V_f à 1 mA, le facteur K n'a pas pu être estimé à 1 mA (régime de fuites, R_p uniquement).
- La majorité des modules a perdu la fonctionnalité d'une ou plusieurs puce(s), ce qui rend impossible la mesure thermique comparative, à cause d'un écoulement thermique modifié au sein de la structure.

De ce fait, nous avons pu caractériser uniquement quatre composants TFFC vieillis à la température T_1 (105°C) après 6000 h de vieillissement. La moyenne de ces mesures met en évidence une très forte augmentation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de tous les composants TFFC mesurés (34 %), passant de 5,21 à 7 $K.W^{-1}$ avec un écart-type de 0,98 $K.W^{-1}$. L'exemple donné en Figure 30 est celui du module TFFC 82. Il présente une dégradation de l'ensemble du chemin thermique dans la structure de 42% (+ 2,1 $K.W^{-1}$). Les parties qui correspondent à l'interface thermique et au puits thermique n'ont pas été modifiées. Ces dégradations seront prises en compte dans l'analyse des dérives paramétriques enregistrées lors des vieillissements. Le bilan des mesures thermiques réalisées sur les lots de modules TFFC est présenté en Tableau 14, mettant en évidence une caractérisation de seulement quatre modules TFFC sur une population de 30 modules engagés en vieillissement.

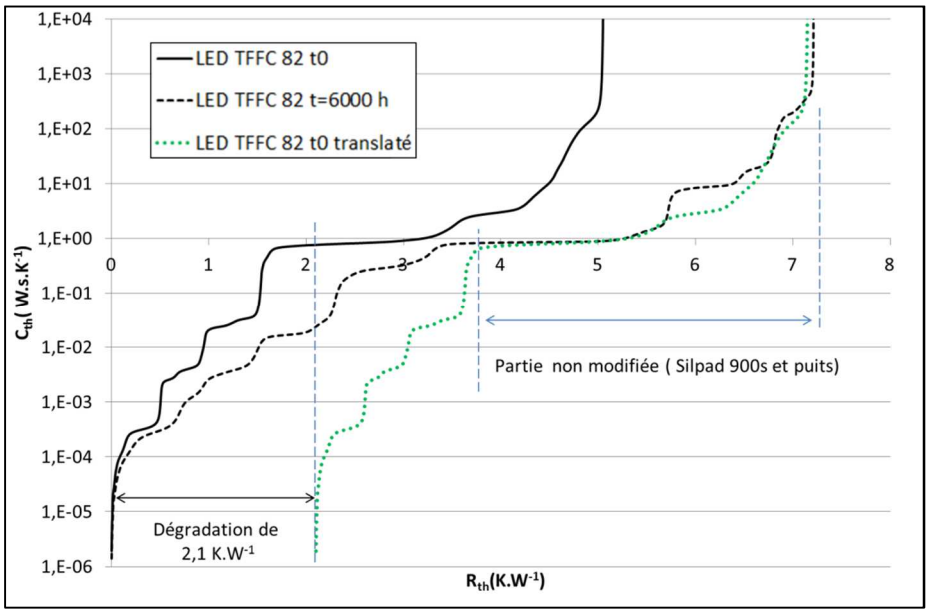


Figure 30 : Exemple de la dégradation de $R_{thj\text{-}puits}$ du module TFFC 82 après 6000 h de vieillissement.

	Condition T_1 (T_{plaque}= 105 °C)	Condition T_2 (T_{plaque}= 125 °C)	Condition T_3 (T_{plaque}= 145 °C)
Moyenne des $R_{th\ J\text{-}puits}$ initiales ; Ecart-type	5,21; 0,24	5,05; 0,17	4,95; 0,11
Nombre de composants exploitables après vieillissement	4/10	0/10	0/10
Moyenne des $R_{th\ J\text{-}puits}$ à t=6000 h; Ecart-type	7,00 ; 0,98	--	--
Evolution de $R_{thj\text{-}puits}$ en % entre t=0 et t=6000 h (moyenne)	+ 34 %	--	--

Tableau 14 : Synthèse des mesures de $R_{thj\text{-}puits}$ sur les lots TFFC après vieillissement à 6000 h.

5.1.4 Bilan, analyses croisées et hypothèses

Compte tenu de l'augmentation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de 34 %, caractérisée à la fin des vieillissements, on peut anticiper des conséquences sur les mesures optiques : en effet, l'augmentation de la valeur de $R_{thj\text{-}puits}$ entre t=0 et 6000 h entraîne une augmentation de la T_j moyenne et devra se traduire par une dérive de la longueur d'onde centrale du pic bleu vers les plus grandes longueurs d'onde. Deux analyses sont possibles :

- Méthode spectrale par la dérive de longueur d'onde centrale du pic bleu [21]. Pour le module TFFC 82 est de 0,37 nm en conditions de mesure. Si on se réfère à la dérive du pic bleu en température, caractérisée en robustesse (0,0049 nm.K^{-1}), cela correspond à une augmentation moyenne de T_j de 7,4 °C.
- Méthode électro-optique et thermique : les dérives paramétriques donnent accès à la puissance optique P_{opt}, l'I(V) et la valeur de R_{th}. L'augmentation de ΔT_j moyenne après vieillissement est donc calculable par :

$$\Delta T_j = T_{jf} - T_{j0} = (P_{thermf} . R_{thf}) - (P_{therm\,0} . R_{th\,0}) = +5{,}77\,°C$$

avec T_{ji} les températures de jonction (°C), P_{thermi}, les puissances thermiques (W), et $R_{thj\ puitsi}$, les résistances thermiques de l'assemblage. Les indices « 0 » et « f » correspondent respectivement aux valeurs initiales et après vieillissement.

Les deux démarches aboutissent à une bonne concordance sur l'augmentation de la température moyenne de jonction au cours du vieillissement. La tendance est la même sur les trois autres modules TFFC exploitables et cela permet de confirmer la bonne corrélation des mesures.

Sachant que l'augmentation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de 34 % trouve son origine dans la modification structurale du composant sans identification d'une zone précise, des modifications devront être observées en analyse de défaillance destructive soit au niveau de la puce soit au niveau de l'assemblage : GaN, plot Au, brasure, pouvant être responsable d'une augmentation de R_{th}. De plus, si le niveau puce est dégradé thermiquement, des zones ou points chauds pourront être caractérisés par thermographie IR.

Concernant les paramètres électriques, plusieurs modifications majeures sont attendues : D'une part, la dégradation d'au moins une partie du chemin électrique par une forte augmentation de la valeur de R_s, et d'autre part, la forte augmentation du courant de fuite pourrait être la conséquence de dégradations en bord de puce ou vias. Enfin, l'évolution de la tension de seuil V_{th} dans le temps a montré deux types de dérives :

- Une tendance à l'augmentation, potentiellement causée par la modification ou dégradation des contacts métal/semi-conducteur.
- Une chute brutale, causée par la perte de fonctionnalité d'une ou plusieurs puces par court-circuit de jonction. La thermographie IR devrait révéler l'existence de points chauds associés aux zones défaillantes.

5.2 Analyses de défaillance

Les analyses de défaillance sont présentées en deux phases. D'une part, les analyses non destructives, qui prennent en charge l'ensemble des observations et mesures à l'échelle du module et d'autre part, les analyses par micro-sections, qui permettront d'observer plus en détail les structures au niveau puce (zone active, contacts, plots d'accueil…). Nous ferons ici l'hypothèse que les vieillissements ont été réalisés à iso-mécanismes de dégradations. Sachant que les modules TFFC ont tous franchi le critère de défaillance L_{70} par défaillance brutale, nous proposerons des hypothèses quant aux mécanismes de défaillance possibles.

5.2.1 Analyses non destructives

La Figure 31 présente deux photographies du module TFFC 15 avant et après le vieillissement à la température T_{plaque}= 145 °C. C'est un module représentatif de l'ensemble des dégradations observées sur les modules TFFC : une perte brutale de flux avec trois puces défaillantes et une dérive de tous les paramètres électriques. L'observation comparative entre l'état initial et l'état final du module met en lumière deux types de dégradations : d'une part un changement morphologique de la couche de protection silicone blanche (fissures), et d'autre part des dégradations au niveau puce (vias de couleur sombre). De plus, l'alimentation du module à un courant I_f= 15 mA permet de mettre en évidence la dernière puce fonctionnelle du module TFFC 15.

Si l'on analyse électriquement le module TFFC 21 par des I(V) à l'échelle mono-puce et multi-puce, il est possible d'extraire les paramètres électriques de chaque diode pour ensuite les injecter dans le modèle multi-puce développé dans ce manuscrit dans le chapitre 2. L'analyse électrique comportementale du module ainsi que les paramètres mono-puce sont présentés en Figure 32 . Le module est ici alimenté à un courant I_f de 5 mA. Les puces 1 et 2 fonctionnent (émission de lumière), mais les paramètres modifiés sont R_p, η_1, I_{ET} et R_s. La puce n°3 présente un comportement intermédiaire. Sa résistance de fuite R_p est plus faible ce qui explique qu'elle n'émette pas de lumière à 5 mA. La puce 4 n'est plus fonctionnelle. Cependant, elle maintient la continuité du circuit électrique ($R_p \approx 0$) et présente une résistance R_s mesurée à 0,71 Ω. C'est donc un court-circuit de la jonction par disparition de l'effet de seuil avec la résistance d'accès conservée.

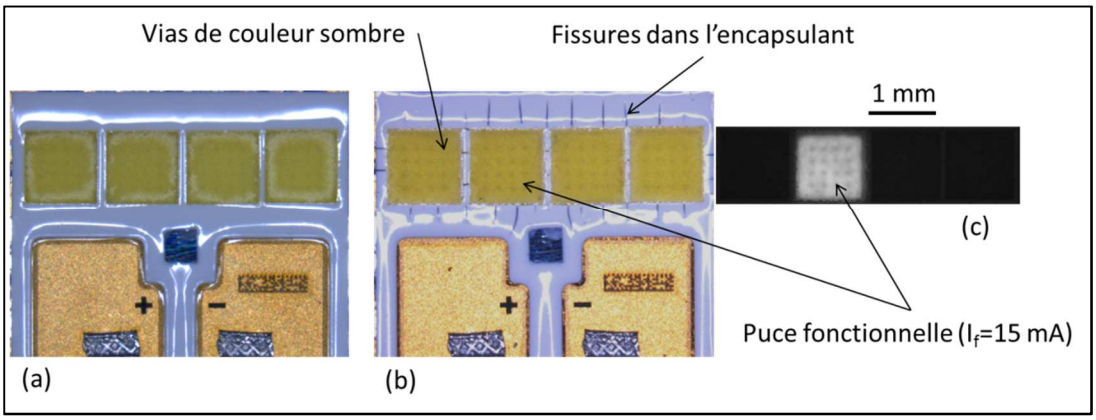
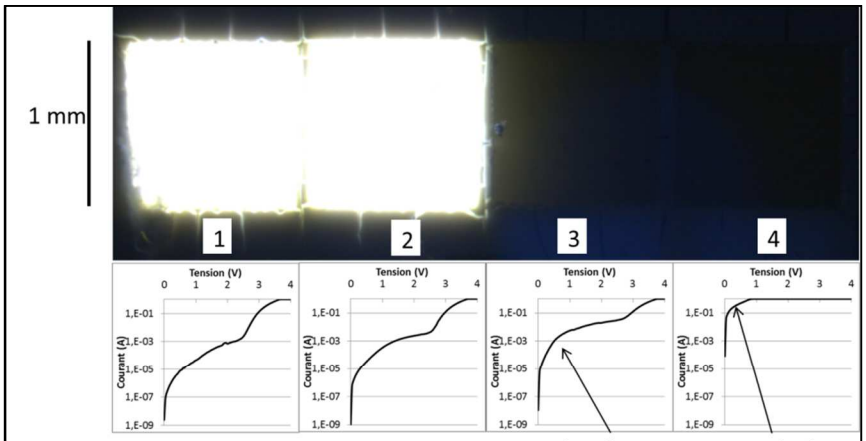


Figure 31 : Vues du module TFFC 15 avant (a) et après (b) vieillissement à la température T_{plaque} = 145 °C. (c), Image du module alimenté à I_f= 15 mA.



	Comportement « normal »	Comportement « normal »	Fuites plus importantes	Court-circuit de jonction
R_p	688 kΩ	600 kΩ	15 kΩ	-
η_1	15	15	16	-
I_{ET0}	1.10^{-4} A	1.10^{-4} A	1.10^{-3} A	-
η_2	1,4	1,4	1,4	-
I_{ETE0}	5.10^{-29} A	5.10^{-29} A	5.10^{-29} A	-
R_s	0,57 Ω	0,59 Ω	0,65 Ω	0,71 Ω

Figure 32 : Caractérisation électrique à l'échelle puce du module TFFC 21 après vieillissement.

Si l'on injecte ces nouveaux paramètres après vieillissement, mesurés à l'échelle mono-puce, dans le modèle développé au niveau multi-puce TFFC, le résultat permet de mieux comprendre le comportement de l'architecture TFFC multi-puce en vieillissement. La comparaison entre la mesure et la simulation à l'échelle module est présentée en Figure 33 pour le module TFFC 21. La mesure I(V) présente quatre zones :

- La zone 1 : c'est le régime de très faible niveau d'injection, les résistances R_p des quatre puces sont sollicitées. La puce 4 défaillante, assure la continuité électrique.
- La zone 2 : les courants I_{ET} des puces 1, 2 et 3 sont sollicités. La puce 4 défaillante, assure la continuité électrique.
- La zone 3 sollicite les I_{ETE} des puces 1, 2 et 3 pour un niveau d'injection moyen. La puce 4 apporte sa contribution à travers le paramètre R_s ($R_s.I_f$), considérée comme négligeable.
- La zone 4 correspond au fort niveau d'injection de courant : les quatre puces apportent leur contribution $R_s.I_f$.

La statistique quant à l'apparition de ces défaillances brutales en fonction de la position dans les modules TFFC, n'a pas révélé de position favorisant l'apparition de défaillances brutales. Le Tableau 15 synthétise cette étude statistique.

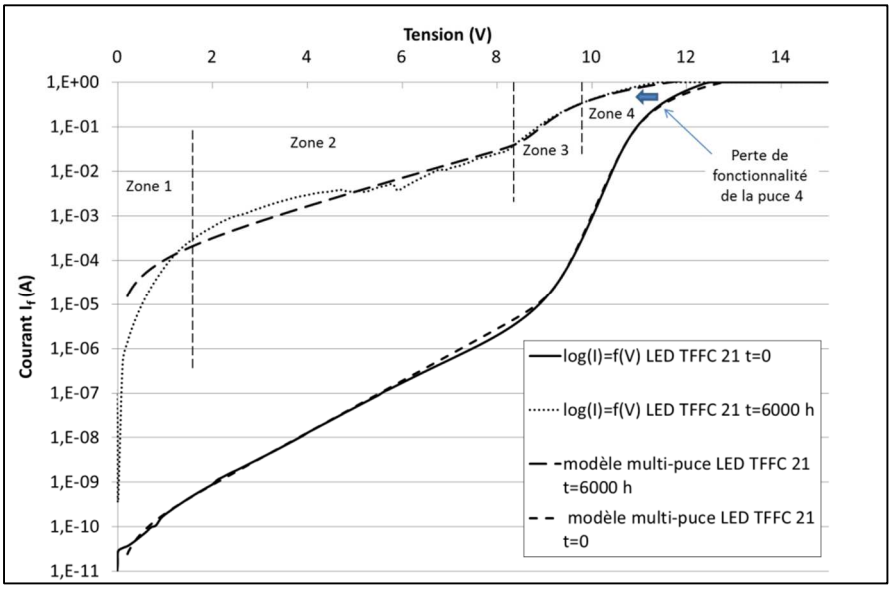


Figure 33: Confrontation de l'I(V) du module TFFC 21 à t=0 et t=6000h ainsi que l'I(V) donné par le modèle multi-puce.

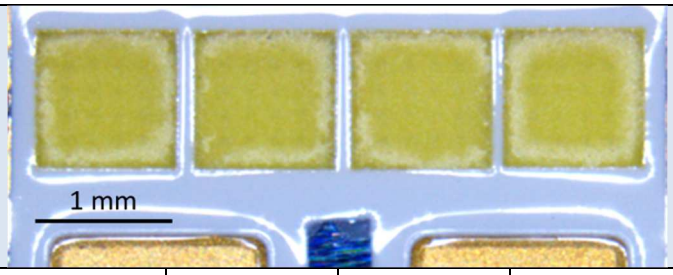
					Nombre total de puces défaillantes à t= 6000 h
T_{plaque}= 105 °C	28 %	28 %	16 %	28 %	7
T_{plaque}= 125 °C	25 %	20 %	20 %	25 %	20
T_{plaque}= 145 °C	15 %	16 %	29 %	29 %	24

Tableau 15 : Répartition du nombre de puces défaillante (%) pour les trois conditions de vieillissement en fonction de leur position dans le module TFFC.

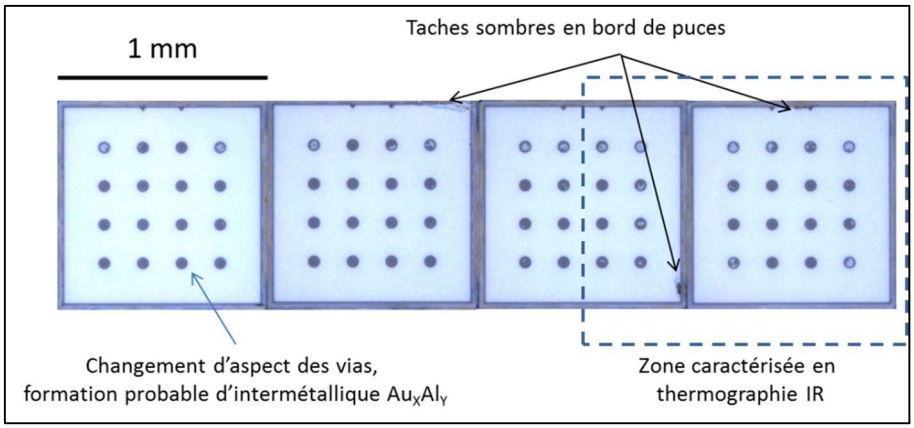


Figure 34 : Mise en évidence de taches sombres sur les vias périphériques et changement d'aspect visuel des vias circulaires. Module TFFC 80 vieilli à la température T_{plaque} = 145 °C.

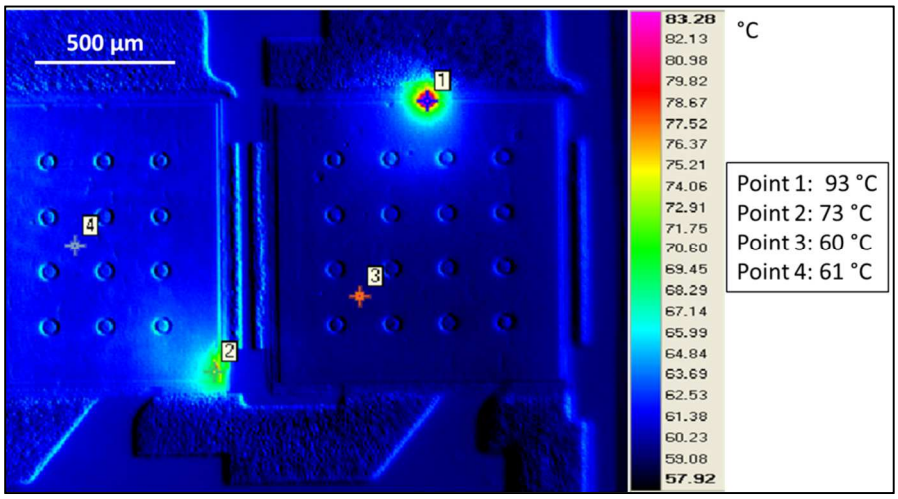


Figure 35 : Caractérisation de points chauds sur le module TFFC 80 décapsulé et vieilli à la température T_{plaque} = 145 °C. I_f= 700 mA.

La Figure 34 présente le module TFFC 80 décapsulé après 5000 h à la température T_{plaque}=145 °C. Ce changement d'aspect ressemble très fortement à la formation d'intermétallique Au_X-Al_Y caractérisé lors de l'étude de robustesse. Ce point sera détaillé en analyse destructive. D'autre part, des tâches sombres sont localisées sur les vias périphériques des puces non fonctionnelles. Ces tâches pourraient être responsables des courts circuits de jonction détectés en mesure électrique (chute brutale de V_{th}). De plus, la zone caractérisée thermiquement en Figure 35 est pré-localisée sur la Figure 34.

Toutes les puces en court-circuit de jonction présentent des taches sombres sur leurs vias périphériques. La caractérisation par thermographie IR de ces puces en fonctionnement permet de caractériser ces tâches comme points chauds de la structure TFFC. La Figure 35 confirme ce point, confronté avec la Figure 34. On précise que les deux puces caractérisées n'émettent plus de lumière. Ces points chauds jusqu'à + 33 °C par rapport à la majeure partie de la surface de la puce sont donc le siège des courts circuits de jonction.

Si l'on superpose la localisation de l'ensemble des points chauds recensés sur les puces défaillantes des modules TFFC étudiés (trois conditions de vieillissement), cela permet d'identifier clairement le point faible de cette technologie face à un vieillissement en température, à savoir le via périphérique de puce. La Figure 36 illustre cette information statistique à travers une superposition graphique des défaillances observées sur une même puce TFFC. On notera l'absence de défaillance sur les vias circulaires de centre de puce. Si l'on corrèle la localisation des défaillances avec celles des plots d'interconnexion FC sous la puce, on constate que toutes les défaillances ont lieu à proximité des larges plots d'Au en bord de puce. En effet, aucune défaillance n'a été recensée sur le côté inférieur de la structure où la surface allouée aux plots est moins importante (Figure 36). La présence des plots ou leur géométrie pourrait donc avoir une forte influence sur ces défaillances brutales. Plusieurs hypothèses sont envisagées : T. NSHANIAN a montré que sur la technologie TFFC, une forte densité de défauts était générée lors de l'assemblage par thermocompression et pouvait fortement fragiliser la structure [22]. Une autre hypothèse est orientée sur les contraintes thermomécaniques plus fortes sur ces larges zones d'accueil et plus généralement en bord de puce [23] [24]. Considérons la structure simplifiée du bord de puce présentée en Figure 37. Si l'on applique un champ de contraintes selon X dans le GaN, la géométrie de la structure présente des angles saillants identifiés par « Zone A » et « Zone B » qui peuvent être le siège de concentrations de contraintes, résultant de la discontinuité des propriétés des matériaux aux angles [25]. Le développement

d'intermétallique du type Au_X-Al_Y, matériau rigide et cassant, peut amplifier le phénomène [26]. Lors des montées et descentes en température, la relaxation de ces contraintes par délamination puce/plot ou fissures pourrait entraîner la perte du bon couplage thermique et à terme le court-circuit de la jonction par emballement thermique. Les analyses destructives et les mesures de planéité apporteront des précisions sur ce point. Une dernière hypothèse peut incriminer la découpe des puces. Elle est réalisée mécaniquement et peut créer des amorces de fissures en bord de structure.

Des mesures de planéité de puces par profilométrie mécanique avant et après vieillissement permettent de constater que la structure TFFC se déforme clairement au cours du vieillissement. La Figure 38 présente la planéité d'une puce neuve comparée à celle d'une puce du module TFFC 80, après 6000 h de vieillissement à la température T_{plaque}=145 °C. La caractérisation initiale de la puce met en évidence la présence de reliefs au niveau des vias évalués à 225 nm. La présence d'une courbure est également observée sur toute la largeur de la puce dont le rayon de courbure est évalué à 0,104 m. Concernant la puce vieillie, on constate une forte dégradation de la planéité de surface. Les reliefs principaux sont situés entre les plots d'Au, dont la localisation est très marquée. La Figure 39 permet de confirmer ce point. La déformation de la structure a lieu entre les plots d'Au et le relief maximal a été mesuré à environ 1000 nm. La déformation de la structure pourrait confirmer de nombreuses hypothèses précédemment établies : d'un point de vue électrique, la déformation de la puce est une source potentielle de défauts et/ou fissures qui résultent en une augmentation des fuites électriques. A terme, ces défauts pourraient amorcer les courts-circuits de jonctions observés. D'un point de vue thermique, ces déformations entraînent inévitablement des décollements de puce vis à vis du matériau de remplissage. Cela peut justifier la forte augmentation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ enregistrée de 34 %. Notons que cette déformation de puce a été constatée pour les trois conditions de vieillissement, y compris à la température T_{plaque} = 105 °C, avec un relief maximal entre les plots d'Au mesuré à environ 800 nm.

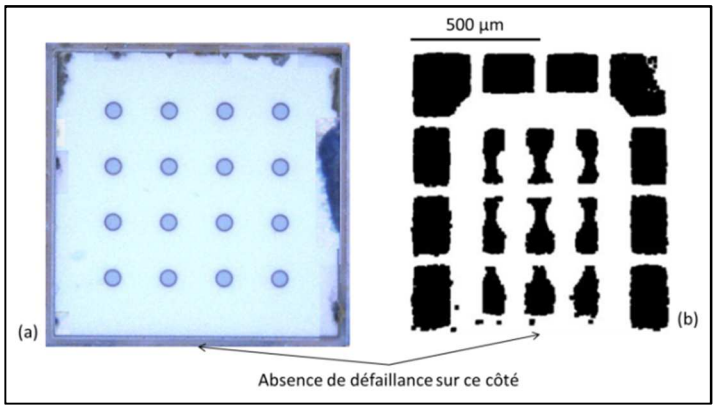


Figure 36 : Localisation de l'ensemble des défaillances (court-circuit de jonction) superposés sur une puce TFFC « virtuelle » (a), et localisation des plots d'interconnexion (b).

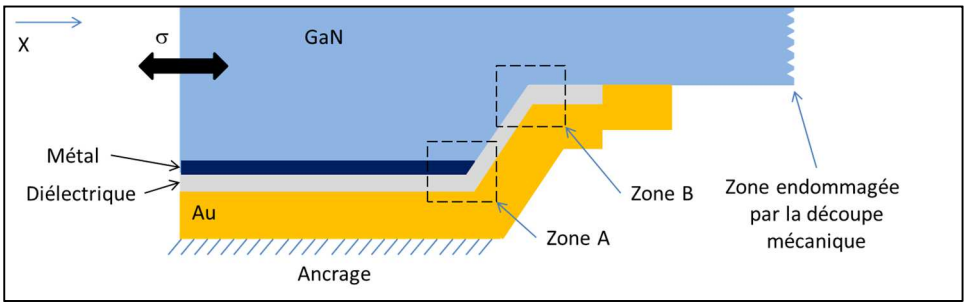


Figure 37 : Localisation des faiblesses mécaniques d'un via périphérique de puce de la structure TFFC.

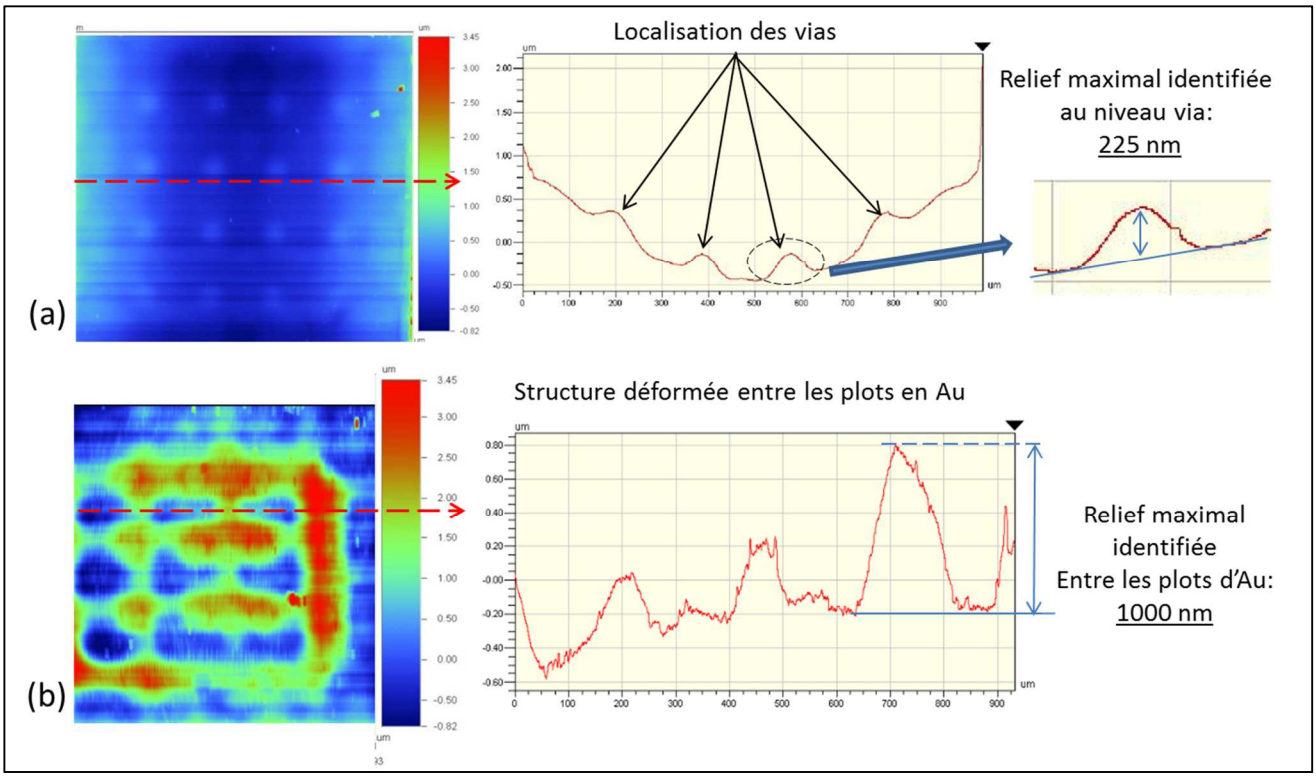


Figure 38 : Caractérisation de la planéité de la structure TFFC avant et après vieillissement par profilométrie mécanique. (a), puce neuve et (b), puce vieillie 6000 h à la température T_{plaque} = 145 °C.

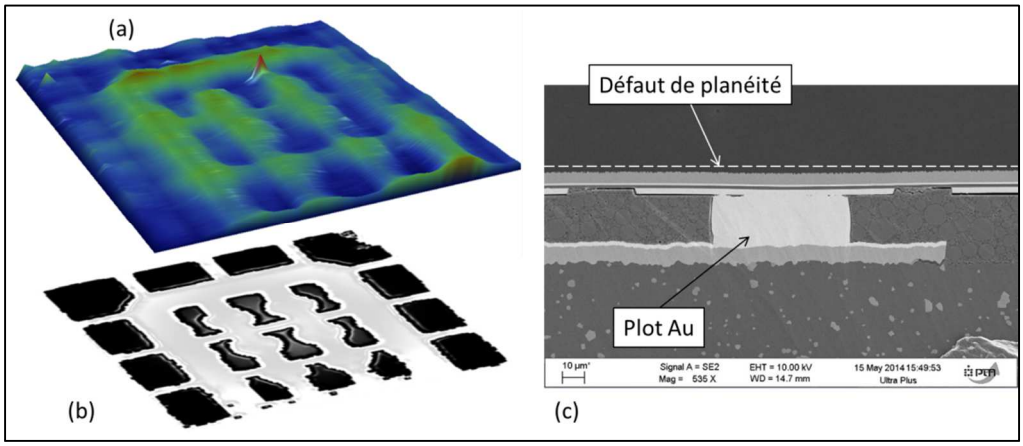


Figure 39 : Reconstruction en 3 dimensions de la planéité de la puce du module TFFC 80 (a) et correspondance avec la localisation des plots d'Au sous la puce (b). Confirmation par micro-section (c).

5.2.2 Analyses destructives

Le suivi des paramètres optiques (P_{opt}) et électriques (V_{th}) ont mis en lien la défaillance optique brutale avec la mise en court-circuit de jonction d'au moins une puce TFFC. L'analyse des micro-sections de puces défaillantes permet de caractériser cette défaillance brutale. L'exemple donné en Figure 40 est celui d'une puce défaillante du module TFFC 15, vieilli à la température T_{plaque}= 145 °C. L'analyse met en évidence une absence de contact entre la puce et le plot d'accueil en Au (zone d'assemblage par thermocompression). Cette constatation corrèle la seconde hypothèse (dégradation du couplage thermique) et enfin, la mise en court-circuit de sa jonction par emballement thermique.

Le détail du via périphérique est donné en Figure 41. La zone de mise en court-circuit de jonction est localisée, située entre les contacts N et P au niveau de la gravure du GaN P du via périphérique (fissure du diélectrique). Deux autres micro-sections ont été réalisées sur des puces différentes et confirment ce résultat. De plus, la présence de l'intermétallique Au_X-Al_Y, coté contact N, a été confirmée par EDX.

L'état de l'art des intermétalliques Au_XAl_Y rapporte une plus forte résistivité de tous les alliages possibles entre Au et Al par rapport aux métaux purs pris séparément. Les résistivités des alliages est entre 10 à 20 fois supérieures à l'Al ou l'Au, comme le confirme le Tableau 16 [26]. Une hypothèse logique consiste à dire que l'augmentation de la résistance R_s puisse être en lien avec une modification de la nature des matériaux traversés électriquement.

La Figure 42 permet d'évaluer la température de surface de la puce GaN TFFC neuve en regard de la structure des plots d'accueil en Au sous la puce. La caractérisation IR réalisée à un courant I_f= 700 mA met en évidence une différence de température entre le centre et le bord de puce d'environ 7 °C. Cette présence de gradient thermique constitue un argument supplémentaire dans la suite du manuscrit pour étayer les hypothèses proposées.

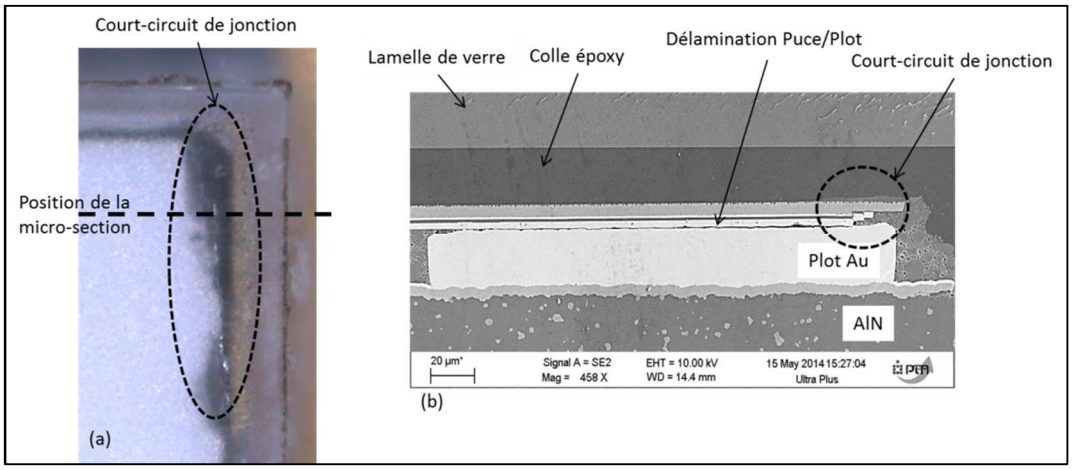


Figure 40 : Micro section d'une puce défaillante du module TFFC 15. Mise en évidence de délamination entre puce et plot d'interconnexion FC. Image optique (a) et image MEB en électrons secondaires de la zone découpée (b).

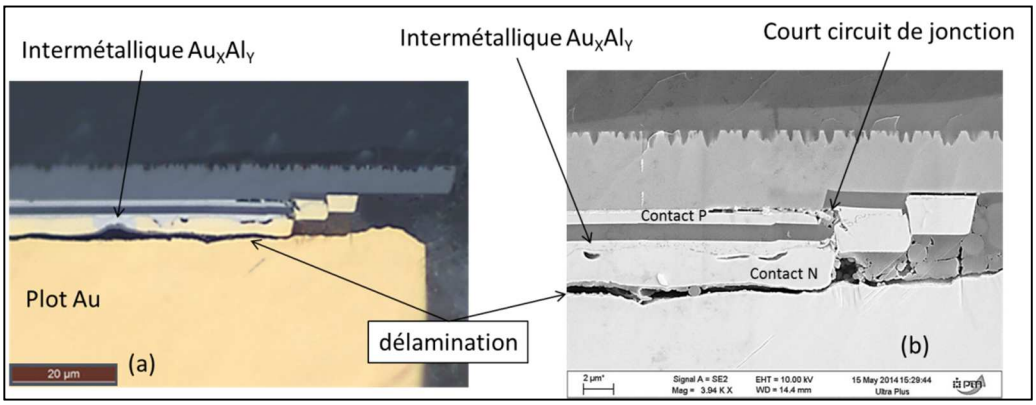


Figure 41 : Micro section d'une puce défaillante du module TFFC 15. Mise en évidence du court-circuit de jonction et présence d'intermétallique Au_xAl_y. Image optique (a) et image MEB de la zone découpée (b).

Type d'alliage	Composition (% At. Au)	Dureté (GPa)	Résistivité (mΩ.cm)	Coefficient de dilatation thermique linéaire (ppm.°C^{-1})
Al	0-0,06	20-50	2,65	24
$AuAl_2$	32,9-33,9	263	50	9
AuAl	50	249	12,4	12
Au_2Al	65-66,7	130	31,1	13
Au_4Al	80	334	37,5	12
Au_5Al_2	71	271	25,5	14
Au	84-100	60-90	2,35	14

Tableau 16 : Synthèse des propriétés physiques des intermétalliques Au_XAl_Y [26].

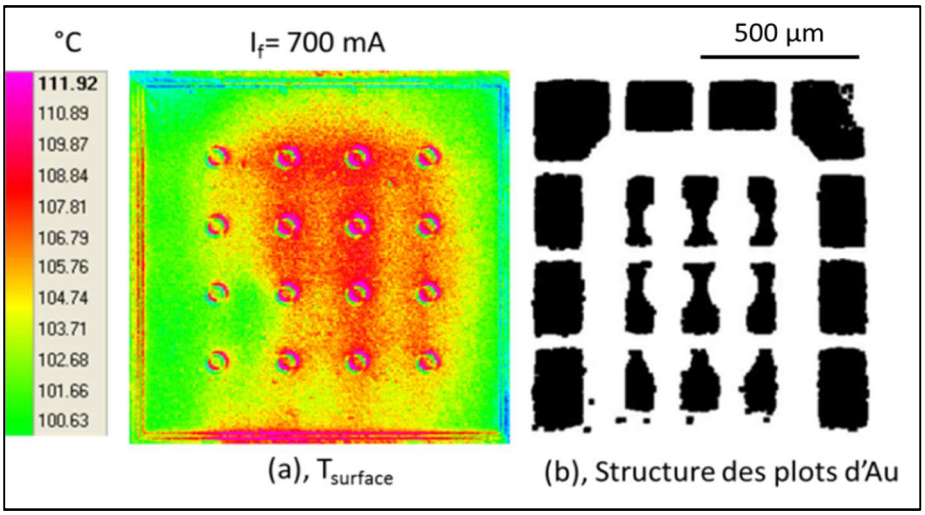


Figure 42 : Caractérisation par thermographie IR de la température de surface d'une puce TFFC neuve (a), en regard de la structure de connexion par plots d'Au disposés sous la puce (b).

Avec les dérives paramétriques enregistrées lors des tests et les analyses de défaillance réalisées, On peut maintenant consolider les hypothèses émises concernant la forte augmentation de la résistance série R_s:

- La formation des intermétalliques du type Au_XAl_Y dans le chemin électrique de la structure TFFC entraîne l'augmentation du paramètre R_s des modules lors des vieillissements. Si l'on considère le pire cas, les contacts N composés des vias circulaires de 50 µm de diamètre et périphérique de 4 µm de large sont recouverts de 3 µm d'intermétallique Au_4Al, identifié par B.HAMON [27]. En prenant la résistivité de l' Au_4Al à $\rho = 37{,}5.10^{-8}$ Ω.m, le calcul de résistance donne $R_{Au4Al\ puce}$ = 240 µΩ. Chaque module comporte 4 puces en série, ce qui

donne à l'échelle module, une résistance $R_{Au4Al\ module} \approx 1\ m\Omega$. La formation d'intermétallique va dans le sens d'une augmentation du paramètre R_s mais n'est pas suffisante pour expliquer les augmentations constatées en vieillissement.

- La Figure 43 met en évidence une dégradation de la métallisation côté N aux passages des marches de la structure TFFC: Cela pourrait être la conséquence de la formation d'intermétalliques par diffusion d'Au et isolement électrique progressif des via circulaires. L'injection du courant n'est plus homogène sur la surface de la puce, et la résistance équivalente de la structure augmente. Ce phénomène a été étudié par plusieurs équipes par des approches analytiques et numériques [28] [29] [30].

- La campagne de robustesse (chapitre 3) a mis en évidence une fragilité de l'interface Ag/GaN-P par des délaminations suite au test en température. En vieillissement, si des décollements ont lieu à cette interface, l'injection du courant n'est plus homogène sur la surface de la puce, la surface d'injection de courant diminue et la résistance équivalente de la structure augmente.

Nous venons de présenter les analyses de défaillances appliquées à la technologie TFFC après vieillissement après avoir commenté l'ensemble des évolutions paramétriques. Les analyses croisées ont permis de proposer certaines hypothèses quant aux mécanismes de dégradation mis en jeu.

Le Tableau 17 synthétise l'ensemble des informations collectées à travers l'étude de ces modules TFFC. Nous rappelons l'hypothèse principale considèrant que les vieillissements ont été réalisés à iso mécanismes de dégradations. Les dégradations constatées à 6000 h sont donc plus marquées qu'au temps t_{L70} mais considérées comme issues des mêmes mécanismes de dégradation.

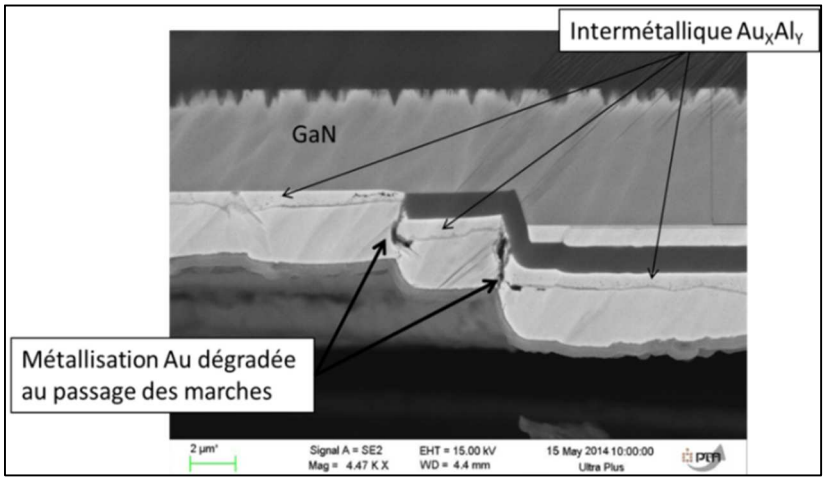


Figure 43 : Image MEB en électrons secondaires mettant en évidence la dégradation de la métallisation N (Au) au passage des marches d'un via circulaire après 6000 h de vieillissement à la température T_{plaque} = 145 °C.

Evolutions paramétriques jusqu'à défaillance (t_{L70})	
Optique	• Dérive brutale de la puissance optique P_{opt} pour tous les modules • Augmentation modérée du ratio Y/B (+ 10 %)
Electrique	• Forte chute de la résistance R_p (facteur 10^6) • Augmentation du paramètre R_s (+ 73 % à la température T_{plaque} = 145 °C) • Deux évolutions de la tension de seuil V_{th} : - Augmentation graduelle, dégradation probable de l'interface métal/semi-conducteur - Chute brutale par perte de fonctionnalité de puce(s)
Thermique	• Augmentation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de 34% entre 0 et 6000 h (moyenne sur seulement 4 composants exploitables)
Analyse de défaillance à 6000 h	
Mode de défaillance	• Dérive brutale de la puissance optique P_{opt} • Perte brutale et aléatoire de fonctionnalité de puce
Hypothèses de mécanismes de défaillance	• Perte de la bonne répartition du courant dans la structure • Défaut systématiquement observé en bord de puce (via périphérique) • Délamination caractérisée entre la puce et les plots en Au • Perte du bon couplage thermique entre la puce et les plots • Court-circuit de jonction entre les contacts N et P

Tableau 17 : Bilan des évolutions paramétriques et de l'analyse de défaillance des modules de LEDs TFFC étudiés en vieillissement.

5.3 Extraction de paramètres

Cette partie s'attache à extraire les paramètres usuels de fiabilité afin de caractériser le vieillissement des modules TFFC, d'en déduire une énergie d'activation $E_{a\ TFFC}$ des mesures, pour permettre de définir le facteur d'accélération appliqué lors des trois conditions de vieillissement. Il sera ensuite possible de désaccélérer les comportements mis en évidence et ainsi estimer une durée de vie des modules TFFC dans un profil de mission automobile.

Les défaillances, que nous avons principalement observé sur les LEDs TFFC, sont des défaillances brutales, surtout dans les essais aux températures 125°C et 145°C qui sont situés en dehors de la plage de spécification de ces LEDs. il apparaît légitime de remettre en question l'accélération appliquée expérimentalement dans cette étude compte tenu de l'apparition de probables phénomènes anormaux. Cependant, notre accélération est issue de l'étude de robustesse telle que décrite dans le chapitre 3. Donc, dans le contexte de l'étude, nous prendrons ces défaillances brutales en compte dans les projections de durée de vie.

5.3.1 Méthodologie

La méthodologie est identique à celle appliquée aux modules VTF. Le critère de défaillance est fixé à L_{70}. La première étape consiste donc à relever pour chaque module, le temps t_{L70} nécessaire pour atteindre ce critère. Dans notre étude, deux cas de figure se présentent :

- Le critère de défaillance (L_{70}) est atteint dans les vieillissements. Dans ce cas, le critère est franchi par dérive catastrophique. Le temps t_{L70} sera déterminé par régression linéaire sur les deux points qui encadrent le passage du critère à t_{L70}. Cependant, l'incertitude sur cette valeur de temps sera donc bornée par les deux points de mesure avant et après la défaillance. Cette étude pourrait alors être complétée par la mise en place d'un dispositif de suivi relatif du flux optique en temps réel afin de connaître l'instant précis de défaillance.

- Le critère de défaillance (L_{70}) n'est pas atteint lors des vieillissements. Dans ce cas, une extrapolation devient difficile. En effet, le mode de défaillance brutal n'est pas prévisible et l'ensemble des mesures réalisées n'ont pas permis de définir un indicateur qui permettrait de les anticiper.

La dégradation graduelle des performances existe mais elle est masquée par l'apparition des défaillances non prévisibles. Les températures de vieillissement pratiquées ne permettent pas d'activer exclusivement une dérive graduelle jusqu'au critère de défaillance, même dans le cas du vieillissement dans les conditions spécifiées par le fabricant (température T_{plaque}=105°C). A priori, il aurait fallu diminuer en température de vieillissement pour observer majoritairement des défaillances de type dérive.

Quelques ajustements spécifiques aux modules TFFC ont été appliqués :

- Un module TFFC est considéré défaillant dès lors qu'une puce est défaillante (court-circuit de jonction) même si la puissance optique P_{opt} reste supérieure 70 % du flux initial. Ce critère de défaillance a été retenu pour deux raisons : la perte de fonctionnalité d'une puce entraîne une modification du point de fonctionnement de l'électronique de pilotage du projecteur, avec une puissance thermique à dissiper plus importante, ce qui réduit considérablement sa durée de vie. D'autre part, une des quatre puces n'émet plus de lumière ce qui change complètement le couplage optique entre la source à LEDs et son optique.
- Le critère de retrait de composant en vieillissement a été retenu dès lors que 3 puces sur 4 sont défaillantes au sein d'un module. Le module étant considéré défaillant dès la perte d'une puce, cela n'aura pas de conséquence sur l'extraction des données de fiabilité.

5.3.2 Fonction de défaillance cumulée

Les valeurs de temps t_{L70} de chaque module de LEDs sont classées par ordre croissant dans le Tableau 9. Ce tableau regroupe pour les trois conditions de vieillissement, les t_{L70} ainsi que l'incertitude liée au banc de mesure pour chaque module. Les t_{L70} sont classés dans l'ordre croissant.

A partir des valeurs de t_{L70}, on peut définir et tracer F(t), la fonction de défaillance cumulée. Les F(t) pour les trois conditions de vieillissement sont représentés en Figure 44. Cette représentation permet d'extraire les valeurs t_{L70B50}, qui seront utiles à la détermination de l'énergie d'activation des mécanismes de dégradation engagés. Les valeurs de t_{L70B50}, sont présentées dans le Tableau 10. L'inconvénient des défaillances de type catastrophique est que dans notre cas elles sont non prévisibles. Cela entraîne une incertitude sur le temps t_{L70} défini par l'intervalle de mesure.

T_1 : T_{plaque}=105 °C				T_2 : T_{plaque}=125 °C				T_3 : T_{plaque}=145 °C			
Module	t_{L70} (h)	Incertitude négative (h)	Incertitude positive (h)	Module	t_{L70} (h)	Incertitude négative (h)	Incertitude positive (h)	Module	t_{L70} (h)	Incertitude négative (h)	Incertitude positive (h)
50	23,7	23,7	0,3	60	289	121	211	76	450	282	50
77	2948	948	51	72	912	412	88	15	662	162	338
79	3420	420	579	42	1753	1253	247	51	714	214	286
71	4676	676	323	75	1824	824	176	88	774	274	226
54	5044	1044	955	53	2530	530	470	70	908	408	92
30	?	-	-	27	2683	683	317	44	940	440	60
55	?	-	-	91	2764	764	236	86	1222	222	778
82	?	-	-	21	3712	712	288	32	1290	290	710
89	?	-	-	24	6429	429	571	80	1326	326	674
96	?	-	-	63	7796	796	204	61	3315	315	685

Tableau 18 : Résultats des vieillissements accélérés de la technologie TFFC, représentatifs du critère L_{70}.

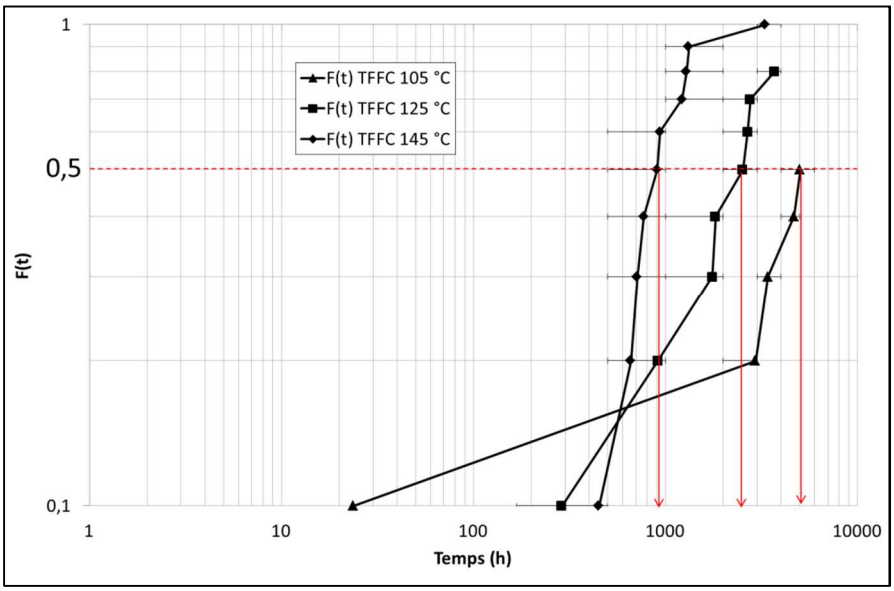


Figure 44 : Fonction de défaillance cumulée F(t) des modules TFFC pour les trois conditions de vieillissement.

Condition	T_1 : T_{plaque}=105 °C	T_2 : T_{plaque}=125 °C	T_3 : T_{plaque}=145 °C
t_{L70B50} (h) encadrée	5000 < 5044 < 6000	2000 < 2530 < 3000	500 < 908 < 1000

Tableau 19 : Valeurs de t_{L70B50} des modules TFFC pour les trois conditions de vieillissement.

On peut également déduire des données du Tableau 18 l'évolution de λ(t), taux moyen de défaillance en FITs. Le tracé de λ en fonction de t est présenté en Figure 45. On constate tout d'abord une non linéarité, le taux moyen de défaillance diminue avec le temps pour atteindre un plateau entre 1000 et 5000 FITs. Cette diminution du taux de défaillance dans le temps est représentative de défauts de jeunesse ou des défauts technologiques (inhomogénéité de la plaque considérée, mauvaise maîtrise du procédé de fabrication,…). Dans ce cas, on suppose que les versions actuelles ou nouvelles versions des composants TFFC devront être corrigées.

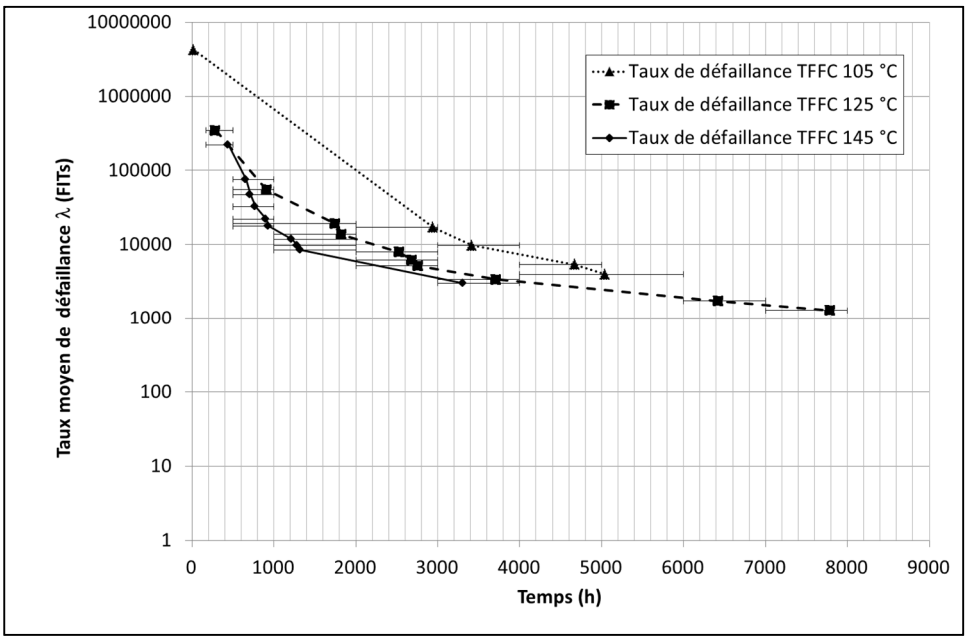


Figure 45 : Evolution du taux de défaillance de la technologie TFFC en fonction du temps et de la température de vieillissement.

5.3.3 Détermination de l'énergie d'activation

En se basant sur les valeurs t_{L70B50} aux trois températures des vieillissements, on peut déterminer l'énergie d'activation moyenne $E_{a\ TFFC}$ (équation 14). En traçant $Ln(t_{L70B50})= f\ (1/T)$ pour chaque température de vieillissement, la pente de la droite est égale à Ea/k_b. Le tracé est présenté en Figure 46.

Les trois points permettent d'extraire une énergie d'activation moyenne $E_{a\ TFFC}$ de 0,582 eV. A cause des incertitudes de mesures fortes liées au caractère imprévisible des défaillances, cette valeur est comprise entre 0,581 et 0,711 eV sur la plage de température T_{plaque} entre 105 et 145°C. Le changement de pente entre les zones 105-125 °C et 125-145 °C permet d'évaluer deux énergies d'activation $E_{a105\text{-}125}$ et $E_{a125\text{-}145}$ respectivement égales à 0,448 et 0,735 eV. Cette différence d'énergie d'activation indique que les mécanismes de dégradation mis en jeu ne sont pas les mêmes sur les deux plages de température.

Si l'on applique la même méthodologie sur un critère de défaillance électrique défini par une augmentation de R_s de 25 %, les valeurs de temps $t_{Rs25B50}$, définies comme étant le temps nécessaire pour que 50 % de la population atteigne une augmentation de 25 % de R_s, sont données dans le Tableau 20. Les incertitudes liées aux mesures électriques de R_s sont calculées sur la répétabilité de la mesure du R_s sur les LEDs témoins. La méthode de détermination des temps associés est la même que celle adoptée pour le critère de défaillance optique.

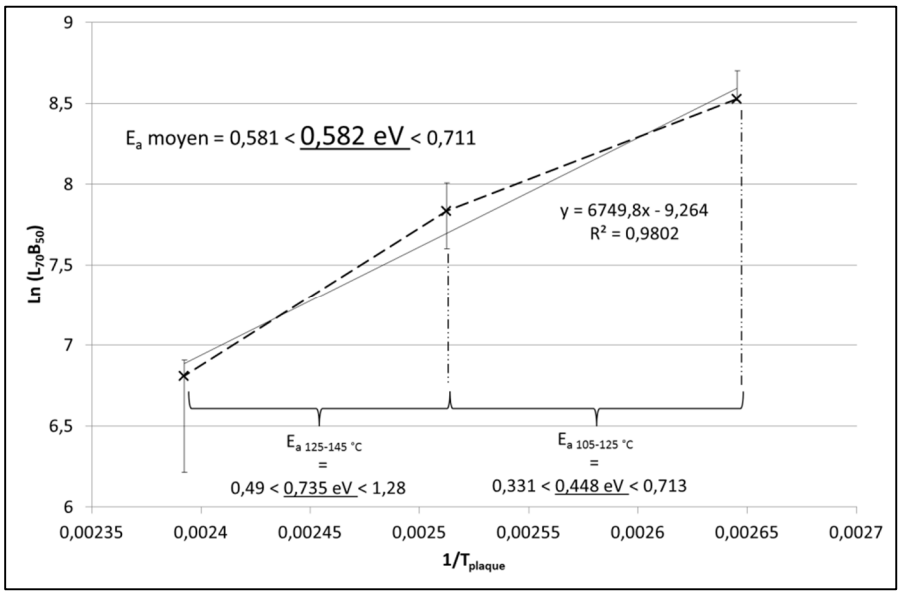


Figure 46 : Tracé $Ln(t_{L70B50})=f\ (1/T)$ pour la détermination de l'énergie d'activation des modules TFFC.

Condition	$T_1 : T_{plaque}$=105 °C	$T_2 : T_{plaque}$=125 °C	$T_3 : T_{plaque}$=145 °C
$t_{Rs25B50}$ (h)	4066 ± 187	1181 ± 51	65 ± 3

Tableau 20 : Valeurs de $R_{s25}B_{50}$ des modules TFFC pour les trois conditions de vieillissement.

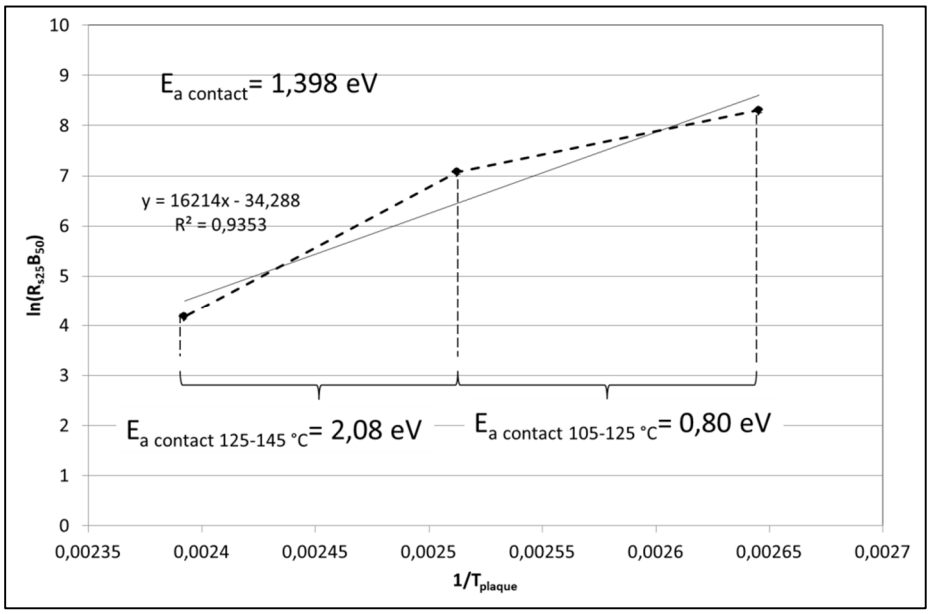


Figure 47 : Tracé Ln($R_{s25}B_{50}$)=f (1/T) pour la détermination de l'énergie d'activation « de contacts » dans les modules TFFC.

Basés sur un critère électrique, ces temps moyens de durée de vie permettent de déterminer une énergie d'activation « de contacts » qui est de 1,398 eV, illustrée en Figure 47. Les énergies d'activation portant sur les mécanisme de dégradations de contacts dans les composants électroniques sont généralement fortes. L'état de l'art rapporte des valeurs supérieures à 1 eV [5] [7]. L'état de l'art est donc en cohérence avec les valeurs déterminées dans notre étude. Cela renforce l'hypothèse établie entre l'augmentation de R_s et la dégradation des contacts de la structure TFFC.

5.3.4 Fonction de répartition de Weibull

Nous avons constaté que le taux de défaillance λ n'est pas constant au cours du temps (Figure 45). Cela traduit que la fonction de répartition associée au vieillissement des modules TFFC correspond à une loi Weibull. De la même façon que pour la technologie VTF, un changement de variable permet de tracer la représentation de Weibull.

La pente de la droite permet d'obtenir la valeur de β et l'intersection de la droite avec la droite Y=0 donne la valeur de η. Le tracé Y=f(X) est présenté en Figure 48. La défaillance à t= 24 h pour le vieillissement à 105 °C a été écartée car clairement identifiée comme défaut de jeunesse par la représentation de Weibull (β < 1).

Les paramètres β et η, associés à la fonction de répartition de Weibull sont donnés dans le Tableau 21. En lien avec le paragraphe 2.4.2, les paramètres β sont supérieurs à 1 pour les trois conditions, ce qui signifie que les modules TFFC ont atteint un régime d'usure lors des vieillissements. Cependant la condition 2 a un β très proche de 1, représentatif d'un vieillissement à λ constant. D'autre part, la forte disparité des valeurs de β met en évidence une disparité dans les comportements en vieillissement accéléré. Toutefois, la projection des droite à 0,5 % de défaillance donne des temps $L_{70}B_{0,5}$ de 372, 21 et 149 h, respectivement pour des température T_{plaque} de 105, 125 et 145 °C (avec I_f = 1A).

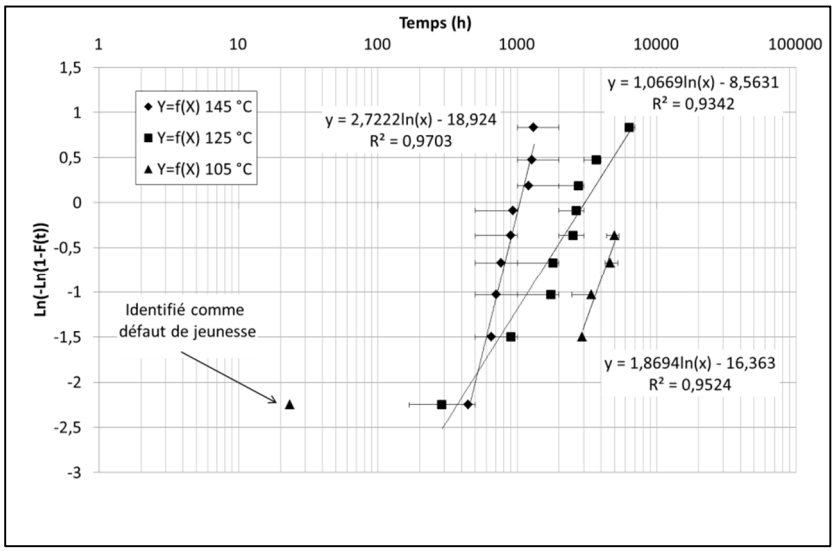


Figure 48 : Tracé de Weibull après vieillissement des modules TFFC.

Condition	T_1 : T_{plaque}=105 °C	T_2 : T_{plaque}=125 °C	T_3 : T_{plaque}=145 °C
β	1,869	1,067	2,722
η	6330 h	3059 h	1045 h

Tableau 21 : Extrapolation des paramètres de la fonction de répartition de Weibull pour les modules TFFC.

6 Synthèse et comparaison des technologies en vieillissement

Ce paragraphe s'attache à dresser un bilan comparatif des deux technologies étudiées à travers cette étude de fiabilité. Les dérives paramétriques et les analyses de défaillance sont synthétisées, et enfin, la compréhension de ces comportements en vieillissement sera transposée à l'échelle d'un ensemble de modules afin de comprendre les conséquences des deux types de défaillances observés sur la durée de vie « module ».

6.1 Dérives paramétriques

Le Tableau 22 répertorie l'ensemble des dérives paramétriques collectées à travers l'étude de fiabilité des deux structures étudiées. Pour la structure VTF, on note une dérive graduelle du flux optique, une dérive du point du ratio Y/B de 20 % et une stabilité des paramètres électriques et thermiques. Concernant les modules TFFC, une dérive brutale du flux est observée, et de fortes dérives des paramètres électriques jusqu'à + 73 % pour le paramètre R_s et une augmentation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de 34 %.On peut synthétiser des différences majeures comportementales :

- Optiquement, la différence majeure concerne le type de dérive de flux optique dans le temps caractérisée par une dérive graduelle pour la structure VTF et brutale pour la TFFC.
- Electriquement, on note des dérives de tous les paramètres électriques pour la structure TFFCalors que la structure VTF présente des paramètres électriques stables dans le temps.
- Thermiquement, seule la structure TFFC a montré des dérives de résistance thermique $R_{thj\ puits}$ de + 34 %.

	Structure VTF	Structure TFFC
Optique	• Dérive graduelle de la puissance optique P_{opt} pour tous les modules • Augmentation du ratio Y/B (maximum +20 %)	• Dérive brutale de la puissance optique P_{opt} pour tous les modules • Augmentation modérée du ratio Y/B (+10 %)
Electrique	• Stabilisation de la résistance R_p à 100 MΩ à 1000 h (indépendante de la température T_{plaque}) • Stabilité du paramètre R_s (maximum + 8 %) • Stabilité du paramètre V_{th} (aucune dérive mesurée)	• Forte chute de la résistance R_p (facteur 10^6) • Augmentation du paramètre R_s (+ 73 % à la température T_{plaque} = 145 °C) • Deux évolutions du paramètre V_{th} : - Augmentation graduelle, dégradation probable des contacts - Chute brutale, perte de fonctionnalité de puce(s)
Thermique	• Stabilité de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ (aucune dérive enregistrée à 6000 h)	• Augmentation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de 34% entre 0 et 6000 h (moyenne sur 4 composants exploitables)

Tableau 22 : Bilan des évolutions paramétriques jusqu'à L_{70} des technologies VTF et TFFC étudiées en vieillissement.

6.2 Analyses de défaillance

	Structure VTF	Structure TFFC
Mode de défaillance	• Dérive graduelle de la puissance optique P_{opt} • Perte du rendement quantique de la puce (hypothèse) • Diminution de la puissance optique bleue • Augmentation du ratio Y/B • A terme, court-circuit de jonction à proximité du contact N (point chaud). Observé à 6000 h sur les modules 14 et 16 seulement	• Dérive brutale de la puissance optique P_{opt} • Perte brutale et aléatoire de fonctionnalité de puce
Mécanisme probable de défaillance	• Augmentation de la densité de défauts, perte de performance de la puce • Probable perte de transparence optique du silicone • Court-circuit de jonction due à un défaut ou forte densité de courant locale (contact N)	• Défaut systématiquement observé en bord de puce (via périphérique) • Délamination caractérisée entre la puce et les plots en Au • Perte du bon couplage thermique • Court-circuit de jonction entre les contacts N et P

Tableau 23 : Bilan des analyses de défaillance des modules de LEDs VTF et TFFC étudiés en vieillissement.

Le Tableau 23 répertorie les informations principales collectées lors des analyses de défaillance. Les évolutions de perte de flux optique lors du suivi paramétrique entraînent des modes de défaillance différents : graduel pour la structure VTF et catastrophique pour la structure TFFC. On soulignera le caractère aléatoire des défaillances au niveau puce sur la structure TFFC. En terme de mécanismes de défaillances, des pertes d'efficacité de la puce couplées à une dégradation physique de la matrice silicone du luminophore ont été identifiées pour la structure VTF. Pour la structure TFFC, des court-circuits systématiques en bord de puce sont considérées comme la conséquence de dégradations matériaux et déformation prononcée de la structure.

6.3 Comportement en vieillissement (fiabilité module)

L'étude de fiabilité a mis en évidence deux types de mode de défaillance propres à chaque technologie de puces étudiée :

- Défaillance graduelle pour la technologie VTF.
- Défaillance catastrophique pour la technologie TFFC, due à la perte complète de fonctionnalité d'au moins une puce.

Ces deux types de défaillance (catastrophique et graduelle) entraînent des probabilités de premier instant de défaillance au niveau module radicalement différentes que nous allons détailler maintenant.

6.3.1 Cas d'une dé-fiabilisation par défaillance graduelle

Considérons un lot de 10 modules ($N_{modules}$) chacun comportant 4 puces soit 40 puces (N_{puces}) présentant une défaillance de type dérive. Le critère de défaillance est considéré à L_{70}. Nous posons l'hypothèse que toutes les puces présentent le même comportement en vieillissement, à savoir une perte de flux graduelle. C'est la configuration déployée dans cette étude mais cela peut également représenter un projecteur automobile intégrant une pluralité de modules multi-puce. Dans ces conditions, un module sera défaillant lorsque ses quatre puces seront défaillantes.

La Figure 49 présente l'évolution du nombre de modules fonctionnels du lot considéré (N_f) en fonction du nombre de puces défaillantes. L'apparition d'une puce défaillante est considérée comme aléatoire dans la population de puces fonctionnelles restantes. On comprend donc que le nombre de modules fonctionnels est régi par la répartition des puces défaillantes dans les modules. Si 4 puces sont défaillantes dans le lot, on aura soit 1 module défaillant, avec les quatre puces défaillantes, soit aucun module défaillant, avec les quatre puces réparties dans deux, trois, ou quatre modules différents. Ainsi, on obtient plusieurs chemins possibles, encadrés par deux chemins extrêmes de faible probabilité :

- Le chemin dit « optimiste » consiste en une équi-répartition des puces défaillantes dans tous les modules en gardant au moins une puce fonctionnelle par module. Cela est réalisable jusqu'à 30 puces défaillantes (3 puces par module défaillant) ou plus généralement N_{puces}-$N_{modules}$. Ensuite chaque puce défaillante supplémentaire entraine la perte d'un module.
- Le chemin dit « pessimiste » consiste à cumuler les puces défaillantes dans un même module. On aura donc un module défaillant toutes les 4 puces défaillantes. Le nombre minimal de puces défaillantes pour obtenir un module défaillant est donc le nombre de puces par module.

Ces deux chemins délimitent une zone qui constitue un ensemble de chemins possibles qui ont chacun une probabilité d'occurrence donnée. Devant la complexité des calculs de probabilité associés à chaque chemin, une simulation de 10 000 chemins a été réalisée numériquement par tirage aléatoire de puces et a permis de placer la probabilité maximale de premier instant de défaillance au niveau module après la défaillance de 22 puces. Il est possible d'évaluer cette probabilité d'occurrence pour la perte de 5 modules. Le nombre de puces VTF défaillantes le plus probable pour perdre 5 modules est de 32 puces. Les mesures optiques ont été réalisées à l'échelle du module et il n'est donc pas possible de comparer ces simulations (par puce) aux mesures en vieillissement. Néanmoins, nous allons voir que le comportement de la technologie TFFC permet d'extraire des informations relatives aux défaillances de puce.

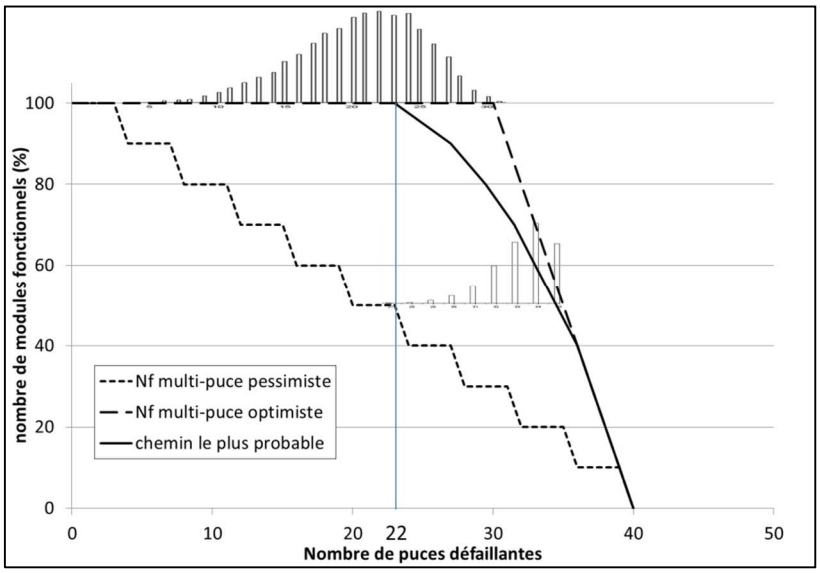


Figure 49 : Evolution de la fiabilité d'un lot de 10 modules de 4 puces présentant un mode de défaillance graduelle en fonction du nombre de puces défaillantes.

6.3.2 Cas d'une dé-fiabilisation par défaillance partielle brutale

Considérons maintenant un lot de 10 modules ($N_{modules}$) de 4 puces soit 40 puces (N_{puces}) présentant une défaillance de type catastrophique (perte de fonctionnalité brutale). Les puces fonctionnelles présentent une dérive de flux dans le temps qui est considérée comme négligeable. Un module est donc considéré comme défaillant dès lors qu'il perd la fonctionnalité d'une puce. C'est un fait établi en tenant compte des tests de fiabilité sur la technologie TFFC où ce mécanisme a été principalement rencontré. Considérons ce lot de 10 modules qui pourrait représenter la configuration d'un projecteur automobile.

La Figure 50 présente l'évolution du nombre de modules fonctionnels (N_f) du lot considéré en fonction du nombre de puces défaillantes. L'apparition d'une puce défaillante est considérée comme aléatoire dans la population de puces fonctionnelles restantes. Si 4 puces sont défaillantes dans le lot, on aura soit 4 modules défaillants, avec les quatre puces réparties sur quatre modules différents, soit un seul module défaillant qui cumule les quatre puces défaillantes. Ainsi, on obtient plusieurs chemins possibles, encadrés par deux chemins extrêmes de faible probabilité :

- Le chemin dit «optimiste » consiste à cumuler les puces défaillantes dans un même module. La première puce défaillante entraîne la perte d'un module mais le second module défaillant apparaîtra lors de la perte de 5 puces. Le nombre minimal de puces défaillantes pour obtenir un module défaillant est donc une seule puce.
- Le chemin dit « pessimiste » consiste à répartir les puces défaillantes dans des modules différents et 10 puces défaillantes seront donc suffisantes pour perdre tous les modules.

Ces deux chemins délimitent une zone qui constitue un ensemble de chemins possibles qui ont chacun une probabilité d'occurrence donnée. De la même façon que la technologie VTF, une simulation de 10 000 chemins a été réalisée numériquement par tirage aléatoire de puces et a permis de placer la probabilité maximale de perdre tous les modules après la défaillance de 19 puces. D'autre part, il est possible d'évaluer cette probabilité d'occurrence pour la perte de 5 modules. Le nombre de puces TFFC défaillantes le plus probable pour perdre 5 modules est de 5 puces.

Les mesures optiques couplées aux caractéristiques I(V) ont permis de détecter facilement la perte de fonctionnalité des puces en vieillissement. Ainsi, il est possible de placer sur cette

représentation, les chemins empruntés par les trois lots de vieillissement aux températures T_{plaque}= 105, 125 et 145 °C. On constate d'une part que les chemins empruntés par les trois lots se situent dans une zone de forte probabilité d'occurrence. D'autre part, ce type de défaillance considérée au niveau puce entraîne un premier instant de défaillance au niveau module dès la première puce défaillante. Dans le cas d'un projecteur à LEDs intégrant plusieurs modules, les conséquences sont immédiates et lourdes.

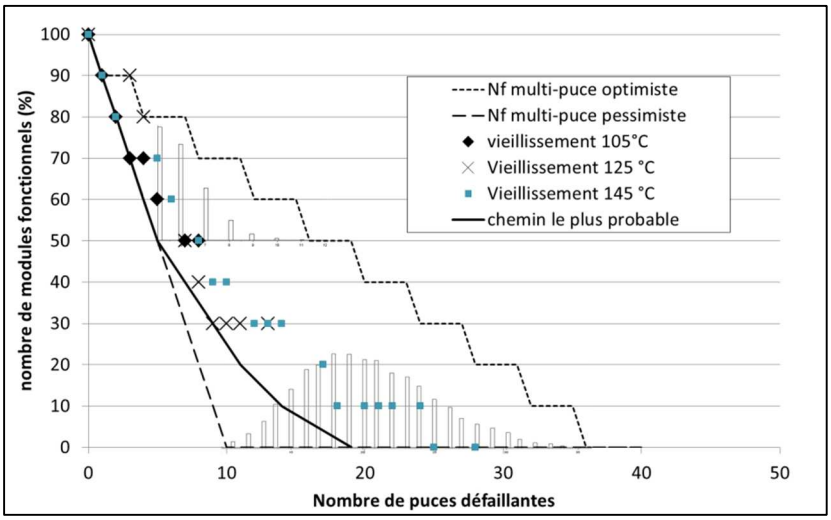


Figure 50 : Evolution de la fiabilité d'un lot de 10 modules de 4 puces présentant un mode de défaillance partielle brutale en fonction du nombre de puces défaillantes.

6.3.3 Synthèse

Nous venons de mettre en lumière les conséquences des deux comportements enregistrés lors des tests de fiabilité, sur la fiabilité au niveau module. Le Tableau 24 résume les conséquences des deux comportements en considérant les deux cas extrêmes.

	Défaillances graduelles	Défaillances partielles brutales
Nombre de modules	10	10
Nombre de puces	40	40
Nombre de puces par module	4	4
Mode de défaillance	Graduel	Brutal
Nombre de puces défaillantes nécessaires pour perdre le premier module (chemin optimiste)	30	1
Nombre de puces défaillantes nécessaires pour perdre le premier module (chemin pessimiste)	4	1

Tableau 24 : Synthèse et comparaison des comportements en vieillissement et les conséquences potentielles au niveau module dans le cas d'un tirage aléatoire de puce défaillante dans la population.

En fonction du type de mécanisme(s) de dégradation activé(s), le mode de défaillance correspondra soit à une dérive graduelle ou à une perte brutale de flux optique. Ces deux modes de défaillance sont radicalement différents et nous avons justifié l'importance majeure de privilégier un mode de défaillance par dérive graduelle à l'échelle d'un système d'éclairage multi-puce connecté en série.

6.4 Durée de vie des modules en environnement automobile

Un profil de mission automobile dédié aux projecteurs code/route se présente sous la forme d'un pourcentage α_i du temps passé, à la température extérieure $T_{amb,i}$, par la pièce au cours de sa vie. Un projecteur automobile présente un auto-échauffement lors de son fonctionnement, c'est pourquoi il

existe, en réalité, deux profils de mission : un profil de mission « de jour » (projecteur éteint, sans auto-échauffement) et un profil de mission « de nuit » (projecteur allumé). Nous justifierons le fait que le vieillissement induit par le profil de mission « de jour » est négligeable devant le profil de mission « de nuit ». Par conséquent, nous considérons uniquement le profil de mission « de nuit » dans les projections de durées de vie. Les calculs sont basés sur la température moyenne de jonction, afin de rendre la méthode applicable à n'importe quelle configuration thermique de projecteur à LEDs. Les hypothèses sont les suivantes :

- A chaque température $T_{amb,i}$ correspond une température moyenne $T_{j,i}$ associée à la configuration thermique du projecteur en fonctionnement (connaissant la résistance thermique $R_{thj\ ambiante}$ et la puissance thermique $P_{thermique}$ à dissiper).
- Le vieillissement est uniquement dû à la température de jonction moyenne T_j des LEDs.
- L'influence du courant n'est pas considérée, les vieillissements réalisés à courant I_{fmax} = 1 A représentent le pire cas d'utilisation.

Grâce aux vieillissements accélérés réalisés, nous avons calculé les énergies moyennes d'activation Ea_{VTF} et Ea_{TFFC} en émettant l'hypothèse que nous avons travaillé à iso mécanismes de dégradation. Il est donc possible de calculer les facteurs d'accélérations correspondants (AF_i) associés aux températures $T_{j,i}$ du profil de mission par la relation:

$$AF_i = e^{\frac{Ea}{k_B}\left(\frac{1}{T_{j,0}} - \frac{1}{T_{j,i}}\right)} \qquad \textbf{Équation 16}$$

Le facteur d'accélération équivalent au profil de mission automobile est ensuite donné par la relation :

$$AF_{eq} = \sum_{1}^{n} \alpha_i AF_i \qquad \textbf{Équation 17}$$

Une fois le facteur d'accélération $AF_{éq}$ déterminé par rapport à une condition de vieillissement (vieillissement à 105 °C pour l'exemple), les calculs des paramètres $t_{L70\ B50}$, $t_{L70B0,5}$ et η de la loi de Weibull en condition opérationnelle automobile s'effectue par le produit du facteur d'accélération $AF_{éq}$ avec les paramètres de durée de vie déterminés en vieillissement accéléré à T_{plaque}= 105°C. L'ensemble des résultats est synthétisé dans le Tableau 25 et basés sur un profil de mission automobile interne Renault du type « Europe ».

D'un point de vue profil de mission, le temps $t_{L70B0,5}$ est une donnée essentielle correspondant à la défaillance de 0,5 % des modules d'une population [31] [32]. Si le cahier des charges demande un $t_{L70B0,5}$ = 696 h, les deux technologies sont adaptées. En revanche, si 696 < $t_{L70B0,5}$ < 5745 h, seule la technologie VTF pourra satisfaire aux spécifications.

	Structure VTF	Structure TFFC
$T_{j,0}$ estimée pour T_{plaque}=105 °C	160°C	155 °C
$Ea_{105\text{-}145°C}$	0,910 eV	0,582 eV
AF_{eq} « de jour » (négligeable)	$4{,}1.10^{-4}$	$9{,}4.10^{-3}$
AF_{eq} « de nuit »	3,63	1,87
t_{L70B50} automobile	63 690 h	9445 h
η automobile	67 690 h	11 853 h
$t_{L70B0,5}$ automobile	5745 h	696 h

Tableau 25 : Bilan des projections de durée de vie des modules VTF et TFFC en conditions opérationnelles automobile dans un profil de mission de type « Europe ».

Si l'on considère un seul mécanisme de dégradation, il est nécessaire de préciser que l'énergie d'activation de ce mécanisme, en eV, caractérise sa sensibilité à la température. Une forte énergie d'activation traduira une forte activation de ce mécanisme avec la température. Dans le cas de vieillissement, la valeur de l'énergie d'activation permet de désaccélérer une dérive paramétrique mesurée dans le temps.

$$AF_{eq} = \frac{t_{L70B50\ T0}}{t_{L70B50\ Tstress}} = e^{\frac{Ea}{k_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{stress}}\right)} \qquad \textbf{Équation 18}$$

En se basant sur l'équation 18, pour définir une durée de vie à la température T_0, il faut donc avoir à la fois la durée de vie à une température donnée $t_{L70B50\ Tstress}$ (vieillissement à T_{plaque}=105 °C dans l'exemple présent), et l'énergie d'activation moyenne E_a de l'ensemble des mécanismes responsables de ce vieillissement. En prenant l'exemple des LEDs, on pourra rencontrer le cas d'une dérive de flux très rapide associée à un mécanisme très peu activé en température ou bien à l'inverse, une dérive très lente dans le temps du flux optique mais causée par un mécanisme très fortement activé si la température augmente.

7 Indicateurs précoces de défaillance

Un des objectifs de l'étude s'est également attaché à définir des indicateurs précoces de défaillance permettant de sélectionner les modules LEDs les plus fiables au sein d'une population donnée. Dans cette démarche, et avant les tests de vieillissement, nous avons collecté un maximum d'informations et de paramètres sur les modules VTF et TFFC. Ces informations collectées peuvent être quantitatives ou qualitatives. En comparant ces informations initiales aux dérives paramétriques des composants en vieillissement, il a été possible d'identifier trois indicateurs de défaillance et applicables aux deux technologies étudiées. La recherche d'indicateurs s'est basée sur l'ensemble des paramètres électro-optiques et thermiques. Concernant la partie optique, en plus des paramètres de suivi, les hauteurs de pics bleu et jaune, la largeur à mi-hauteur et la longueur d'onde centrale du pic bleu ont été analysés afin de détecter des dispersions potentielles des modules. Les puissances optiques initiales ont pu être corrélées aux comportements en vieillissement. En contraste, concernant l'aspect électrique, les paramètres de suivi n'ont dégagé aucune tendance. L'analyse plus fine des niveaux de courant I_{ET} , I_{ETE} et les courants de fuite dans le sens direct et en inverse ont dégagé des tendances. C'est l'observation des modules à faible courant qui a permis de dégager un indicateur électro-optique d'équilibre des modules. Enfin, les valeurs de résistances thermiques R_{th} initiales des composants étant très peu dispersées, l'utilisation en tant qu'indicateur précoce de défaillance est difficilement exploitable.

7.1 Technologie VTF

7.1.1 Luminescence à bas courant

Lorsqu'on alimente les modules à bas courant (typiquement 60 µA), ce niveau d'injection de courant active une émission de lumière mais reste extrêmement sensible au courant de fuite de chaque puce. En comparant la luminescence initiale des modules avec le flux optique après vieillissement, il est possible d'associer une luminescence déséquilibrée des modules à une fiabilité réduite dans le temps. Cette méthodologie a été validée sur les trois températures de vieillissement. La Figure 51 confronte l'état des modules VTF à 6000 h de vieillissement à la température T_{plaque}=

125°C avec le test de luminescence à 60 µA réalisé au départ. Le flux optique des modules présentant un déséquilibre initial de luminescence a diminué plus rapidement dans le temps que la moyenne de la population.

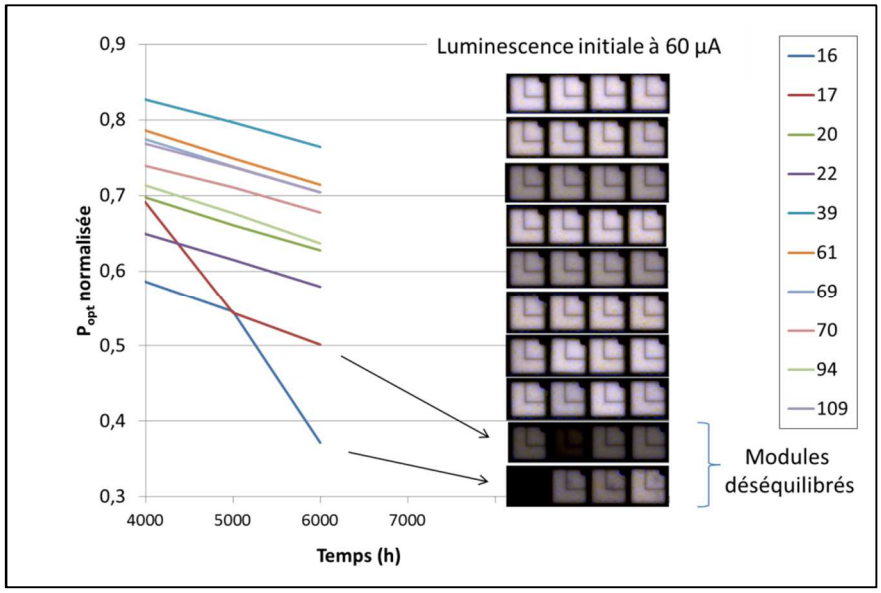


Figure 51 : Mise en évidence d'un indicateur précoce de défaillance basé sur l'équilibre initial des modules VTF en luminescence à 60 µA.

7.1.2 V_f à bas courant

Ce niveau d'injection permet l'émission de lumière mais reste extrêmement sensible au courant de fuite au niveau mono-puce. Par conséquent, la valeur de V_f à 60 µA sera dépendante du bon équilibre des modules. Il est donc possible de détecter des modules déséquilibrés par mesure électrique, en se focalisant sur la zone située au début de la zone 3 des caractéristiques I(V), à savoir la contribution du courant I_{ETE}. La zone d'analyse se situe entre 20 et 100 µA ; zone dans laquelle les puces commencent à émettre de la lumière. La Figure 52 rassemble les caractéristiques I(V) des modules VTF avant vieillissement à 125 °C. Les V_f les plus faibles à 60 µA correspondent aux modules 16 et 17.

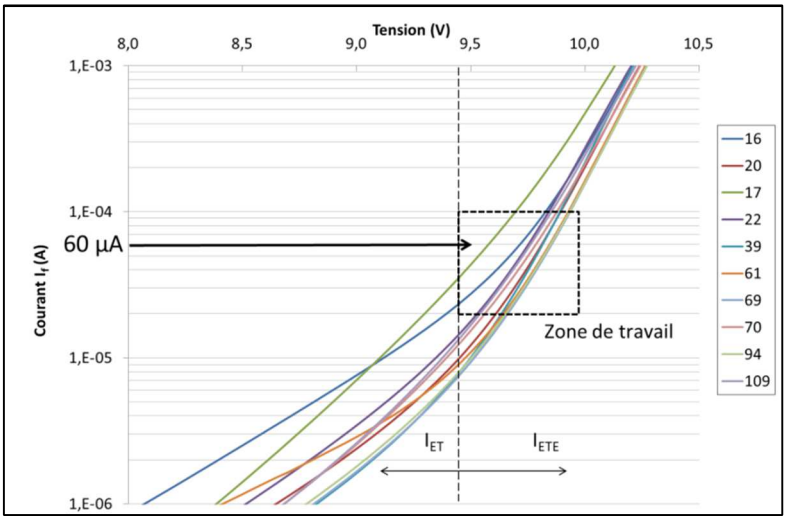


Figure 52 : Caractéristiques I(V) initiales des modules VTF à la transition entre I_{ET} et I_{ETE}.

7.1.3 Puissance optique initiale

Si l'on compare les puissances optiques initiales à 1000 mA mesurées sur ce même lot de composants VTF, on constate que les modules déséquilibrés correspondent également aux modules présentant des flux optiques faibles. La même comparaison a été constatée sur les deux autres lots de vieillissement de modules VTF. La Figure 53 permet de positionner les valeurs de puissances optiques P_{opt} pour les modules VTF 16 et 17 par rapport à la distribution de P_{opt} du lot avant vieillissement.

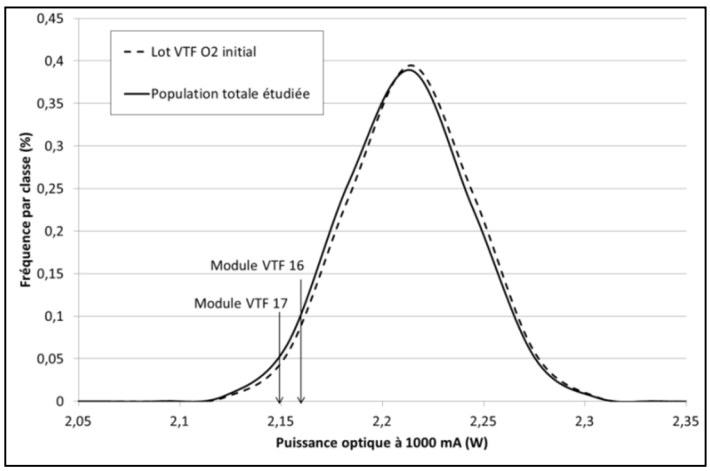


Figure 53 : Situation des puissances optiques des modules VTF 16 et 17 dans la population initiale.

Ces trois indicateurs précoces de défaillance sont donc applicables en tant qu'outils pour le choix de composants ou de tri de composants pour l'architecture VTF étudiée.

7.2 Technologie TFFC

La recherche d'indicateurs précoces de défaillance a abouti à deux indicateurs en commun avec la technologie VTF, à savoir la luminescence et le V_f à bas courant. Cependant les nombreuses défaillances brutales de puces pour les températures de vieillissement à 125 et 145 °C ne nous ont pas permis de vérifier la validité de ces deux indicateurs sur ces températures de vieillissement.

7.2.1 Luminescence à bas courant

L'influence du déséquilibre des modules à 100 µA sur la fiabilité est discutée uniquement sur la condition basse, à T_{plaque}= 105 °C. En effet, sur les températures T_{plaque} = 125 et 145 °C, les défaillances brutales arrivent très rapidement et il n'est pas possible de tirer de conclusion sur le long terme (t > 1000 h). La Figure 54 présente l'état des modules en fin de vieillissement à 105 °C confronté aux images initiales de luminescence des modules à 100 µA. On constate que la majorité des modules déséquilibrés présentent des pertes importantes de flux. Cependant, le module TFFC 55 qui présente la meilleure stabilité de flux dans le temps, est peu luminescent à 100 µA initialement, mais équilibré. Des conclusions restent donc difficiles à extraire de façon pertinente et nous pensons que, pour cette famille technologique, la population de composants devrait être plus importante.

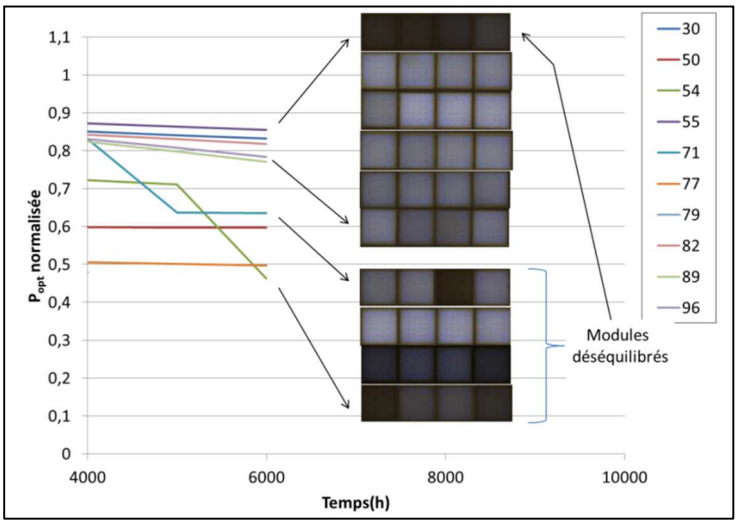


Figure 54 : Mise en évidence d'un indicateur précoce de défaillance basé sur l'équilibre initial des modules TFFC en luminescence à 100 µA.

7.2.2 V_f à bas courant

Comme pour la technologie VTF, Il est donc possible de détecter des modules déséquilibrés au travers des caractérisations électriques, en travaillant sur la zone située au début de la zone 3 des caractéristiques I(V), à savoir la contribution du courant I_{ETE}. La zone de travail est située entre 20 et 100 µA. C'est sur cette zone que les puces commencent à émettre de la lumière. La Figure 52 regroupe les signatures I(V) des modules TFFC avant vieillissement à 105 °C. Les V_f les plus faibles à 100 µA correspondent aux modules 50, 54 et 55. Les modules 50 et 54 sont déséquilibrés à t_0 tandis que le module 55 n'est pas déséquilibré mais peu luminescent.

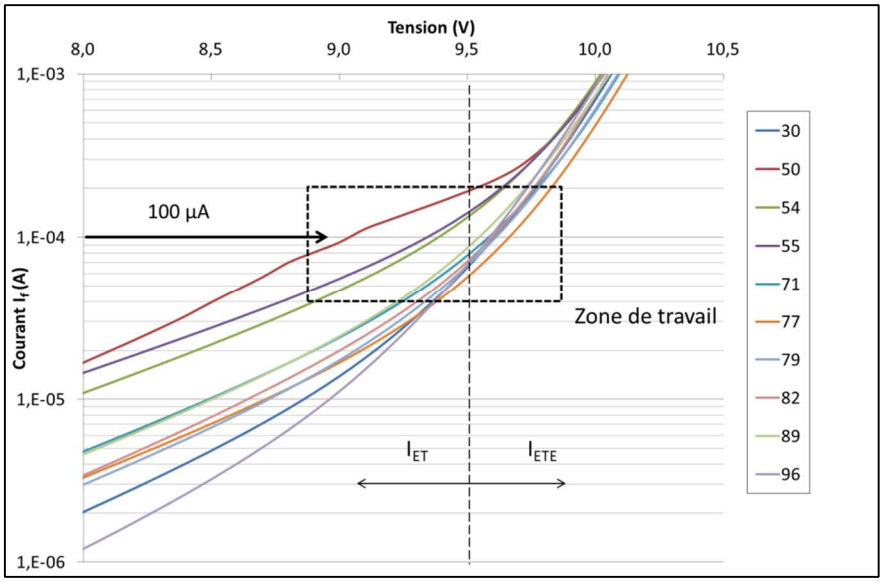


Figure 55 : caractéristiques I(V) initiales des modules VTF à la transition entre les courants I_{ET} et I_{ETE}.

7.3 Bilan

La comparaison des paramètres électro-optiques et thermiques initiaux avec les comportements caractérisés en vieillissement ont permis de mettre en lumière des indicateurs précoces de défaillance. Il est établi que la tension directe V_f et la luminescence à bas courant ainsi que le flux optique constituent des indicateurs précoces de défaillance des modules de LEDs étudiés. Notons que ces indicateurs sont très pertinents sur la technologie VTF étudiée mais pour la structure TFFC, les défaillances brutales ont en partie masqué l'efficacité de ces indicateurs.

8 Conclusion

La méthodologie développée en robustesse a permis de définir des niveaux de contraintes adaptés à un vieillissement accéléré. La mise en place des vieillissements a été présentée et les résultats ont été décrits. L'analyse des dérives paramétriques et les analyses de défaillance ont identifiés deux comportements en vieillissement très distincts entre les filières teechnologiques VTF et TFFC. Le modèle électrique équivalent a été très utile à la compréhension des comportements multi-puce en série lors de la dérive d'une ou plusieurs puces dans le temps. Le modèle thermique équivalent a quant à lui, aidé à la pré-localisation des dégradations des matériaux et des assemblages au cours des vieillissements.

La technologie VTF présente un mode de défaillance de type dérive graduelle. Le critère de défaillance L_{70} est atteint par perte progressive de performances au cours du temps. Le suivi paramétrique a montré une augmentation du rapport optique Y/B jusqu'à 20 %. Les paramètres électriques sont stables et on notera une légère augmentation de la résistance R_s pour la condition à la température T_{plaque} =145 °C d'environ 8 %. Des mesures de planéité de surface ont confirmé la stabilité mécanique de la structure. Thermiquement, les mesures transitoires ont mis en évidence une stabilité du paramètre $R_{thj\text{-}puits}$ dans le temps. L'extraction des paramètres de fiabilité a permis de définir une énergie d'activation moyenne de 0,91 eV dans la gamme de températures T_{plaque}= 105 et 145 °C. En tenant compte du facteur d'accélération, les durées de vie moyennes t_{L70B50} et $t_{L70B0,5}$ sont respectivement égale à 63 690 h et 5745 h pour un profil de mission automobile. Les analyses de défaillance ont permis de caractériser une dégradation des performances des puces, une dégradation de la couche de conversion optique (apparition de fissures) et de la brasure $Au_{80}Sn_{20}$. A terme, la perte de fonctionnalité de puce apparaît par court-circuit de jonction au niveau des contacts N.

La technologie TFFC étudiée a montré une dérive du type catastrophique. Le critère de défaillance L_{70} est atteint par perte brutale des performances optiques au cours du temps. La présence d'une conversion par luminophore fritté apporte une bonne stabilité colorimétrique dans le temps. Le suivi paramétrique a montré que la perte de performance optique brutale est liée à la perte de fonctionnalité de puce(s) en tant que LED. Les paramètres électriques montrent une forte dérive dans le temps de t=0 h à 6000 h : paramètre R_p divisé par 10^6, R_s +73 % et chute brutale de V_{th} liée à la perte de fonctionnalité de puce(s). Thermiquement, les quatre modules exploitables en fin de vieillissement ont montré une augmentation moyenne de $R_{thj\text{-}puits}$ de 34 %. L'extraction des paramètres de fiabilité a permis de définir une énergie d'activation moyenne de 0,582 eV entre les températures T_{plaque}= 105 et 145 °C. En tenant compte du facteur d'accélération, les durées de vie moyennes t_{L70B50} et $t_{L70B0,5}$ sont respectivement de 9445 h et 696 h pour un profil de mission automobile. Les analyses de défaillance ont permis de caractériser la dégradation de certaines parties de la structure TFFC. Le court-circuit de jonction est systématiquement situé en bord de puce sur le via périphérique et la formation d'un intermétallique de type Au_XAl_Y au niveau des contacts a été confirmée. Ces deux types de dégradation sont probablement à l'origine de l'augmentation de la résistance R_s : D'une part, la présence de Au_XAl_Y augmente la résistivité du chemin électrique et d'autre part, la cinétique de développement de cet intermétallique étant dépendante de la géométrie de la puce (géométrie des vias), la bonne répartition du courant dans la structure est dégradée et la résistance équivalente de la structure augmente (R_s). De plus, une forte déformation mécanique de la puce a été constatée par profilométrie, potentiellement source de défauts, délaminations et fissures, ce qui peut expliquer la forte augmentation des fuites électriques en vieillissement. L'hypothèse la plus probable relative à une augmentation de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ de 34 % réside dans le fait que cette déformation mécanique entraîne des délaminations dans la structure. Cependant, les résultats obtenus soulèvent des questions sur le facteur d'accélération

appliqué lors de nos essais compte tenu du fait que les défaillances brutales ont masqué la dérive de flux optique, pour les trois conditions de vieillissement.

L'étude de fiabilité a permis de dégager un point essentiel concernant la fiabilité des structures LEDs étudiées : La configuration de puce et la stratégie de boîtier associée ont un rôle essentiel pour atteindre un haut niveau de fiabilité. En effet, la majorité des dégradations ont été constatées au niveau boîtier et non au niveau des couches épitaxiées en GaN :

- Brasure de puce et dégradation de la couche de conversion optique pour la structure VTF.
- Délaminations et fragilité des vias pour la structure TFFC.

Les deux comportements en vieillissement ont été appliqués statistiquement à dix modules de quatre puces en tirant aléatoirement des puces défaillantes. Cette configuration est l'exemple typique d'un projecteur automobile. Les conséquences en fiabilité sont radicalement différentes :

- Dans le cas de dérives graduelles, la probabilité de perdre le 1er module est maximale pour 22 puces défaillantes.
- Dans le cas de dérives partielles brutales, le premier module défaillant apparaît dès la première puce défaillante.

Pour permettre d'assurer la plus grande durée de vie des systèmes d'éclairage à LED multi-puce, il faut s'assurer que le mode de défaillance par dérive graduelle soit rencontré plutôt que le mode de défaillance par défaillance partielle brutale. Ce mode de défaillance semble lié à la technologie des LEDs elles-mêmes, de même qu'à leurs conditions d'utilisation. Le concepteur de système doit alors suivre les évolutions des technologies et également trouver le meilleur compromis entre les contraintes d'utilisation et la fiabilité requise pour une fonction donnée.

Enfin, notons que l'analyse croisée des dérives paramétriques en vieillissement avec l'ensemble des mesures initiales a abouti à la définition d'indicateurs précoces de défaillance ; point fort à retenir de cette étude. Ces indicateurs électro-optiques sont basés d'une part sur l'équilibrage des modules en luminescence à t_0 pour $I_f \leq 100$ µA, et d'autre part sur la valeur de la puissance optique initiale P_{opt} en regard de la dispersion d'un lot considéré.

9 Bibliographie

1. **OSRAM.** *Fiche technique su composant Ostar 4 puces.* 2011.

2. **PHILIPS Lumileds.** *Fiche technique du produit Altilon 1X4.* 2010.

3. **R. VEYSSEYRE.** *Statistique et probabilités pour l'ingénieur.* Edition Dunod, Usine nouvelle, 2001.

4. **M. FUKUDA.** *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs (Optoelectronics Library).* Optoelectronics Library, 1991.

5. **M. MENEGHINI et al.** *A REVIEW ON THE PHYSICAL MECHANISMS THAT LIMIT THE RELIABILITY OF GaN-BASED LEDs.* Transactions on Electron Devices, IEEE (Volume:57 , Issue: 1), 2010.

6. **OSRAM.** *Reliability of the OSLON SSL product group.* 2012.

7. **G. MENEGHESSO et al.** *Recent results on the degradation of white LEDs for lighting.* J. Phys. D: Appl. Phys. Vol 43, n°35, 2010.

8. **E.F. SCHUBERT.** *Light Emitting Diode, chapitre 4.* Cambridge university press, 2006.

9. **M.H. CHANG et al.** *Light Emitting Diode reliability review.* Microelectronics Reliability, Volume 52, Issue 5, Pages 762-782, 2012.

10. **R. BAILLOT.** *Manuscrit dethèse: METHODOLOGIE D'ANALYSE DE DEFAILLANCE POUR L'EVALUATION DE LA FIABILITE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES GAN.* Université de Bordeaux 1, 2011.

11. **H.C.CHEN.** *Improvement on lumens efficiency in White LEDs by roughened dispensing package .* International NanoElectronic Conference, 2011.

12. **M.DAL, LAGO.** *Phosphors for LED-based light sources: Thermal properties and reliability issues.* Microelectronics Reliability, Volume 52, Issues 9–10, Pages 2164–2167, 2012.

13. **F. DELOR-JESTIN et al.** *Durability of crosslinked polydimethylsyloxane: the case of composite insulators.* Sci. Technol. Adv. Mater.Volume 9, N° 2, 2008.

14. **T. OKAMOTO et al.** *Thermal Endurance, electrical insulating, and mechanical properties of hybrid made with Poly(dimethylsiloxane) and tetraethoxysilane.* Japanese Journal of Applied Physics, vol 47, n°1, pages 521-526, 2008.

15. **E.F.SCHUBERT.** *Light-Emitting Diodes, chapitre 5, pages 98-100.* Cambridge University Press, 2006.

16. **J. BAUER et al.** *A NOVEL ORIGIN OF AVALANCHE BREAKDOWN IN MULTICRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS.* 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2014.

17. **W. KWAPIL et al.** *Influence of surface texture on the defect-induced breakdown behavior of multicrystalline silicon solar cells.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Volume 21, Issue 4, pages 534–543, 2013.

18. **J. VEIRMAN et al.** *Influence of carrier density spatial heterogeneities on the electrical breakdown*

of crystalline silicon solar cells: Experiment and Simulation. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE 39th, 2013.

19. **NIST.** *IES TM-21-11 Overview, History and Q&A Session.* 2011.

20. **E. RADKOV.** *LED Lumen Maintenance Prediction Method.* CORM conférence, 2010.

21. **E.F. SCHUBERT.** *Light Emitting Diodes, chapitre 6, pages 103-104.* Cambridge University Press, 2006.

22. **T. NSHANIAN et al.** *Effect of residual stress on the electrical activity of dislocations in GaN light emitting Diodes.* Microelectronics Reliability Volume 52, Issues 9–10, Pages 2039–2042, 2012.

23. **N. UETA et al.** *Residual Stress Distribution in Stacked LSI Chips Mounted by Flip Chip Technology.* International Conference on Electronic Materials and Packaging, EMAP. IEEE 2006.

24. **M. K. RAHIM et al.** *Fundamental of delamination initiation and Growth in Flip Chip Assemblies.* IEEE, Electronic Components and Technology Conference, 2005.

25. **A.A. GRIFFITH.** *The phenomena of rupture and flow in solids.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A 221: 163–198. 1921.

26. **C.D. BREACH et al.** *New observations on intermetallic compound formation in gold ball bonds: general growth patterns and identification of two forms of Au4Al.* Microelectronics Reliability, Volume 44, Issue 6, Pages 973–981, 2004.

27. **B. HAMON et al.** *N-contacts degradation analysis of white Flip-Chip LEDs during Reliability tests.* IRPS 2014.

28. **X. GUO et al.** *Current Crowding in GaN/InGaN Light emitting Diodes on insulating substrates.* Journal of Applied Physics, Vol 90, issue 8, 2001.

29. **J. YUN et al.** *Current, voltage and temperature distribution modeling of light-emitting diodes based on electrical and thermal circuit analysis.* Semicond. Sci. Technol. Vol 28, n°8, 2013.

30. **A. E. CHERNYAKOV et al.** *Experimental and theoretical study of electrical, thermal, and optical characteristics of InGaN/GaN high-power flip-chip LEDs.* Phys. Status Solidi A 210, No. 3, pages 466–469, 2013.

31. **RENAULT .** *Rapports internes avec les fabricants de LEDs pour l'automobile.*

32. **RENAULT.** *Rapports internes sur les projecteurs à LEDs avec les référents composants, électonique, optique et thermique.* 2012.

Conclusion générale

Ce manuscrit présente une méthodologie d'évaluation de la fiabilité de modules de LEDs multi-puce pour les applications d'éclairage de fortes puissances dédiés à l'environnement automobile.

Les performances électro-optiques et thermiques des LEDs blanches actuelles permettent d'adresser des applications d'éclairage de puissance pour l'automobile, domaine qui présente de fortes contraintes environnementales. Dans ce contexte, une des solutions proposées par les fabricants de sources à LEDs consiste en l'assemblage de 2 à 5 puces reportées en série, alignées géométriquement, dans un même boîtier. Cela permet d'atteindre des niveaux de flux optique de plus de 1000 lumens à 1 A pour un encombrement réduit. Ce sont donc des nouvelles architectures de modules à LEDs de puissance (multi-puce), pouvant présenter différentes technologies de puce (VTF, FC, TFFC,…). Elles sont qualifiées pour l'environnement automobile par le standard AEC-Q101, norme dédiée aux composants discrets, qui a été adaptée pour les LEDs, et qui présente de nombreuses limites.

La première phase de l'étude s'est attachée à dresser un état de l'art technologique des LEDs de puissance ainsi que leur intégration en projecteur automobile. Deux filières technologiques de sources à LEDs représentatives du marché automobile au printemps 2012 ont été approvisionnées. L'intérêt des caractérisations électro-optiques et thermiques a été clairement justifié : les caractérisations courant-tension, la mesure du spectre optique, ainsi que la caractérisation de l'écoulement thermique dans les modules LEDs ont été adaptées à une architecture multi-puce permettant de discriminer les dégradations entre les puces et l'assemblage afin de pré-localiser les défaillances. Dans une seconde phase, ces protocoles de mesure ont été transférées sur un banc de test dédié à ces travaux de thèse, qui permet, *in-situ*, de prendre en charge l'ensemble des caractérisations (mesures, tests de robustesse, et vieillissements accélérés) :

- Des tests de robustesse sous contraintes échelonnées pour dégager les limites opérationnelles des composants en identifiant les forces et faiblesses des technologies étudiées.
- Des vieillissements accélérés, paramétrés par les résultats de robustesse, ont permis d'évaluer la fiabilité des deux technologies étudiées pour un profil de mission automobile.

Ce manuscrit est constitué de quatre grands chapitres.

Dans le premier chapitre, un état de l'art des technologies LEDs blanches de puissance, dédié à l'éclairage automobile, a été établi en se focalisant sur trois points majeurs :

- ***L'éclairage automobile en tant que domaine***. Cette partie a porté sur les applications de puissance, à savoir les fonctions code et route. Après un bref descriptif du fonctionnement d'un projecteur automobile, nous nous sommes concentrés sur les problématiques d'intégration de sources à LEDs multi-puce pour ces nouvelles applications. L'état de l'art normatif présente des limites qui soulèvent des interrogations quant à la pertinence du test de qualification normé (AEC-Q101), standard de qualification dédiés aux composants discrets automobiles et utilisé pour les LEDs. Avec plusieurs technologies de modules disponibles pour l'automobile, il a été mis en évidence la nécessité d'établir rapidement une standardisation des sources à base de LEDs, au même titre que les technologies halogène ou xénon.
- ***Le marché des LEDs et les architectures technologiques***. Cette partie s'est inscrite dans une approche multi-niveaux depuis la fabrication des couches actives (cœur optique) jusqu'à l'intégration du composant sur carte ou support. Tandis que les procédés de fabrication sont

relativement établis pour la réalisation du cœur actif InGaN/GaN, quatre configurations de puce sont possibles en vue de l'intégration en boîtier. On trouve les configurations CC[1], FC[2], VTF[3], et TFFC[4]. Chacune présente des avantages et limites, qui aboutissent à un compromis entre complexité de fabrication, extraction optique, injection du courant et dissipation thermique. A l'exception de la configuration CC, qui a rapidement montré ses limites pour les applications de puissance, les sources à LEDs présentent plusieurs puces connectées en série pour atteindre le flux requis dans un volume minimal. Les composants du marché proposent trois configurations de puce : FC, VTF, et TFFC.

- ***Les défaillances des LEDs blanches***. L'étude bibliographique a montré un grand nombre d'étapes de fabrication et d'assemblage pour la réalisation d'une LED de puissance. La diversité des matériaux engagés dans un tel assemblage multiplie les risques de défaillance. Ces défaillances des LEDs blanches se manifestent selon deux principaux modes :
  - d'une part, une diminution de la puissance optique de la puce, principalement liée à une dégradation des couches actives par migration de dopants ou augmentation de la concentration de défauts,
  - d'autre part, des pertes de performances induites par des dégradations de l'assemblage : modification des brasures, délamination, prises de contacts, dégradation des encapsulants et luminophores.

Ce chapitre a permis de positionner précisément les travaux de thèse à l'intersection de trois axes : le contexte normatif automobile et ses limites, les nouvelles architectures multi-puce et les configurations de microassemblage de puces disponibles (FC, VTF, et TFFC).

Dans le second chapitre, l'ensemble des outils et méthodes nécessaires au suivi des dérives paramétriques et de l'analyse de défaillance des modules multi-puce sont présentés. Nous avons mis en évidence :

- ***Le choix et l'analyse de construction*** de deux références de sources multi-puce dédiés à l'automobile et représentatives du marché : les technologies VTF (structure monolithique verticale) et TFFC (structure par puce retournée).
- ***Les caractérisations électro-optiques et thermiques*** adaptées aux composants multi-puce de l'étude. La caractérisation courant-tension a permis un diagnostic quantitatif de l'ensemble du chemin électrique du composant. Un modèle multi-puce a été proposé afin de caractériser les dérives paramétriques au cours du temps mais également pour détecter la dérive d'une puce par une mesure à l'échelle du module. La caractérisation optique par mesure du spectre constitue le paramètre essentiel d'une source à LED et qui constitue le critère de défaillance (L_{70}) retenu. Cette caractérisation a été réalisée par une mesure relative couplée à une mesure absolue réalisée en sphère intégrante. La caractérisation thermique, basée sur une mesure transitoire (équipement T3Ster®), a permis de caractériser les performances de l'écoulement thermique des structures étudiées. Afin de valider les mesures thermiques, des calculs analytiques et simulations par éléments finis ont confirmé les valeurs de résistances thermiques $R_{thj\text{-}puits}$ identifiées expérimentalement.
- ***Un banc de caractérisation, dédié aux composants retenus*****,** a été développé avec comme objectif de prendre en charge l'ensemble des caractérisations et tests environnementaux sans

[1] CC pour *Conventional Chip*
[2] FC pour *Flip Chip*
[3] VTF pour *Vertical Thin Film*
[4] TFFC pour *Thin Film Flip Chip*

démontage des composants, pour garantir une répétabilité et reproductibilité optimale. Le banc de test accueille dix composants et permet les trois types de mesure. Les mesures électriques et thermiques sont effectuées par un connecteur rapide à 4 fils et les mesures optiques sont assurées par fibre optique placée dans l'axe optique d'émission des puces.

- ***La création de quatre lots, composés de dix composants*** pour l'application des tests de vieillissement accélérés, s'est basée sur la puissance optique de chaque module à la température T_{case} = 40 °C et I_f = 1 A. chaque lot est représentatif de la population par sa moyenne et son écart-type.

La première campagne de test, présentée au chapitre III, porte sur l'analyse comportementale des deux technologies à travers une étude de robustesse par paliers, axée sur deux paramètres environnementaux, le courant et la température. Le but a été d'une part de caractériser les limites opérationnelles des modules et d'autre part, de générer des défaillances, non représentatives d'une utilisation normale des composants, mais essentielles pour identifier les atouts et points faibles des deux structures. Les principaux résultats sont les suivants :

- ***Le test de robustesse en courant*** a permis de caractériser à la fois un domaine de linéarité de V_f et la valeur du courant à défaillance. Les défaillances mises en évidence lors du test sont une ouverture du câblage filaire de la technologie VTF à 2,4 A et une fusion d'une partie de la puce GaN à 3,5 A pour la structure TFFC. De plus, alors que les LEDs VTF présentent un domaine de linéarité jusqu'à 2,1 A, celui présenté par la structure TFFC présente un domaine de linéarité plus large atteignant 2,7 A.
- ***Le test de robustesse en température*** a mis en lumière à la fois un domaine de comportement dit « normal » (dérives paramétriques réversibles) et un domaine de température mettant en œuvre des mécanismes de dégradation de sur-accélération. La frontière entre ces deux domaines définit les marges opérationnelles de fonctionnement. La structure VTF présente un comportement normal et réversible jusqu'à la température T_{plaque}= 195 °C tandis que l'architecture TFFC enregistre les premières dérives non réversibles à la température T_{plaque}= 220 °C. Les défaillances révélées lors du test sont représentatives dans les deux cas d'un court-circuit de jonction situé :
    - ✓ au niveau d'un via circulaire pour la structure TFFC à la température T_{plaque}= 260 °C,
    - ✓ entre le contact N et la métallisation coté P à la température T_{plaque}= 230 °C pour la technologie VTF.
- ***L'analyse des informations collectées lors des tests de robustesse*** couplée aux analyses de défaillance et mesures comparatives, ont permis d'identifier les zones critiques des technologies retenues :
    - ✓ La technologie TFFC présente une bonne stabilité du point de couleur grâce à la présence du luminophore fritté (sensibilité du rapport Y/B de 0,0113.°C^{-1}) mais la structure des vias entraine une fragilité mécanique située sur des zones les plus chaudes de la structure. De plus, les paramètres électriques dérivent fortement (+95 % pour R_s et +16 % pour V_{th}).
    - ✓ La technologie VTF présente un bon couplage thermique des puces par une brasure pleine surface en $Au_{80}Sn_{20}$ et les paramètres électriques sont très stables dans le temps. Cependant, la couche de conversion par un luminophore dispersé dans un silicone apporte une sensibilité de la dérive du point de couleur plus prononcée en température: le rapport Y/B présente une sensibilité en température de -0,0128 °C^{-1}.

Le dernier chapitre de ce manuscrit constitue le cœur du sujet de thèse : l'analyse de fiabilité. Les marges opérationnelles de fonctionnement caractérisées en robustesse nous ont permis d'ajuster les niveaux de contraintes à appliquer lors des vieillissements accélérés : les trois conditions de vieillissement en température ont été fixées à : T_{plaque}= 105, 125, et 145 °C avec un courant I_f constant de 1 A sur une durée maximale de 6000h. Cette démarche semble être la plus optimale pour garantir l'identification de mécanismes de dégradation représentatifs du profil de mission. Cette étude de fiabilité a permis de mettre en évidence un mode de défaillance spécifique pour chacune des technologies :

- ***Les modules VTF ont atteint le critère de défaillance L_{70} par dérive graduelle de la puissance optique***. L'ensemble des paramètres électriques et thermiques sont stables dans le temps. On enregistre une augmentation de 8 % de la valeur du R_s des modules et uniquement pour la condition haute (T_{plaque}= 145°C). Aucune modification de la résistance thermique $R_{thj\text{-}puits}$ n'a été mise en lumière. Les analyses de défaillance ont identifié une initiation de fissures dans le luminophore dispersé dans le silicone et une dégradation des brasures de puces. L'énergie d'activation moyenne est égale à 0,91 eV et en tenant compte du facteur d'accélération, les durées de vie t_{L70B50} et $t_{L70B0,5}$ sont respectivement de 63690 h et 5745 h en conditions opérationnelles.
- ***Les modules TFFC ont franchi en grande majorité le critère de défaillance L_{70} par chute brutale de la puissance optique***. Bien que ce mode de défaillance puisse laisser des interrogations sur l'accélération, pour cette étude, ce dernier a été considéré comme la conséquence d'un vieillissement. De fortes dérives des paramètres électro-optiques et thermiques sont enregistrées : R_p divisé par 10^6, augmentation de 73 % de R_s et les chutes brutales de puissance optique sont liées aux chutes brutales de V_{th} par perte de fonctionnalité de puce en court-circuit de jonction. La résistance thermique moyenne $R_{thj\text{-}puits}$ a montré une augmentation de 34 %. Les défaillances (court-circuit de jonction) ont systématiquement été localisées sur le via périphérique des puces TFFC. Une formation d'intermétallique Au_XAl_Y a été identifiée au niveau du contact N et la structure présente une déformation mécanique au niveau puce/plots mise en évidence par profilométrie à haute résolution. L'énergie d'activation moyenne est égale à 0,582 eV et en tenant compte du facteur d'accélération, les durées de vie t_{L70B50} et $t_{L70B0,5}$ sont respectivement de 9445 h et 696 h en conditions opérationnelles automobile.

Une analyse des conséquences des modes de défaillance observés a été réalisée à l'échelle du module. Pour une application automobile, ce travail a révélé des conséquences impactantes dans le cas d'une technologie présentant un mode de défaillance brutal. Il sera donc préférable de privilégier le mode de défaillance en dérive pour intégrer des modules à LEDs multi-puce en projecteur automobile, mais également dans tout système ou solution d'éclairage à LEDs intégrant plusieurs puces LEDs connectées en série.

Les analyses croisées entre les données de vieillissement et les mesures initiales ont permis de dégager des indicateurs précoces de défaillance basés sur l'équilibre initial de la luminescence des modules à bas courant ainsi que sur la valeur du V_f à ce même niveau de courant. En complément des vieillissements en température, une campagne de vieillissement en cyclage actif sous humidité (85 °C /85 % RH) est en cours afin de suivre le comportement électro-optique et thermique des deux technologies face à ce type de sollicitation, typiquement automobile.

Les perspectives de ces travaux doivent adresser les axes suivants :

- Tout d'abord, le retour d'expérience sur les vieillissements de modules de LEDs met en évidence le besoin d'intégrer un suivi du flux optique en temps réel. Dans ce cadre, ce monitoring pourrait être réalisé avec une photodiode et permettrait d'améliorer considérablement la précision de détermination de l'instant de défaillance dans le cas d'une technologie présentant un mode de défaillance brutal.
- Ensuite, la confirmation ou infirmation de l'ensemble des hypothèses proposées sur les mécanismes possibles de dégradation serait une forte valeur ajoutée à l'étude, à travers des travaux de simulations, tests expérimentaux spécifiques, en complément d'analyses de défaillance et caractérisations matériaux plus approfondies. Des modélisations thermomécaniques des deux structures étudiées permettraient de localiser plus précisément les zones de concentration de contraintes mécaniques afin d'étayer les hypothèses précédemment émises.

  En particulier, l'état de l'art des défaillances des LEDs blanches établi au chapitre 1, identifie un court-circuit de jonction comme la conséquence d'une forte sollicitation électrique. En considérant ce mode de défaillance rencontré pour la structure TFFC, cela abouti aux éléments de réponse suivants :

  - ✓ Les court-circuits de jonction sont bien la conséquence d'une forte sollicitation électrique. Cette perspective confirme l'intérêt majeur de ne pas solliciter les composants LEDs à la densité de courant maximale autorisée pour pouvoir prolonger la durée de vie et s'adapter à tout type de LEDs.
  - ✓ Les court-circuits de jonction sont la conséquence d'un autre mécanisme lié au comportement thermomécanique ou à la formation d'intermétallique. Cette deuxième perspective permettrait alors de compléter l'état de l'art des défaillances des LEDs blanches par de nouveaux mécanismes de dégradations observés.
- Enfin, la méthodologie d'analyse de fiabilité présentée dans ce manuscrit s'articule autour d'un axe robustesse/fiabilité permettant d'extraire un maximum d'informations en vieillissement en s'appuyant sur les résultats de robustesse par contraintes échelonnées. Grâce à un banc de test optimisé, les caractérisations et reprises de mesures en vieillissement sont rapides et fiables. De plus, en bénéficiant des nombreuses caractérisations physico-chimiques disponibles, il a été possible de réaliser une analyse de construction complète des composants, et de procéder aux analyses de défaillance afin de proposer des mécanismes probables de dégradation. Cette méthodologie globale d'analyse de fiabilité peut être transposée à d'autres types d'architectures de LEDs (FC, CC) mais également aux futures générations de modules de LEDs ou encore, de manière plus générale, à d'autres composants de puissance émissifs ou non.

Production scientifique

Conférence sans acte

- Journée puissance, IMAPS Tours.
  Présentation orale - 10 octobre 2012
  « Eclairage automobile : Les conséquences de l'intégration de DELs blanches de puissance sur la stratégie des tests de fiabilité ».
  B. Chambion, L. Mendizabal, V. Carreau, L. Bechou, A. Gasse, J. Rullière.

Conférences avec actes

- European MicroElectronics Packaging Conference, EMPC Grenoble.
  Présentation orale – 10 Septembre 2013
  « Electro-optical assessment of white LEDs multichip modules for automotive applications: Failure analysis and packaging influence ».
  B.Chambion, L.Mendizabal, L.Bechou, A.Gasse, Y.Deshayes, V.Carreau

- International Symposium on Automotive Lighting, ISAL Darmstadt.
  Présentation poster – 23-25 Septembre 2013
  « Robustness assessment of automotive qualified white LEDs multichip modules : failure analysis and packaging influence ».
  B. Chambion, V. Carreau, L. Bechou, Y. Deshayes, L. Mendizabal, A. Gasse

Annexe 1

Matériau	T_f (°C)	α (ppmK^{-1})	ρ (μΩ.cm)	K_T (W/m,K)
Eléments purs				
Cr	1860	6,5	13,2	91
Mo	2615	5,1	5,7	137
Ta	2980	6,5	13,5	58
Ti	1667	8,9	54	22
W	3387	4,5	5,4	174
Zr	1852	5,9	44	23
Ag	960	19,5	1,6	420
Al	660	22	2,6	200
Au	1063	14	2,4	300
Cu	1083	17	1,7	400
Ge	937	5,3	semiconducteur	60
In	157	33	8,4	80
Mo	2610	5	5,3	140
Ni	1453	14	6,9	90
Pb	327	29	22	35
Pd	1552	11	10,8	71
Pt	1769	9	10,6	73
Si	1414	2,6	semiconducteur	80-150
Sn	232	20	12	64
Zn	419	30	5,7	113
Brasures				
Sn-Pb 60/40	183	26	14	34
SnAg 96/4	221	11	30	33
Au-Sn 80/20	280	15	16	58
Au-Ge 88/12	356	12		44
Au-Si 97/3	363	11,5		216
In-Sn 50/50	120	20	14.5	34
Alliages				
Kovar (Fe-Ni-Co)	>1000	5	50	16
Ferronickel FN42	>1000	2,6		16
Nichrome	1395	13	100	13
Cu-Al (E)	550	23		180
Céramiques				
AlN	2300	2,1 à 4,4	isolant	100 à 230
Alumine	2050	6,5	isolant	20-40
BeO	2530	6,4 à 8,3	isolant	300 à 270
CBN		3,7	isolant	600
Diamant		1 à 4	isolant	900 à 2000
HBN Adv Ceram		4 à 6	isolant	59 à 33
Si_3N_4	1750	3,3	isolant	170
SiC	2200	3,8	isolant	60-270
SiO_2 (quartz)	1710	0,5	isolant	1,4
GaN	> 2500	3,2	semiconducteur	130
saphir	2050	6,5	isolant	40
Composites				
Al-SiC	570	6.5 à 7.3	4	160-180
Cu-Mo	1083	7	/	170
Cu-W 20/80	1083	7	2,5	250
Cu-Mo-Cu (1,6,1)	1083	6,4	/	230
Colles conductrices				
Epoxy-Ag	/			1-30
Verre-Ag	> 400			50-100
Silicone-Ag	/			~ 1 à 4
Polyimide-Ag	/			~ 2

Principales caractéristiques des matériaux rencontrés dans les assemblages LEDs.

Annexe 2

Références fournisseur des lots de LEDs VTF étudiées.

Références fournisseur des lots de LEDs TFFC étudiées.