



HAL
open science

Méthodologie d'optimisation de plan de test pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques

Minh-Tuan Truong

► **To cite this version:**

Minh-Tuan Truong. Méthodologie d'optimisation de plan de test pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2022. Français. NNT : 2022LORR0158 . tel-03889533

HAL Id: tel-03889533

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03889533>

Submitted on 8 Dec 2022

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 LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Méthodologie d'optimisation de plan de test pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 14 Septembre 2022

pour l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique

par

Minh-Tuan Truong

Composition du jury

<i>Président :</i>	Antoine Grall	(P.U) - Université de Technologie de Troyes
<i>Rapporteurs :</i>	Mitra Fouladirad	(P.U) - Centrale Marseille
	Antoine Grall	(P.U) - Université de Technologie de Troyes
<i>Examineurs :</i>	Mustapha Ouladsine	(P.U) - Aix-Marseille Université
	Amélie Ponchet-Durupt	(E.C) - Université de Technologies de Compiègne
	Bertrand Chambion	(Dr.) - CEA LETI
	Laurent Mendizabal	(Dr.) - CEA LETI (<i>Co-encadrement</i>)
	Benoît Iung	(P.U) - Université de Lorraine (<i>Directeur de thèse</i>)
	Phuc Do	(M.d.C, HDR) - Université de Lorraine (<i>Co-Directeur de thèse</i>)

Mis en page avec la classe thesul.

Remerciements

Ce travail de thèse s'est déroulé dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire d'Assemblage et Intégration Photonique (LAIP) du CEA LETI Grenoble et le département de recherche Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques complexes (ISET) du CRAN UMR CNRS 7039 - Université de Lorraine.

En regard de cette collaboration, je remercie David Henry, Stéphane Bernabé et Didier Wolf pour m'avoir accueilli au sein de ces laboratoires. J'étends ces remerciements aux différentes secrétaires aussi bien du CRAN mais aussi du service SISF du CEA Grenoble ainsi que de l'école doctorale IAEM. Mes remerciements vont pareillement à Antoine Grall et Mitra Fouladirad pour avoir accepté de rapporter sur cette thèse et je tiens à leur exprimer toute ma gratitude pour l'attention qu'ils ont portée à mes travaux et pour les commentaires pertinents qu'ils ont faits. Je remercie également Mustapha Ouladsine, Amélie Ponchet-Durupt et Bertrand Chambion pour avoir accepté d'examiner ce travail de thèse et pour avoir participé à la soutenance.

Que mon Directeur de thèse, Pr Benoît Lung, trouve ici toute ma reconnaissance pour la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordées. Je le remercie également pour son accueil, son soutien constant tout au long de ma thèse. Je remercie aussi tout particulièrement mon Co-Directeur de thèse, HDR Phuc Do et mon encadrant au CEA, Dr Laurent Mendizabal. Je leur suis très reconnaissant de leurs patiences, de leurs encouragements et de leurs disponibilités dont ils ont fait preuve à chaque étape de ma thèse aussi bien pour discuter des aspects scientifiques et techniques du sujet, que pour m'avoir aidé à résoudre les difficultés que j'ai rencontrées. Leurs remarques successives m'ont ainsi permis de progresser tout au long de la thèse et d'aboutir à un manuscrit autorisant la soutenance. J'adresse de plus un très grand merci à toute l'équipe de packaging du laboratoire LAIP, en particulier, à Gilles, Laura et Nadia. Leurs conseils et disponibilités, ainsi que leur maîtrise des technologies de fabrication m'ont permis d'acquérir de précieuses connaissances en assemblage des composants optoélectroniques.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes collègues du laboratoire LAIP pour leurs encouragements, leur bonne humeur et leur soutien. Je ne peux également manquer l'occasion d'adresser une pensée particulière à ma famille pour son estime et ses encouragements. Un remerciement spécial à mes amis, pour leur amitié sincère et hors pair.

Pour finir, mes dernières pensées sont pour toi, Mai-Phuong. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi, pour tout ce que tu apportes dans ma vie.

Résumé

Du fait des récents progrès liés à leur intégration (hybridation, collage direct, TSV...), les composants électroniques deviennent de plus en plus complexes. Dans ce contexte d'évolution des composants, les principaux composants concernés sont les composants de type optoélectroniques. La complexité de ces composants optoélectroniques a des conséquences sur l'étude de leur fiabilité, notamment au travers du nombre de tests à réaliser et du temps nécessaire à leur réalisation. À cela viennent se rajouter de nouvelles problématiques telles que les interactions existantes entre différents éléments (ex. diode laser, photodiode) du composant. L'objectif principal de cette thèse est donc de développer une méthodologie (générique) d'optimisation de plan de test accéléré pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques. Cet objectif repose sur trois verrous scientifiques majeurs. Le premier verrou s'inscrit en regard du défi d'optimisation du plan de test accéléré pour l'évaluation de la fiabilité des composants. Les deux derniers verrous scientifiques concernent plus spécifiquement la modélisation du processus de dégradation de l'élément en prenant compte des différents facteurs d'influence, et le calcul de la fiabilité d'un composant optoélectronique en prenant en compte l'interaction entre ses éléments. Pour répondre de ces verrous, nous avons proposé quatre contributions principales : (1) Investigation et formulation d'impacts de facteurs d'influence (l'auto-échauffement au niveau élément et l'interaction d'états au niveau composant) sur le processus de dégradation des éléments (diode laser, photodiode) d'un composant optoélectronique ; (2) Développement de modèles de dégradation permettant de tenir compte de l'impact de ces facteurs d'influence (auto-échauffement) pour chacun des éléments ; (3) Extension de chacun des modèles de dégradation proposés au niveau composant pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique constitué à partir de ses éléments ; (4) Développement d'un plan optimisé de tests accélérés pour chacun des composants optoélectroniques étudiés. Enfin, ces contributions ont été validées par les expérimentations sur des composants optoélectroniques étudiées au sein du CEA LETI de Grenoble.

Mots-clés: Fiabilité, Test accéléré, Optimisation, Processus stochastiques, Optoélectronique

Abstract

Increasing progress in feature integration (by hybridization, direct bonding, TSV...) leads to more and more complex electronic components. In this context of the evolution of components, the main components concerned are optoelectronic components. The complexity of these optoelectronic components has consequences on the study of their reliability, particularly through the number of tests to be performed and the time required for their realization. In addition, the existing interactions between different elements (e.g., laser diode, photodiode) of an optoelectronic component is also challenging. Therefore, the main objective of this PhD project is to develop a (generic) methodology for optimizing accelerated test plans to evaluate the reliability of complex optoelectronic components. This objective leads to three major scientific issues to be solved. The first one is related to the challenge of optimizing the accelerated test plan for evaluating the reliability of optoelectronic components. The last two scientific issues are more specific to the modeling of the degradation processes of an optoelectronic component's elements by considering different influencing factors and the calculation of the reliability of a whole optoelectronic component by considering the interaction between its elements. For this purpose, we proposed four main contributions : (1) Investigation and formulation of impacts of influence factors (self-heating at the element level and states-interaction at the component level) on the degradation process of optoelectronic elements (laser diode, photodiode); (2) Development of degradation models considering the impact of studied influencing factors (self-heating) for each of the elements; (3) Extension of each of the proposed degradation models at the component level to calculate the reliability of a whole optoelectronic component; (4) Development of an optimal accelerated test plan for each studied optoelectronic component. Finally, these contributions have been validated by real experimental data on optoelectronic components at CEA LETI- Grenoble.

Keywords: Reliability, Accelerated test, Optimisation, Stochastic process, Optoelectronics

Table des matières

Table des figures	11
-------------------	----

Liste des tables	15
------------------	----

Glossaire des notations et abréviations
--

Introduction générale

Chapitre 1

Problématique de l'évaluation de la fiabilité des composants optoélectroniques

1.1 Introduction	25
1.2 Évolution des composants électroniques	26
1.3 Méthodes d'évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique	30
1.4 Conclusion et problèmes posés	34

Chapitre 2

Caractérisation des composants optoélectroniques étudiés et Plateforme d'expérimentation

2.1 Introduction	37
2.2 Composants optoélectroniques étudiés	38
2.2.1 Élément émetteur - LED	38
2.2.1.1 Description des LEDs	38
2.2.1.2 Caractéristiques statiques et de performance des LED	39
2.2.2 Élément émetteur - Diode laser	40
2.2.2.1 Description des diodes laser	40

2.2.2.2	Caractéristiques statiques et de performance des diodes laser . . .	43
2.2.3	Élément récepteur - photodiode	44
2.2.3.1	Description de la photodiode	44
2.2.3.2	Caractéristiques statiques et de performance de la photodiode . .	45
2.2.4	Composant complexe - véhicule de test	47
2.3	Plateforme d'expérimentation	48
2.3.1	Caractérisation des LEDs	48
2.3.1.1	Préparation d'échantillon des LED	48
2.3.1.2	Banc de mesure des LEDs	49
2.3.2	Caractérisation des diodes laser	51
2.3.2.1	Préparation d'échantillon des diodes laser	51
2.3.2.2	Banc de mesure des diodes laser	52
2.3.3	Caractérisation des photodiodes	54
2.3.3.1	Préparation d'échantillon des photodiodes	54
2.3.3.2	Banc de mesure des photodiodes	55
2.3.4	Banc de mesure thermique à l'aide de la caméra infrarouge	57
2.4	Conclusion	59

Chapitre 3

État de l'art sur l'évaluation de la fiabilité et l'optimisation d'un plan de test accéléré pour un composant optoélectronique

3.1	Introduction	61
3.2	Modélisation du processus de dégradation d'un élément optoélectronique	62
3.2.1	Modélisation de la dégradation	62
3.2.2	Modèles de dégradation existants	64
3.3	Évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique avec facteurs d'influence multiples	69
3.3.1	Fiabilité d'un composant optoélectronique	69
3.3.2	Interaction de dégradation entre éléments	69
3.4	Optimisation d'un plan de test	72

3.4.1	Critères d'optimisation	72
3.4.2	Formulation du problème d'optimisation	74
3.5	Conclusion	76

Chapitre 4

Modèle de dégradation d'un élément optoélectronique

4.1	Introduction	77
4.2	Analyse de l'impact des facteurs d'influence par la simulation multi-physique sur l'élément étudié	78
4.2.1	Structure de la LED	79
4.2.2	Analyse de l'impact des facteurs d'influence par la simulation multi-physique	80
4.3	Proposition d'un modèle de dégradation considérant l'impact de l'auto-échauffement	84
4.3.1	Taux de dégradation modifié	85
4.3.2	Modèle de dégradation modifié	86
4.3.3	Modèle de calcul de la fiabilité d'un élément optoélectronique	88
4.3.4	Estimation des paramètres du modèle de dégradation	88
4.4	Validation du modèle de dégradation proposé	89
4.4.1	Évaluation des mesures optiques au cours du vieillissement	90
4.4.2	Impact du courant d'alimentation sur la température de jonction	91
4.4.3	Impact de la dégradation de puissance optique sur la température de jonction	92
4.4.4	Estimation des paramètres du modèle de dégradation	93
4.4.5	Analyses comparatives	94
4.4.5.1	Évolution de la température de jonction	96
4.4.5.2	Analyse de sensibilité aux échantillons de données	97
4.5	Conclusion	99

Chapitre 5

Extension du modèle de dégradation proposé dans le chapitre précédent pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique complexe

5.1	Introduction	101
5.2	Description d'un composant complexe	102

5.3	Modélisation des impacts de l'interaction entre éléments	103
5.3.1	Flux d'énergie dans les composants optoélectroniques complexes	103
5.3.2	Analyse de l'impact d'interaction entre éléments par la simulation multi-physique	104
5.4	Extension du modèle de dégradation considérant l'impact de l'interaction	108
5.4.1	Modèle de dégradation étendu au niveau élément	109
5.4.2	Estimation des paramètres du modèle de dégradation	111
5.5	Évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique	112
5.6	Illustration du modèle de dégradation proposé par un exemple numérique pour un composant complexe	112
5.6.1	Fiabilité du composant étudié à un niveau de température contrainte donné	114
5.6.2	Impacts des interactions sur la fiabilité du composant étudié	115
5.7	Conclusion	116

Chapitre 6

Plan optimisé de tests accélérés pour des composants optoélectroniques

6.1	Introduction	117
6.2	Problématiques d'optimisation d'un plan de test accéléré	118
6.2.1	Paramètres d'un plan de test	118
6.2.2	Spécification de test au CEA LETI	118
6.2.3	Formulation du problème d'optimisation	118
6.3	Optimisation d'un plan de test par l'approche bayésienne	119
6.3.1	Critère d'optimisation d'un plan de test basé sur l'approche bayésienne . .	120
6.3.2	Algorithme d'atteinte d'un point optimum	121
6.4	Un plan de test optimal pour la LED Cree EZ1000 : Approche bayésienne	123
6.4.1	Procédure d'optimisation	123
6.4.2	Validation du plan test optimal	124
6.4.3	Analyse de sensibilité	127
6.5	Conclusion	128

Conclusion générale et Perspectives
--

Annexe

Production scientifique personnelle

Bibliographie

139

Table des figures

Figure 1.1	Exemple d'une évolution du composant électronique; a) Un transistor simple; b) Un composant complexe sur puce [1, 2]	26
Figure 1.2	Trois grandes catégories d'intégration optoélectronique [3]	27
Figure 1.3	Hierarchie de l'emballage pour les systèmes multipuces [3]	28
Figure 1.4	Les différentes approches de la conception de puces photoniques en silicium [4]	28
Figure 1.5	Exemple d'optoélectronique monolithique; a) Section transversale; b) Microphotographie [5]	28
Figure 1.6	Exemple de l'intégration hybride des optoélectroniques [4]	29
Figure 1.7	Vue de dessus du transmetteur hybride III-V/silicium [6]	29
Figure 1.8	Profils de tests accélérés [7]	31
Figure 1.9	Exemple d'un processus de test accéléré pour une puce de circuit intégré [8]	32
Figure 2.1	Trois principales structures d'une puce LED; a) Puce conventionnelle (Conventional Chip-CC; b) Puce en couche mince verticale Vertical Thin Film-VTF; c) Puce retournée (Flip chip- FC) [9]	38
Figure 2.2	Boîtier de LED assemblé avec une carte de circuit imprimé (PCB) [10]	39
Figure 2.3	LED - Puissance optique en fonction du courant d'alimentation	39
Figure 2.4	Exemple de caractéristiques I-V; a) Échelle linéaire; b) Échelle Semilog [9]	40
Figure 2.5	Schématisation des mécanismes d'établissement de l'oscillation laser dans une cavité [11]	41
Figure 2.6	a) Vue schématique des différents éléments nécessaires à la constitution d'un laser pour une longueur d'onde unique; b) Caractéristiques spectrales des diodes laser pour un fonctionnement en mode unique [12]	41
Figure 2.7	Illustration d'une puce diode laser très basique [13]	41
Figure 2.8	Cavités de la diode laser; (a) DBR; (b) DFB [11]	42
Figure 2.9	Détails des DFB laser; a) Schéma vue longitudinale du laser; b) Schéma coupe transversale du laser [6]	42
Figure 2.10	Graphiques typiques utilisés pour caractériser la diode laser : a) Puissance optique en fonction du courant d'alimentation; b) Tension en fonction du courant d'alimentation; c) Puissance optique en fonction de la longueur d'onde à un courant d'alimentation donné	43
Figure 2.11	La photodiode à polarisation inverse produit un courant proportionnel à l'intensité lumineuse en raison de la création de paires électron-trou dans la région de déplétion. Les cercles bleus représentent les électrons et les cercles blancs les trous	44

Figure 2.12	Différentes structures de photodiode : a) PIN mesa III-V ; b) PIN planaire III-IV ; c) APD au germanium ; d) APD III-V [14]	44
Figure 2.13	Germanium photodiode sur silicium : a) Structure schématique de la photodiode (section transversale) ; b) Disposition de la photodiode [15]	45
Figure 2.14	Courbes I-V caractéristiques d'une photodiode. $P_0 - P_2$ représentent différents niveaux de lumière	46
Figure 2.15	Vue de Schéma bloc du véhicule de test	47
Figure 2.16	LED montée sur un PCB	48
Figure 2.17	Représentation des modules de caractérisation et test accéléré [9]	48
Figure 2.18	Visualisation de la conception optique envisagée	49
Figure 2.19	Schéma de principe du banc de mesure pour V-I, P-I des LED	49
Figure 2.20	Variation de la puissance optique de la LED	50
Figure 2.21	Variation de la tension de la LED	50
Figure 2.22	La répétabilité et reproductibilité d'une LED en référence a) Optique ; b) Électrique	51
Figure 2.23	Assemblage des LDs en boîtier DIL40	51
Figure 2.24	Module de caractérisation et test accéléré des LDs	52
Figure 2.25	Variation de la puissance optique d'une diode laser	52
Figure 2.26	Variation de la tension d'une diode laser	53
Figure 2.27	La répétabilité et reproductibilité d'une LD en référence a) Optique ; b) Électrique	53
Figure 2.28	Représentation d'assemblage des photodiodes ; a) puces en boîtier LCC 44 ; b) Plan de câblage	54
Figure 2.29	Module de caractérisation et test accéléré des PDs	54
Figure 2.30	Schéma de principe du banc de mesure pour le courant noir de la photodiode	55
Figure 2.31	Caractéristique I-V en obscurité d'une photodiode en température	56
Figure 2.32	Caractéristique courant-tension inverse d'une photodiode montrant le phénomène de claquage ; a) à $25^{\circ}C$; b) à $85^{\circ}C$	56
Figure 2.33	La répétabilité et reproductibilité d'une PD de référence	56
Figure 2.34	Caractérisation thermique à l'aide de la caméra thermique	57
Figure 2.35	Représentation de la valeur du pixel en fonction de la température	58
Figure 2.36	Analyse thermique d'une LED : a) sans courant direct et b) avec courant direct à 350mA	58
Figure 3.1	Schéma d'une dégradation avec le seuil de défaillance	63
Figure 3.2	La barrière d'énergie [16]	63
Figure 3.3	Un processus de dégradation modélisé par le processus gamma	66
Figure 3.4	Un processus de dégradation modélisé par le processus de Wiener	67
Figure 4.1	Détails des LED Cree EZ10000 ; a) Schéma de la structure des LED ; b) Boîtier de LED sur le PCB	79
Figure 4.2	Coupe transversale de la LED CREE EZ1000 monté sur un PCB et le support d'aluminium [17]	79
Figure 4.3	Vue schématique de la région active et du courant total réparti en courant de fuite, courant radiatif et courant non radiatif dans les émetteurs [18]	80
Figure 4.4	Représentation de la coupe transversale de la géométrie simplifiée de la LED	81
Figure 4.5	Vue d'ensemble du maillage de LED dans l'air	82
Figure 4.6	Maille de LED ; a) LED sur star (PCB) ; b) Puce LED	82

Figure 4.7	Résultat de la simulation en considérant que la LED est en bon état . . .	83
Figure 4.8	Résultat de la simulation en considérant que la LED est en état dégradé .	84
Figure 4.9	Dégradation de la puissance optique sous deux conditions de température ; a) $T_1 = 85^{\circ}C$; b) $T_2 = 100^{\circ}C$	90
Figure 4.10	Indicateur de dégradation à deux conditions de stress ; a) $T_1 = 85^{\circ}C$; b) $T_2 = 100^{\circ}C$	91
Figure 4.11	Analyse thermique d'une LED : a) sans courant direct et b) avec courant direct à 350mA	91
Figure 4.12	Analyse thermique d'une LED avec un courant d'alimentation à 350 mA : a) avant le test ; b) à 576 heures ; c) à 720 heures et d) à 1500 heures	92
Figure 4.13	Fonction de défaillance cumulée de la LED selon l'Équation (4.21) comparée aux valeurs expérimentales sous contrainte à $85^{\circ}C$	95
Figure 4.14	Fonction de défaillance cumulée de la LED selon l'Équation (4.21) comparée aux valeurs expérimentales sous contrainte à $100^{\circ}C$	96
Figure 4.15	Fiabilité des LED sous contrainte à a) $85^{\circ}C$; b) $100^{\circ}C$	96
Figure 4.16	Évolution simulée de la température de jonction avec a) $T_1 = 85^{\circ}C$ et b) $T_2 = 100^{\circ}C$	97
Figure 4.17	Fonction de défaillance cumulée estimée avec différents échantillons de don- nées sous contrainte à $85^{\circ}C$	98
Figure 4.18	Fonction de défaillance cumulée estimée avec différents échantillons de don- nées sous contrainte à $100^{\circ}C$	98
Figure 5.1	Diagramme de blocs d'un composant complexe des L éléments	102
Figure 5.2	Distribution de l'énergie dans un composant optoélectronique	103
Figure 5.3	Structure du composant complexe	105
Figure 5.4	Structure de la diode laser dans le composant complexe	106
Figure 5.5	Structure du composant complexe simplifiée	106
Figure 5.6	Résultat de la simulation du transfert de chaleur avant le test de vieillissement	107
Figure 5.7	Résultat de la simulation du transfert de chaleur après le test de vieillissement	108
Figure 5.8	Composant optoélectronique complexe	113
Figure 5.9	Dégradation et fiabilité du composant sous la condition de température : a) $T_k = 50^{\circ}C$; b) $T_0 = 25^{\circ}C$	114
Figure 5.10	Évolution de la température de LD et PD sous la condition de température $T_0 = 25^{\circ}C$	115
Figure 5.11	Analyse de sensibilité de $R(t)$ sur l'impact de la conception du composant complexe	115
Figure 5.12	Analyse de sensibilité de $R(t)$ sur l'impact de la dépendance stochastique	116
Figure 6.1	Conception d'un plan de ADT optimal avec la méthode bayésienne	120
Figure 6.2	Organigramme des étapes de base pour l'algorithme d'optimisation d'un plan de test accéléré avec la méthode bayésienne	122
Figure 6.3	Valeur de la fonction objectif en fonction du plan de test	124
Figure 6.4	Dégradation de la puissance optique sous deux conditions de température ; a) $T_1 = 40^{\circ}C$; b) $T_2 = 115^{\circ}C$	125
Figure 6.5	Fonction cumulative de la LED à partir du plan de test optimal η^* comparée aux valeurs expérimentales du chapitre 4 ; a) $T = 85^{\circ}C$; b) $T = 100^{\circ}C$	127

Liste des tables

Table 2.1	Augmentation de la température de la jonction de LED due au courant alimenté	59
Table 3.1	Résumé des processus de dégradation	68
Table 3.2	Résumé des études sur l'interaction de dégradation	72
Table 3.3	Synthèse des travaux en optimisation d'un plan de test de dégradation accélérée	74
Table 4.1	Données matériaux et valeurs de thermique	81
Table 4.2	Modèle géométrique retenu de la LED	81
Table 4.3	Conditions de test pour les LED Cree EZ1000	90
Table 4.4	Augmentation de la température de la jonction due au courant d'alimentation	92
Table 4.5	Augmentation de la température de jonction due à la dégradation des LEDs sous une contrainte de $T = 85^{\circ}C$	93
Table 4.6	Augmentation de la température de jonction due à la dégradation des LEDs sous une contrainte de $T = 100^{\circ}C$	93
Table 4.7	Paramètres d'estimation	94
Table 4.8	Résultat du test d'accélération sous contrainte $T_1 = 85^{\circ}C$	94
Table 4.9	Résultat du test d'accélération sous contrainte $T_2 = 100^{\circ}C$	95
Table 4.10	Incrément de la température de jonction obtenu à partir des simulations	97
Table 5.1	Dimensions de base du composant complexe	105
Table 5.2	Données matériaux et valeurs de thermique pour le composant complexe	107
Table 5.3	Impact de température sur la photodiode en fonction de la distance photodiode/diode laser	108
Table 5.4	Paramètres du système	113
Table 6.1	Distributions a priori $\pi(\theta)$	123
Table 6.2	Les combinaisons possibles de deux niveaux de stress en température	123
Table 6.3	Ensemble des plans de test réalisables	124
Table 6.4	Plan de tests optimaux pour les LED Cree EZ1000	125
Table 6.5	Paramètres d'estimation avec le plan de test optimal η^*	126
Table 6.6	Paramètres d'estimation avec le plan de test non optimal η'	126
Table 6.7	Différentes distributions a priori des paramètres du modèle	128
Table 6.8	Résultat d'un plan de test optimal par différentes distribution a priori	128

Glossaire des notations et abréviations

Acronymes

MOS	Metal-oxide-semiconductor - Métal-oxyde-semiconducteur
ICs	Circuits intégrés électroniques
PIes	Circuits intégrés photoniques
OEICs	Circuits intégrés optoélectroniques
SoC	Système-on-chip
MCM	Module multi-chip
MIL	Military Standard
JEDEC	Solid State Technology Association
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
DOE	Design of experiments
LED	Light emitting diode - diode électroluminescence
LD	Diode laser
PD	Photodiode
MZM	Modulateur Mach-Zehnder
REX	Retour d'expérience
AT	Test accéléré - Accelerated testing
ALT	Test de durée de vie accélérée - Accelerated life test
ADT	Test de dégradation accélérée - Accelerated degradation test
ADDT	Test de dégradation destructif accélérée - Accelerated destructive degradation test
PDF	Distribution de densité de probabilité de défaillance
CDF	Fonction de probabilité cumulative de défaillance
SDE	Equation différentielle stochastique
MVN	Distribution normale multivariée
MLE	Maximum de vraisemblance
DLM	Maximum de vraisemblance discrète
PCB	Carte de circuit imprimé - Printed circuit board
DL	Unité arbitraire - Digital level
MC	Monte Carlo

Notations

$R_i(t)$	Fiabilité du composant i
$R(t)$	Fiabilité du composant complexe/système
$F(t)$	Fonction de probabilité cumulative de défaillance
P_{opt}	Puissance optique
P_e	Puissance électronique
P_{heat}	Puissance dissipée
I_{th}	Courant de seuil
I_d	Courant d'obscurité
I_s	Courant de saturation inverse
I_p	Photo-courant
$X(t)$	Indicateur de dégradation
$\mu(\cdot)$	Taux de dégradation
t_f	Durée de vie au point de seuil D_f
E_a	Énergie d'activation
k_B	Constante de Boltzmann , $k_B = 1,38 \times 10^{-23} J/K$
$\theta(\cdot)$	Vecteur de paramètre du modèle de dégradation
$N(\cdot)$	Loi normale
$C(\cdot)$	Fonction de copule
$MVN(\cdot)$	Distribution normale multivariée
$E(\cdot)$	Espérance
$Var(\cdot)$	Variance
$\Phi(\cdot)$	Fonction de répartition de la loi normale
$B(t)$	Mouvement brownien standard
$\Sigma(\cdot)$	Matrice de covariance
$I(\cdot)$	Matrice de Fisher
n_{total}	Nombre total d'échantillons à tester
t_{total}	Durée de test
f	Intervalles de temps entre les mesures
K	Nombre de niveau de stress
n_k	Nombre d'échantillons soumis au niveau de stress k
t_k	Durée de test pour le niveau de stress k
π_k	Proportion relative
S_k	Niveaux de contrainte k
T_k	Contrainte de température au niveau k
m_k	Nombre de mesures sous le niveau de contrainte k
η	Plan de test
$\phi(\cdot)$	Fonction d'objectif

Introduction générale

Depuis de nombreuses années, les composants électroniques, (et plus spécifiquement ceux de la microélectronique) sont utilisés dans de nombreuses applications présentes dans les systèmes militaires, les systèmes de contrôle d'accès, les télécommunications, les équipements médicaux, etc. Ces applications requérant de plus en plus de fonctionnalités avec des exigences de performance accrues, elles ont pour conséquence une véritable évolution dans le développement de ces composants, c'est-à-dire prôner la nécessaire progression de composants simples (ex. une diode utilisée dans les postes de radio) à des composants complexes apportant de réels services. Vis-à-vis de ces composants, la notion de complexe est à rapprocher de la définition d'un système complexe, c.a.d. un ensemble d'éléments en interaction pour délivrer le service global attendu. Cette notion d'interaction entre éléments se construit sur différents types de dépendances qui sont, soit présents dès la conception (ex. topologique, fonctionnel, physique), soit émergents en regard du fonctionnement de ces composants (ex. propagation de dégradations, rayonnement).

Au global, au sein de ces composants complexes, il est possible de retrouver trois fonctions principales, à savoir la conversion optoélectronique, le traitement des signaux électroniques et le traitement des signaux optiques [19]. Ces fonctions sont supportées au sein d'une structure en puce comportant des interfaces à l'intérieur de chaque élément et entre les éléments. Dans ce cas, un composant complexe se construit à partir d'éléments discrets (éléments optiques et électriques) ou intégrés tels que des émetteurs, des détecteurs, des circuits intégrés électroniques (ICs), des circuits intégrés photoniques (PIes) ou des circuits intégrés optoélectroniques [3].

Dans ce contexte d'évolution des composants, les principaux composants concernés sont les composants de type optoélectroniques. En effet, ces composants ont un statut particulier du fait de leur double aspect électronique et photonique. Des exemples de ce type de composant sont : des capteurs ou photodiodes qui permettent la conversion de photons en charges électriques ; des émetteurs (diode laser ou DEL) qui réalisent la conversion inverse ; des amplificateurs, modulateurs, etc.

Cette complexité des composants optoélectroniques est fortement présente dans les composants étudiés au sein du CEA LETI de Grenoble, organisme initiateur de cette thèse. En effet le CEA se focalise, suite aux récents progrès faits sur les modalités d'intégration (monolithique, hybridation, collage direct, TSV...), sur des composants optoélectroniques intégrant, par exemple, une diode laser DBR III-V/silicium et un modulateur Mach-Zehnder (MZM) sur silicium [6]. L'intégration permet donc de connecter des fonctions de base (photo détection, émission de lumière, modulation de lumière) grâce aux guides d'ondes optiques. Ces composants optoélectroniques sont les "objets de recherche" étudiés dans cette thèse, objets conçus et fournis en expérimentation par le CEA LETI.

Ces composants complexes, étant utilisés dans de nombreuses applications à risques (ex. systèmes militaires), une de leurs caractéristiques essentielles est leur fiabilité. La fiabilité est définie comme la performance d'un composant, à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pour une "période de temps donnée" [20]. De plus, cette performance de fiabilité

du composant est à relier à la performance de chacun des éléments constituant ce composant (puisqu'il est complexe). L'étude de cette fiabilité est donc une problématique majeure à résoudre et par voie de conséquence la question scientifique clé abordée dans cette thèse. Sur cette dualité, objet de recherche (composant optoélectronique du CEA) et problématique scientifique (fiabilité du composant optoélectronique complexe) s'est construite cette thèse à travers une collaboration forte entre le Laboratoire d'Assemblage et Intégration Photonique (LAIP), CEA TECH Grenoble et le département de recherche en Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques complexes (ISET) du CRAN UMR CNRS 7039 - Université de Lorraine. Le CEA vient apporter sa compétence dans la conception de ces composants mais aussi le contexte de leur expérimentation ; le CRAN venant apporter ses compétences en fiabilité des systèmes.

En regard de ce besoin de maîtriser la fiabilité du composant complexe, le challenge essentiel est de disposer des outils nécessaires à son évaluation principalement à partir des informations de durée de vie ou de durée de vie résiduelle (RUL - remaining useful lifetime). Vis-à-vis de ces outils/méthodes d'évaluation de la fiabilité d'un composant, il est possible de distinguer des méthodes fondées sur les données (ou data-driven en anglais) [21], des méthodes fondées sur la physique (ou physics-based en anglais) [22], voire des méthodes hybrides [21]. Les méthodes basées sur la physique, principalement celles utilisées au CEA, ont pour objet de modéliser les différents mécanismes de dégradation du composant et permettent ainsi de mieux comprendre les causes réelles pouvant amener (à partir de la dégradation) à la défaillance et par voie de conséquence, en anticipation, de mieux concevoir le composant. Dans tous les cas, ces approches sont un outil majeur pour évaluer efficacement la fiabilité à long terme du composant en identifiant les localisations de défaut et ses mécanismes de défaillance.

Cependant, la phase d'élaboration de ces modèles de dégradation doit se prolonger, par une phase d'acquisition de données sur un composant "test" afin de pouvoir définir de façon pertinente les valeurs "réelles" des paramètres du modèle. Cette acquisition est réalisée lors d'expérimentations grandeur nature du composant. Le modèle ainsi paramétré est beaucoup plus représentatif du comportement réel de dégradation du composant. Cependant, les tests expérimentaux menés sur le composant sont assez compliqués à mener à la fois en regard des conditions du contexte du test mais surtout de leur durée puisque dans certains cas une dégradation n'est observable qu'après plusieurs milliers d'heures de fonctionnement (e.g. 10000h pour la LED) [22]. Face à ce problème, il est possible de faire des tests accélérés où les composants sont soumis à une condition de stress plus élevée que normal. Les tests accélérés ont l'objectif de réduire la durée de vie du composant en réduisant aussi la durée de test, bien que ce dernier peut rester relativement long dans certains cas (e.g. 5000h pour la LED) [22].

Dans le test accéléré, les données peuvent être divisées en deux types, en lien avec la durée de vie et en lien avec la dégradation [22]. Le test accéléré ne va donc pas porter directement sur le calcul de la durée de vie du composant mais plutôt sur la mesure de la performance liée au test de durée de vie accélérée (ALT) et/ou de test de dégradation accélérée (ADT) en sachant que l'ADT est généralement plus approprié que l'alternative ALT [23]. Ensuite, l'indicateur de dégradation pour l'ADT est lié à la détérioration de performance du composant. En regard de cet objectif, un plan de test accéléré est défini comme la conception des profils de contrainte (stress constant, stress échelonné), la répartition des échantillons, la durée des tests, la fréquence des mesures, les contraintes budgétaires, etc. [24].

A partir de cette double orientation "modèles de dégradation" et "test accéléré", plusieurs constats généraux, genèse de cette thèse, sont à mettre en évidence en lien avec les objets de recherche étudiés :

- L'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques dit complexes est difficile à appréhender à partir des modèles de la physique [3, 25]. En effet, l'établissement de

modèles nécessite une compréhension suffisante des processus physiques conduisant à la défaillance/ dégradation du composant. En particulier, il est difficile d'établir un modèle dynamique de l'ensemble composant représentatif des multiples processus de dégradation de chacun des éléments constitutants. Ce modèle "global" doit résulter des influences qui sont des facteurs de stress et des interactions de différents types entre les éléments en sachant que ces interactions sont présentes à la conception et/ou lors du fonctionnement.

- Dans la plupart des cas, le test accéléré considère que le composant a une fonction unique. La complexité des composants amène à évaluer la fiabilité des éléments constitutants [26]. Par conséquent, il est nécessaire de faire de nombreux tests pour chaque élément et le test est très long pour évaluer la durée de vie de ces composants et le profil des dégradations. En outre, les tests accélérés pour chaque élément ne sont pas efficaces dans une vision composant car il existe des influences entre éléments du composant.

En complément à ces constats généraux, des constats spécifiques, au contexte CEA de la thèse sont aussi à considérer :

- Les composants optoélectroniques étudiés sont des composants en R&D, il n'y a pas donc de REX relatif, par exemple, à l'exploitation d'une flotte de ces composants (les résultats d'expérimentations antérieures sont peu nombreux).
- Les composants étant de type R&D, un composant complexe (ou un de ses éléments) par rapport à un autre composant de même type n'a pas un comportement strictement identique (maturité dans le développement) et peut donc présenter une variabilité importante. Ceci implique de définir des modèles de dégradation par rapport à chaque occurrence de composant afin qu'ils soient pertinents et proches de la réalité.
- Il n'existe qu'un nombre limité des composants disponibles.

Face à ces constats généraux et particuliers, la thèse a donc pour objectif d'apporter des contributions scientifiques qui ont à être validées ensuite sur des cas applicatifs CEA. En ce sens, **la contribution majeure de la thèse est de développer une méthodologie (générique) d'optimisation de plan de test accéléré pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques complexes.**

Cette méthodologie est structurée autour de deux orientations clés s'articulant sur 3 verrous scientifiques à traiter en regard des constats avérés. Le premier verrou s'inscrit en regard du défi d'optimisation du plan de test accéléré pour l'évaluation de la fiabilité des composants. A ce verrou, nous proposons une contribution autour de la construction d'un plan de test accéléré défini à partir d'une combinaison de type de stress/niveau de stress à appliquer en test accéléré puis sur son optimisation (plan de test accéléré optimal). L'optimisation est recherchée, pour le plan de test, par la minimisation de la variance de tous les paramètres des modèles de dégradation des composants du système étudié tout en respectant les contraintes des ressources disponibles (nombre total de composants ; durée de test). Cette optimisation fait donc appel à des modèles de dégradations pertinents et robustes. En ce sens, deux autres verrous scientifiques sont abordés : la modélisation du processus de dégradation de l'élément en prenant compte des facteurs d'influence, et le calcul de la fiabilité d'un composant complexe en prenant en compte l'interaction entre éléments. Ces verrous s'inscrivent dans le défi de développement d'un modèle de dégradation pertinent et robuste, d'un composant complexe à des fins de calcul de sa fiabilité. Face à ces deux verrous, et en prônant une vision système, nous proposons de développer des modèles de fiabilité de niveau composant complexe, à partir des connaissances disponibles et des processus de dégradation élaborés (au niveau des éléments), afin d'offrir un moyen pour calculer/vérifier la durée de vie du composant étudié avec un certain niveau de confiance.

Plus précisément, les trois contributions globales précédentes se déclinent en 4 contributions particulières :

- Investigation et formulation d'impacts de facteurs d'influence (l'auto-échauffement au niveau élément et l'interaction d'états au niveau composant) sur le processus de dégradation des éléments (ex. diode laser, photodiode) d'un composant optoélectronique (contribution C1) ;
- Développement de modèles de dégradation permettant de tenir compte de l'impact de ces facteurs d'influence (auto-échauffement) pour chacun des éléments (contribution C2) ;
- Extension de chacun des modèles de dégradation proposé au niveau élément pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique complexe constitué à partir de ses éléments (contribution C3) ;
- Développement d'un plan optimisé de tests accélérés pour chacun des composants optoélectroniques étudié (Contribution C4).

La proposition et la validation de ces 4 contributions sont issues d'un protocole de recherche mêlant développement scientifique et expérimentation. Plus spécifiquement l'expérimentation consiste à appliquer les contributions à des éléments optoélectroniques tel que des émetteurs (diode électroluminescence ou LED - Light emitting diode en anglais, diode laser ou LD - laser diode) et puis des récepteurs (photodiode -PD) vis-à-vis des composants optoélectroniques complexes (ce composant complexe pouvant s'appeler un véhicule de test en regard de la phase d'expérimentation).

Ces 4 contributions sont défendues, présentées et argumentées au sein du manuscrit organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre a pour objet de définir le contexte de la thèse principalement en regard de l'objet de recherche étudié mais aussi des problématiques qui s'y rapportent en lien avec la fiabilité. En ce sens sont introduits les notions de composant électronique, de composant optoélectronique en général puis dans le cas particulier CEA, en se référant à la nécessaire évolution des composants simples vers des composants complexes (puces ou system-on-chip SoC) pour répondre aux nouvelles applications. La notion de complexe est référencée en lien avec les différents types de dépendances entre éléments du composant qui sont, soit maîtrisées dès la conception ou soit émergentes dans le fonctionnement. Cette notion de dépendance amène à se poser, d'un point de vue scientifique, la question de la fiabilité de ces composants complexes et surtout de son évaluation. De ce questionnement sont isolés 3 verrous non résolus dans ce contexte précis. Il est dans un premier temps présenté la notion de tests accélérés comme une solution alternative pour le test de fiabilité de ces composants. Cependant, le test accéléré doit être évalué à partir des éléments constitutifs. De plus, l'assurance d'un niveau de fiabilité donné requiert une taille d'échantillon spécifique, indépendamment de la complexité inhérente de l'élément de base. Dans le cas où il faut vérifier chaque élément, cela requiert un grand nombre d'éléments à tester avec un nombre de tests important conduisant à un temps de test très long. Le problème d'optimisation d'un plan de test accéléré est ainsi introduit correspondant au premier verrou scientifique auquel la thèse doit s'attaquer. Ensuite, ce chapitre met en évidence, l'importance, pour résoudre l'optimalité, de disposer de modèle de dégradation d'un composant complexe afin de calculer sa fiabilité ce qui correspond au second verrou. Cependant, pour modéliser la dégradation d'un composant complexe, il est nécessaire d'avoir les connaissances a priori des processus de dégradation de chacun des éléments. Donc, le troisième verrou identifié se réfère à la modélisation de la dégradation d'éléments. Ces trois verrous étant définis, des contributions vont être proposés dans les chapitres suivants pour y répondre.

Le deuxième chapitre, avant les chapitres de contributions, décrit l'ensemble des outils et moyens mis en oeuvre dans cette thèse pour mener les expérimentations portant sur des éléments optoélectroniques et composants complexes. Cette étape essentielle du protocole de recherche suivi dans la thèse, a pour objet la caractérisation et le suivi des paramètres de performances des

composants choisis et étudiés, en donnant aussi des informations sur les facteurs d'influence des dégradations et l'indicateur de dégradation. Le chapitre présente ainsi les éléments étudiés, tout d'abord, des composants de base de type émetteur (diode électroluminescence ou LED, diode laser ou LD) et puis ceux récepteurs (photodiode -PD). Ensuite le chapitre apporte des éléments sur un composant "complexe" (assimilable à la notion de véhicule de test), qui est composé d'une diode laser III-V, une photodiode PIN germanium et un guide d'onde silicium, le tout ayant été intégré à un masque de fabrication par le laboratoire LIPS- CEA LETI. Enfin, toute la plateforme d'expérimentation (l'infrastructure dans son ensemble), spécifiquement développée pour la thèse (tests des éléments et du composant complexe), est détaillée et la métrologie des mesures implantées sur ce banc est présentée. Un argumentaire sur la dispersion statistique des paramètres électro-optiques et thermiques avant le test accéléré des éléments/composants est aussi donné sous contraintes de la température et du courant. Ces études ont pour but de définir les marges opérationnelles de fonctionnement des éléments. Ces marges permettent d'ajuster les niveaux de contraintes au test accéléré afin d'éviter l'apparition de mécanismes de dégradation non représentatifs.

Le troisième chapitre est principalement un chapitre d'état de l'art pour argumenter la crédibilité du choix initial des trois verrous scientifiques isolés globalement dans le chapitre 1. Ces trois verrous portent sur l'optimisation de plan de test accéléré pour l'évaluation de la fiabilité de composants complexes. En ce sens, le chapitre 3 aborde tout d'abord la problématique d'un modèle de dégradation pour des éléments optoélectroniques (LED, LD, PD). Ensuite, un composant complexe est introduit à travers la relation de décomposition en éléments. Cette relation met en évidence clairement qu'un dysfonctionnement de l'élément peut impacter le fonctionnement global du composant "complexe". Cela amène à justifier une première question liée à *"Comment modéliser le processus de dégradation d'éléments en prenant compte des influences ?"*. De plus, sur une vision "système" du composant complexe, il existe des interactions entre éléments. Sur cette base et suite à un état de l'art autour de cette notion d'interactions dans l'étude de fiabilité, est introduit la seconde question liée à *"Comment calculer la fiabilité d'un composant complexe en prenant compte l'interaction entre éléments ?"*. Cette notion de complexité est enfin référée à la qualité/quantité des tests à faire pour évaluer expérimentalement la fiabilité du dit composant. Ceci conduit à isoler une troisième question à attaquer : *"Comment optimiser les plans de test accéléré tout en assurant la bonne précision sur le calcul de fiabilité ?"*.

Le quatrième chapitre a pour objet de présenter deux contributions (Contributions C1 et C3) en lien avec le verrou sur la modélisation des modèles de dégradation pour un élément prenant en compte des facteurs d'influences. Pour illustrer et valider expérimentalement ces propositions, une LED Cree EZ1000 a été choisie. Pour l'étude de l'impact des dépendances, une analyse a priori du composant est réalisée. Tout d'abord, la structure de l'élément est présentée afin d'identifier des paramètres de performance. Ensuite, la focalisation sur le flux d'énergie transformé par élément permet d'analyser l'impact de dépendance sur cet élément. Ces travaux sont réalisés par une modélisation multi-physique (avec l'outil COMSOL) et bien évidemment en dualité une partie expérimentale est menée. Pour la modélisation de dégradation, lorsque l'impact de dépendance est quantifié, cela permet de le formuler sur le taux de dégradation modifié. Un modèle intégrant l'impact de dépendance sur le processus de dégradation de l'élément est ensuite développé. La formulation de la fiabilité de l'élément est finalement dérivée.

Le cinquième chapitre traite de l'extension du modèle de dégradation proposé dans le chapitre 4 (contribution C2) pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique "complexe". Ce chapitre propose par conséquent deux contributions scientifiques (extension de la contribution C1, contribution C3) cherchant à modéliser l'impact des interactions entre éléments d'un composant "complexe" et à étendre des modèles de dégradation considérant l'impact de l'interac-

tion. Pour souligner l'existence de l'influence d'un élément sur un autre, la notion de composant optoélectronique "complexe" est décrite. La compréhension des propriétés du composant optoélectronique, sur la base des études du flux d'énergie et des interactions possibles entre éléments du composant étudié, aide à modéliser et à quantifier l'effet des interactions sur la dégradation d'autres éléments. Ensuite, un modèle de dégradation prenant en compte les interactions stochastiques entre éléments est développé pour chaque élément. Enfin, le modèle de calcul de la fiabilité pour les deux niveaux d'éléments et de composant "complexe" est étudié, ce qui permet d'aborder une contribution en regard du deuxième verrou scientifique.

Le sixième chapitre se réfère au dernier verrou scientifique relatif à l'optimisation d'un plan de test accéléré permettant de prendre en compte les impacts de la dépendance sur des éléments optoélectroniques. Ceci permet de présenter et argumenter la contribution C4. Tout d'abord, un rappel sur le plan de test accéléré et des constats du contexte CEA est présenté. Ceci a pour objet de formuler mathématiquement le problème d'optimisation. Ainsi, une approche permettant d'obtenir un plan de test optimal est proposée en référence aux limitations des méthodes actuelles :

- Le critère d'optimisation est formulé à l'aide du modèle de dégradation proposé dans les chapitres 4 et 5 ;
- Une procédure de construction de plan de tests utilisant la simulation de Monte-Carlo et l'inférence Bayésienne est justifiée ;
- L'algorithme de recherche d'un plan de test optimal est développé.

Enfin, pour clore cette thèse, un résumé de la démarche scientifique et des conclusions/perspectives sont énoncés dans la Conclusion générale et perspectives .

Chapitre 1

Problématique de l'évaluation de la fiabilité des composants optoélectroniques

Sommaire

1.1	Introduction	25
1.2	Évolution des composants électroniques	26
1.3	Méthodes d'évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique	30
1.4	Conclusion et problèmes posés	34

1.1 Introduction

Ce chapitre a pour objet de définir le contexte de la thèse principalement en regard de l'objet de recherche étudié, mais aussi des problématiques qui s'y rapportent en lien avec la fiabilité. En ce sens, dans la section 1.2, sont introduites les notions de composant électronique, de composant optoélectronique en général puis dans le cas particulier CEA, contexte de la thèse. Plus précisément, ces notions se réfèrent à la nécessaire évolution des composants simples vers des composants complexes (puces ou system-on-chip SoC) pour répondre aux nouvelles applications plus exigeantes en termes de services et de performances. La notion de composant complexe est à comprendre comme des éléments en interaction pour délivrer le service global attendu. Par rapport à ce contexte de composant complexe, les caractéristiques des composants optoélectroniques (composant complexe particulier) sont définies et précisées car ces composants sont ceux étudiés dans le cadre de cette thèse (objet de recherche). Ensuite, en section 1.3 est mis en évidence l'impact de la complexité du composant optoélectronique sur l'évaluation de sa fiabilité. En effet, dans cette évaluation sont à considérer les différents types de dépendances qui sont, soit maîtrisées dès la conception ou soit émergentes dans le fonctionnement, les facteurs de stress, les conditions de fonctionnement ... Un focus particulier est fait sur les méthodes fondées sur la physique du composant qui soulèvent la question des tests à mener sur les composants pour obtenir les données nécessaires à la paramétrisation du modèle de la physique élaboré. En ce sens, est repositionné le principe de tests accélérés comme une solution alternative pour le test de fiabilité de ces composants. Cependant, le test accéléré doit être évalué à partir des éléments

constituants. De plus, l'évaluation de la fiabilité requiert une taille d'échantillon spécifique, indépendamment de la complexité inhérente de l'élément de base. Dans le cas où il faut vérifier chaque élément, cela requiert un grand nombre d'éléments à tester avec un nombre de tests important conduisant à un temps de test très long. Le problème d'optimisation d'un plan de test accéléré pour un composant complexe est ainsi isolé comme un premier verrou scientifique auquel la thèse doit s'attaquer. Ensuite, est mise en évidence, l'importance, pour résoudre l'optimalité, de disposer de modèles de dégradations d'un composant complexe afin de calculer sa fiabilité, ce qui correspond au second verrou scientifique. Cependant, pour modéliser la dégradation d'un composant complexe, il est nécessaire d'avoir au préalable les connaissances a priori des processus de dégradation de chacun des éléments. Ceci constitue le 3ième verrou mis en avant pour la thèse. Enfin, les conclusions du chapitre sont données dans la section 1.4.

1.2 Évolution des composants électroniques

Depuis de nombreuses années, les composants électroniques (et plus spécifiquement ceux de la microélectronique) sont utilisés dans de nombreuses applications présentes dans les systèmes militaires, les systèmes de contrôle d'accès, les télécommunications, les équipements médicaux, etc. Ces applications requérant de plus en plus de fonctionnalités avec des exigences de performance accrues, elles ont pour conséquence une véritable évolution dans le développement de ces composants, c'est-à-dire prôner la nécessaire progression de composants simples (ex. une diode utilisée dans les postes de radio) à des composants complexes apportant de réels services. Vis-à-vis de ces composants, la notion de complexe est à rapprocher de la définition d'un système complexe, c.-à-d. un ensemble d'éléments en interaction pour délivrer le service global attendu [19]. Cette notion d'interaction entre éléments se construit sur différents types de dépendances qui sont, soit présents dès la conception (ex. topologique, fonctionnel, physique), soit émergents en regard du fonctionnement de ces composants (ex. propagation de dégradations, rayonnement).

La Figure 1.1 présente l'évolution d'un transistor simple vers un composant complexe - une puce à éléments multiples. Dans ce cas, un transistor métal-oxyde-semiconducteur (ou MOS - metal-oxide-semiconductor) simple, voir Figure 1.1.a), est constitué d'une source et d'un drain à travers lesquels les électrons peuvent circuler via un canal conducteur. Ce canal agit comme un interrupteur, en fonction de la charge électrique de la grille. Selon la polarité de la grille, le canal conducteur est ouvert ou fermé. La fiabilité du transistor est calculée assez simplement grâce à la dégradation d'un paramètre électrique [27]. Compte tenu des exigences des nouvelles applications, ce composant se doit d'évoluer. Il doit être combiné avec des éléments tels que des transistors, diodes laser, photodiode, résistances, etc., voir Figure 1.1.b). Ce composant devient donc un composant complexe. L'évaluation de la fiabilité est donc plus difficile à formuler en considérant des dégradations des éléments électriques, optiques, etc. [26].

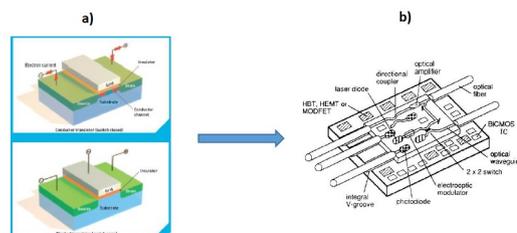


FIGURE 1.1 – Exemple d'une évolution du composant électronique ; a) Un transistor simple ; b) Un composant complexe sur puce [1, 2]

Au global, au sein de ces composants complexes, il est possible de retrouver trois fonctions principales, à savoir la conversion optoélectronique, le traitement des signaux électroniques et le traitement des signaux optiques [19], comme l'illustre la Figure 1.2. Ces fonctions sont supportées au sein d'une structure en puce comportant des interfaces à l'intérieur de chaque élément et entre les éléments d'un tel composant optoélectronique. Dans ce cas, un composant complexe se construit à partir d'éléments discrets (éléments optiques et électriques) ou intégrés tels que des émetteurs, des détecteurs, des circuits intégrés électroniques (ICs), des circuits intégrés photoniques (PIes) ou des circuits intégrés optoélectroniques [3]. En particulier, les circuits intégrés optoélectroniques (OEIC) combinent des dispositifs de conversion optoélectronique, à savoir des émetteurs et des détecteurs de lumière, avec des circuits électroniques pour la mise en œuvre des fonctions de traitement du signal. Le matériau du substrat est choisi parmi les semi-conducteurs de sorte que les dispositifs optoélectroniques ayant des longueurs d'onde utiles et les dispositifs électroniques peuvent être facilement fabriqués sur un substrat commun. Les formes des signaux d'entrée et de sortie sont différentes dans les OEICs ; l'une est optique et l'autre électronique.

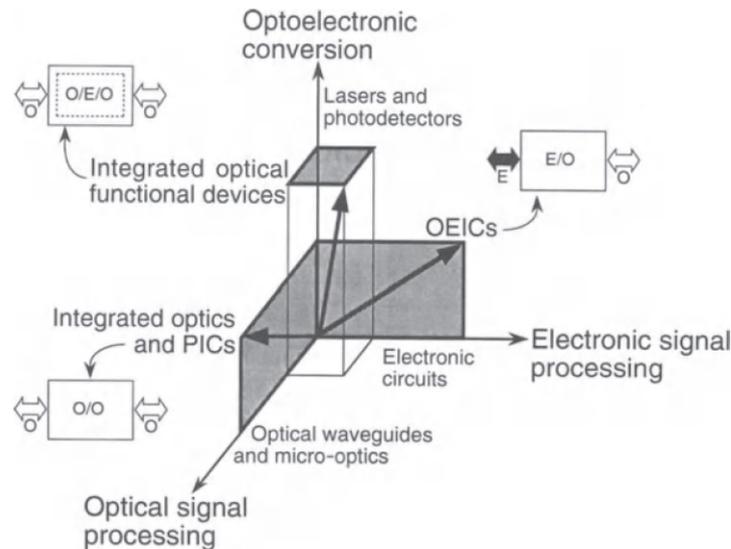


FIGURE 1.2 – Trois grandes catégories d'intégration optoélectronique [3]

Cette caractérisation de structure du composant est montrée dans la Figure 1.3 qui illustre une hiérarchie de structure en puce comportant des interfaces à l'intérieur de chaque puce et entre les puces. Cette structure se compose d'un niveau "composant", puis d'un niveau de module. Comme le module peut contenir les nombreux composants actifs ou passifs, optiques ou électroniques cités ci-dessus, il s'agit véritablement d'un module multi-technologique où le module peut contenir plusieurs circuits intégrés ainsi que des composants électriques passifs, tous reliés par un substrat multi-couche. Cette approche de l'intégration hybride est connue sous le nom de module multi-puce (ou MCM - Multi-chip-module en anglais). Pour les niveaux restants, il s'agit d'un niveau de carte et d'une communication électrique/optique entre les cartes.

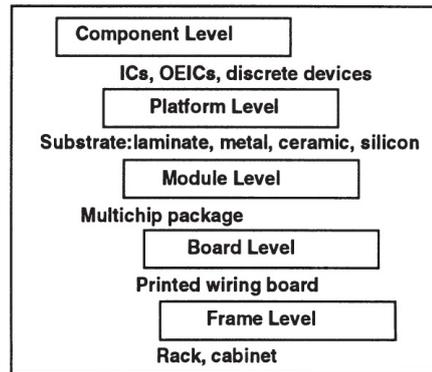


FIGURE 1.3 – Hiérarchie de l'emballage pour les systèmes multicapteurs [3]

Par conséquent, cette évolution des composants est nécessaire pour offrir des services plus importants en fonction des besoins des applications. En effet, des composants complexes comme le composant optoélectronique ont un statut particulier du fait de leur double aspect électronique et photonique. Ils sont constitués par des éléments tels que : des capteurs ou photodiodes qui permettent la conversion de photons en charges électriques ; des émetteurs (diode laser ou DEL) qui réalisent la conversion inverse ; des amplificateurs, modulateurs, etc. Le développement de ces composants complexes est donc basé sur des principes d'intégration (intégration monolithique et intégration hybride), voir Fig. 1.4, permettant alors de connecter des fonctions de base (photodétection, émission de lumière, modulation de lumière) grâce aux guides d'ondes optiques.

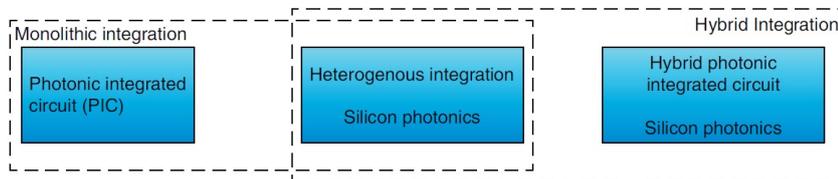


FIGURE 1.4 – Les différentes approches de la conception de puces photoniques en silicium [4]

- **L'intégration monolithique** : elle fait référence à un composant où les fonctions optiques sont toutes implémentées en utilisant le même matériau comme le phosphore d'indium ou l'arséniure de gallium, voir la Figure 1.5. Un exemple est un laser à modulation externe qui combine le laser et le modulateur ou un autre exemple est le circuit intégré photonique de 1,2 téra-bit d'Infinera qui combine des centaines de fonctions optiques [4].

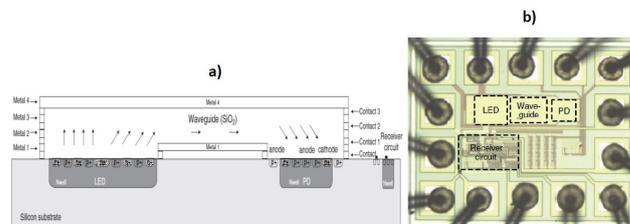


FIGURE 1.5 – Exemple d'optoélectronique monolithique ; a) Section transversale ; b) Microphotographie [5]

- **L'intégration hybride** : elle consiste à construire un circuit intégré photonique en utilisant deux matériaux ou plus. L'avantage de l'approche hybride est que le meilleur matériau peut être utilisé pour chaque fonction optique individuelle. Mais les différents matériaux doivent être combinés, ce qui présente ses propres défis de conception et de fabrication. Ce type d'intégration est celui majoritairement retenue au CEA LETI, organisme initiateur de cette thèse.

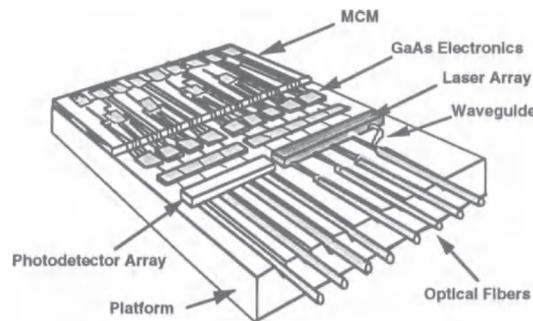


FIGURE 1.6 – Exemple de l'intégration hybride des optoélectroniques [4]

En effet, cette complexité des composants optoélectroniques, vis-à-vis de la problématique de leur intégration hybride, est fortement présente dans les composants étudiés au sein du CEA LETI de Grenoble. Le CEA se focalise sur des composants optoélectroniques intégrant, par exemple, une diode laser DBR III-V/silicium et un modulateur Mach-Zehnder (MZM) sur silicium, voir la Figure 1.7 [6]. Ces composants optoélectroniques sont donc les « objets de recherche » étudiés dans cette thèse, objets conçus et fournis en expérimentation par le CEA LETI.

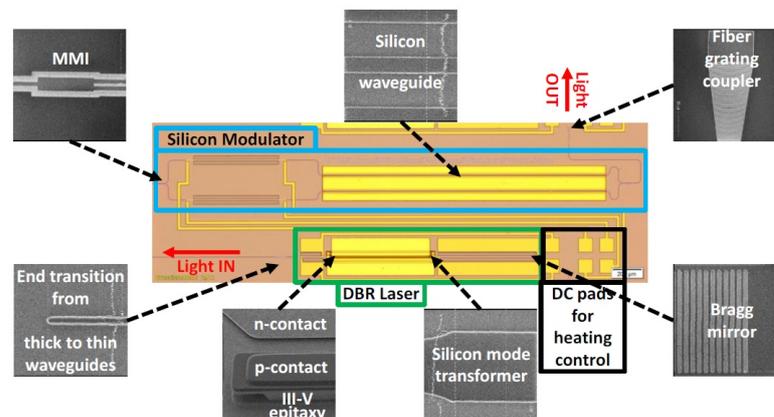


FIGURE 1.7 – Vue de dessus du transmetteur hybride III-V/silicium [6]

Ces composants complexes, étant utilisés dans de nombreuses applications à risques (ex. les télécommunications, les systèmes militaires, etc.), ils leur sont demandés de plus en plus de fonctionnalités avec des exigences de performance accrues [28], tels que la puissance optique, l'intensité du courant, etc. En outre, les performances de ces composants sont très sensibles aux facteurs d'influence tels que la condition d'environnement (température, humidité, courant, etc.) et facteur d'interaction de différents types (conception topologique, fonctionnelle ; fonctionnement-propagation de dégradation). En ce sens, une des caractéristiques essentielles de ces composants

est leur fiabilité, où la fiabilité est définie comme la performance d'un composant, à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pour une "période de temps donnée" [20]. De plus, cette performance de fiabilité du composant est à relier à la performance de chacun des éléments constituant ce composant (puisque complexe). Donc, le calcul de la fiabilité d'un composant complexe n'est pas toujours facile à calculer [3, 25] car les paramètres de performances du composant sont beaucoup plus complexes et difficiles à mesurer, et les paramètres de performance de l'élément que l'on ne peut pas laisser se dégrader varient d'une application à l'autre.

Par conséquent, l'étude de cette fiabilité est une problématique majeure à résoudre et par voie de conséquence la question scientifique clé abordée dans cette thèse. Sur cette dualité, objet de recherche (composant optoélectronique du CEA) et problématique scientifiques (fiabilité du composant optoélectronique complexe) s'est construite cette thèse à travers une collaboration forte entre le Laboratoire d'Assemblage et Intégration Photonique (LAIP), CEA LETI Grenoble et le département de recherche en Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques complexes (ISET) du CRAN UMR CNRS 7039 - Université de Lorraine.

1.3 Méthodes d'évaluation de la fiabilité d'un composant opto-électronique

Comme illustré précédemment, la problématique d'évaluation de la fiabilité, est une problématique essentielle pour les composants complexes.

D'après la norme de la Commission Internationale d'Électrotechnique, la fiabilité est définie comme la performance d'un composant, à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pour une "période de temps donnée" [20]. Vis-à-vis de cet accomplissement, un composant est considéré comme défaillant lorsque sa performance a dépassé un seuil critique [28]. En regard de ce besoin de maîtriser la fiabilité du composant complexe, il est donc nécessaire de disposer d'outils d'évaluation principalement à partir des informations de durée de vie ou de durée de vie résiduelle (RUL - remaining useful lifetime). Vis-à-vis de ces outils/méthodes d'évaluation de la fiabilité d'un composant, il est possible de distinguer des méthodes fondées sur les données (ou data-driven en anglais) [21], des méthodes fondées sur la physique (ou physics-based en anglais) [22], voire des méthodes hybrides [21]. Les méthodes basées sur la physique, principalement celles utilisées au CEA, ont pour objet de modéliser les différents mécanismes de dégradation du composant et permettre ainsi de mieux comprendre les causes réelles pouvant amener (à partir de la dégradation liée à la détérioration de performance) à la défaillance et par voie de conséquence, en anticipation, de mieux concevoir le composant. Dans tous les cas, ces approches sont un outil majeur pour évaluer efficacement la fiabilité à long terme du composant en identifiant les localisations de défaut et ses mécanismes de défaillance.

Cependant, la phase d'élaboration de ces modèles de dégradation doit se prolonger, par une phase d'acquisition de données sur un composant "test" afin de pouvoir définir de façon pertinente les valeurs "réelles" des paramètres du modèle. Cette acquisition est réalisée lors d'expérimentations grandeur nature du composant. Le modèle ainsi paramétré est beaucoup plus représentatif du comportement réel de dégradation du composant. Cependant, les tests expérimentaux menés sur le composant sont assez compliqués à mener à la fois en regard des conditions du contexte du test, mais surtout de leur durée puisque dans certains cas une dégradation n'est observable qu'après plusieurs milliers d'heures de fonctionnement (e.g. 10000h pour la LED) [22]. Face à ce problème, il est possible de faire des tests accélérés (AT ou Acceleration test en anglais) où les composants sont soumis à une condition de stress plus élevée que normale. Les tests accélérés ont l'objectif de réduire la durée de vie du composant en réduisant aussi la durée de test, bien

que ce dernier puisse rester relativement long dans certains cas (e.g. 5000h pour la LED) [22].

La fiabilité de composant est donc vérifiée par des tests accélérés. Une méthode d'accélération est une façon d'augmenter le taux d'utilisation ou d'utiliser des niveaux plus élevés de la condition normale pendant l'AT. La méthode d'accélération du taux d'utilisation s'applique davantage aux composants qui ne sont pas utilisés en permanence [29]. Les tests peuvent être accélérés en augmentant simplement le nombre d'heures de fonctionnement par unité de temps [30]. Lorsqu'il n'est pas possible et/ou efficace de faire échouer le composant à un taux d'utilisation plus élevé, des méthodes d'essai de contrainte accélérées peuvent être envisagées [22].

Dans le test accéléré, les données peuvent être divisées en deux types soit en lien avec la durée de vie soit en lien avec la dégradation [22]. Le test accéléré ne va donc pas porter directement sur le calcul de la durée de vie du composant, mais plutôt sur la mesure de la performance liée au test de durée de vie accélérée (ALT) et/ou de test de dégradation accélérée (ADT) en sachant que l'ADT est généralement plus approprié que l'alternative ALT [23]. Ensuite, l'indicateur de dégradation pour l'ADT est lié à la détérioration de performance du composant. En regard de cet objectif, un plan de test accéléré est défini comme la conception des profils de contrainte (stress constant, stress échelonné), la répartition des échantillons, la durée des tests, la fréquence des mesures, les contraintes budgétaires, etc. [24].

Vis-à-vis des contraintes (stress) de chargement, quatre types sont largement utilisés : contrainte constante, contrainte échelonnée, contrainte progressive et contrainte cyclique [22]. La Figure 1.8 montre les différents types de chargement de stress généralement appliqués dans les ATs.

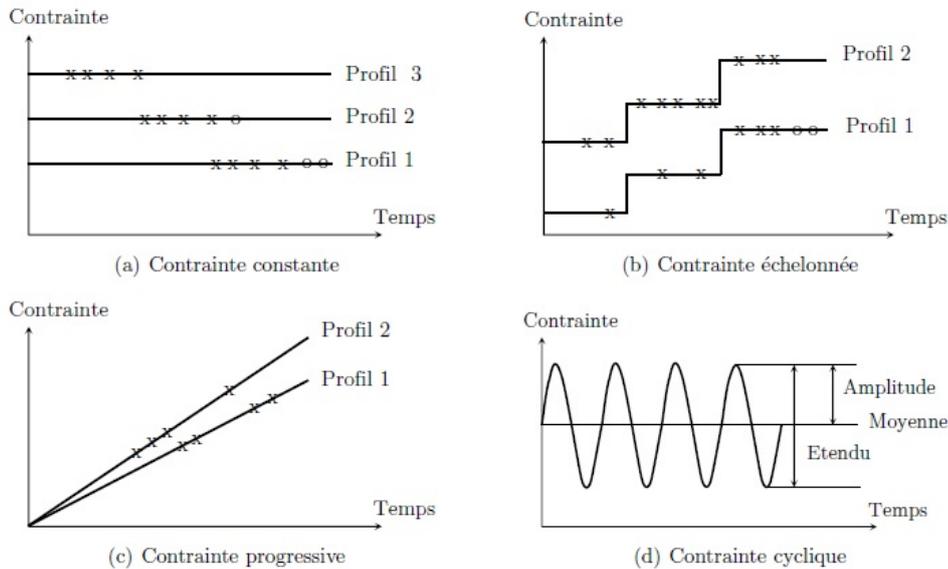


FIGURE 1.8 – Profils de tests accélérés [7]

La Figure 1.8.a montre le profil de la contrainte constante qui est la plus couramment appliquée dans les ATs [31, 32, 33]. Le temps de calcul, la facilité d'application de la contrainte et la disponibilité des modèles théoriques existants sont les principaux facteurs qui rendent l'utilisation d'une charge à contrainte constante favorable. Néanmoins, l'utilisation d'un chargement à contrainte constante peut parfois ne pas entraîner de défaillances pendant une période d'essai spécifiée et nécessite généralement une longue durée d'essai. Pour remédier à ce problème, la charge de contrainte échelonnée produit des défaillances relativement plus rapidement qu'un

essai à contrainte constante [34, 35] (Figure 1.8.b). Dans un test de contrainte échelonnée, le composant est soumis à une contrainte constante pendant une période de temps spécifique, puis la contrainte est augmentée jusqu'au niveau supérieur suivant. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'élément échoue ou soit que le test se termine (censuré). Les inconvénients de l'AT sous contrainte échelonnée sont la difficulté de l'estimation des paramètres et de l'extrapolation de la fiabilité aux conditions de fonctionnement normales, et les risques d'introduction de nouveaux modes de défaillance [24]. Une autre alternative consiste alors à appliquer une charge de contrainte progressive et cyclique dans l'AT (Figure 1.8.c et Figure 1.8.d). Dans un test accéléré de contrainte progressive, les éléments sont soumis à une contrainte qui augmente continuellement pendant la période d'essai [36].

De plus, au delà des types de stress à appliquer, la reproductibilité est toujours souhaitée dans ces tests d'accélération, c'est pourquoi le test de fiabilité est effectué conformément aux normes de test telles que JIS (Japan Industrial Standards), MIL (Military Standard), IEC (International Electrotechnical Commission), et JEDEC (Solid State Technology Association). Par exemple, la Figure 1.9 montre les éléments typiques d'un processus de test accéléré pour une puce de circuit intégré (IC) qui suit la norme JESD47G. Il s'agit de plusieurs types de contraintes telles que température, tension, humidité, etc., et le chargement de la contrainte est constant, cyclique. Il y a donc besoin d'un nombre de tests très importants et des tests très longs.

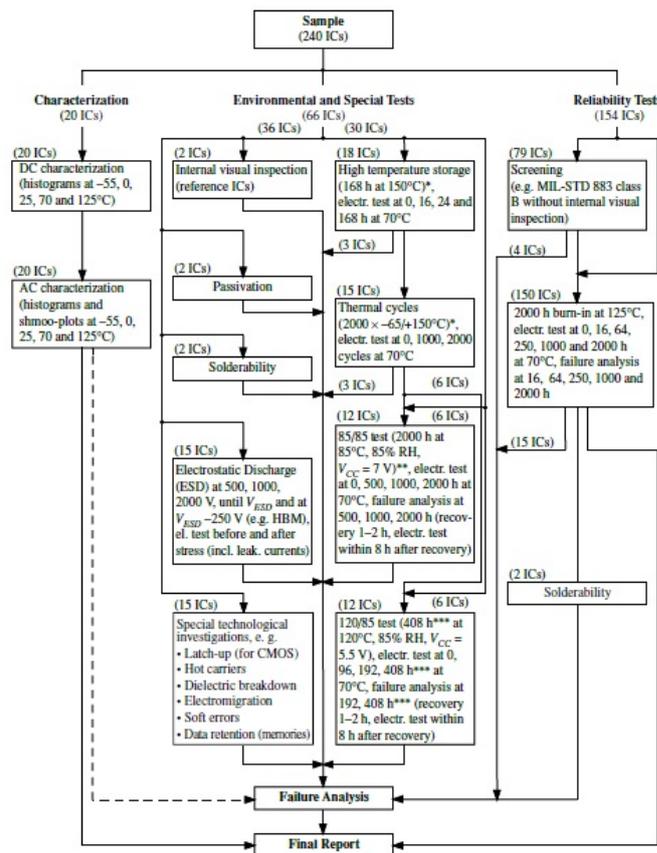


FIGURE 1.9 – Exemple d'un processus de test accéléré pour une puce de circuit intégré [8]

Dans la plupart des cas, le test accéléré considère que le composant a une fonction unique.

Ce n'est pas le cas de l'objet d'étude de la thèse. Or, pour le composant complexe, il est aussi nécessaire d'évaluer la fiabilité des éléments constitutifs [26]. De plus, l'assurance d'un niveau de fiabilité donné nécessite une taille d'échantillon spécifique, quelle que soit la complexité inhérente de l'élément. Ainsi, le coût d'un échantillon des composants complexes est élevé par rapport au coût d'un échantillon de même taille d'éléments discrets, même si certaines économies sont réalisées en évitant des programmes de fiabilité distincts pour chaque type de composant différent. Cette augmentation du coût peut être allégée dans une certaine mesure par l'utilisation de techniques d'accélération sous fortes contraintes pour de petits échantillons.

De plus, vis-à-vis de la vision composant optoélectronique "complexe" dans le contexte de R&D du CEA, plusieurs constats sont à mettre en évidence :

- Les composants étudiés sont des composants en R&D, il n'y a pas donc de REX relatif par exemple à l'exploitation d'une flotte de ces composants (les résultats d'expérimentation sont peu nombreux).
- Les composants étant de type R&D, un composant complexe (ou un élément) par rapport à un autre composant de même type n'a pas un comportement strictement identique (maturité dans le développement) et peut donc présenter une variabilité importante. Ceci implique de définir des modèles de dégradation par rapport à chaque occurrence de composant afin qu'il soit pertinent.
- Il n'existe qu'un nombre limité des composants disponibles.

Par conséquent, en considérant la spécificité du contexte CEA sur ces composants, il est nécessaire de faire de nombreux tests pour chaque élément et le test est très long pour évaluer la durée de vie de ces composants et le profil des dégradations. En outre, les tests accélérés pour chaque élément ne sont pas efficaces, car il existe des influences entre éléments du composant. Face à ces constats et vis-à-vis de l'objet d'étude de la thèse, un premier verrou à résoudre scientifiquement est "*l'Optimisation d'un plan de test accéléré pour un composant complexe de type optoélectronique*".

Cette optimisation fait donc appel à des modèles de dégradations d'un composant complexe. En effet, l'établissement de modèles nécessite une compréhension suffisante des processus physiques conduisant à la défaillance/ dégradation du composant. En particulier, il est difficile d'établir un modèle dynamique de l'ensemble composant représentatif des multiples processus de dégradation de chacun des éléments constitutifs. Par conséquent, le processus de défaillance d'un composant complexe est généralement lié aux processus de dégradation de plusieurs indicateurs de performance, qui présentent souvent des caractéristiques différentes. De plus, les processus de dégradation sont affectés par les profils d'exploitation et les conditions de travail, ce qui entraîne une dépendance entre les indicateurs au sein des multiples processus de dégradation, et une variabilité entre les éléments au sein du composant complexe. Ce modèle "global" doit résulter des facteurs d'influence qui sont des facteurs de stress et des interactions de différents types entre les éléments en sachant que ces interactions sont présentes à la conception et/ou lors du fonctionnement. Pour résoudre l'optimalité et répondre au premier verrou, il faut donc aussi disposer d'un "*Modèle de dégradation pertinent et robuste, d'un composant complexe à des fins de calcul de sa fiabilité*", ce qui correspond au second verrou.

Ce verrou implique de s'interroger sur les connaissances a priori des processus de dégradation de chacun des éléments constitutifs. Deux modèles de dégradation potentiellement utilisables sont : le modèle de dégradation déterministe et le modèle de dégradation stochastique [37].

En utilisant un modèle déterministe, la trajectoire de dégradation d'un élément est décrite par une fonction linéaire ou non linéaire du temps avec un ou plusieurs paramètres dépendant de la contrainte [37]. Dans un modèle de processus stochastique, les mesures de dégradation dans le temps et la variabilité inhérente du processus de dégradation sont incorporées dans un processus

stochastique. Récemment, plusieurs processus stochastiques largement éprouvés ont été utilisés pour modéliser les données ADT, telles que le processus de Wiener, le processus de mouvement Brownien, le processus gamma et le processus gaussien inverse (IG) [37].

Cependant, dans le contexte d'un composant dit complexe, l'incrément de dégradation d'un élément peut dépendre de la condition opérationnelle (facteur de stress), de son niveau de dégradation actuel ainsi que du niveau de dégradation des autres éléments. Plusieurs variantes du modèle proposé peuvent être spécifiées :

- Non prise en compte des effets intrinsèques et d'interaction, et le modèle proposé devient un modèle de base décrivant le comportement de dégradation homogène des éléments indépendants [38] ,
- Non prise en compte des effets d'interaction et le modèle proposé devient un modèle de base décrivant le comportement de dégradation non homogène [39],
- L'augmentation du niveau de dégradation de l'élément ne dépend pas de l'état du composant lui-même, mais dépend de l'état de l'autre élément [40, 41, 42],
- L'augmentation du niveau de dégradation de l'élément dépend de la condition opérationnelle, de l'état de lui-même ainsi que de l'état de l'autre élément.

Par rapport à ces différentes formes des dégradations, des effets, etc., il est nécessaire de s'attaquer à la "*Modélisation de la dégradation des éléments du composant*", troisième verrou abordé dans cette thèse.

1.4 Conclusion et problèmes posés

Avec le développement des technologies, les composants électroniques deviennent de plus en plus complexes avec des multiéléments et multifonctionnements. En ce sens, la notion de composant complexe est à comprendre comme des éléments en interaction pour délivrer le service global attendu. Cette notion d'interaction se construit sur différents types de dépendances qui sont, soit maîtrisées dès la conception ou soit émergentes dans le fonctionnement. Le composant complexe spécifiquement objet d'étude de cette thèse est le composant optoélectronique conçu et fourni par le CEA LETI. Ces composants, étant utilisés dans de nombreuses applications à risques (ex. les communications, système militaire), une de leurs caractéristiques essentielles est leur fiabilité qui est très sensible aux facteurs d'influence tels que la condition d'environnement (température, humidité, courant, etc.) et le facteur d'interaction de différents types (conception topologique, fonctionnelle ; fonctionnement-propagation de dégradation).

En regard de ce besoin de maîtriser la fiabilité du composant complexe, le test accéléré de type ADT est utilisé afin d'élaborer des modèles de dégradation. Ensuite, l'indicateur de dégradation pour l'ADT est lié à la détérioration de performance du composant. Cependant, la phase d'élaboration de ces modèles de dégradation doit se prolonger, par une phase d'acquisition de données sur un composant "test" afin de pouvoir définir de façon pertinente les valeurs "réelles" des paramètres du modèle. Cette acquisition est réalisée lors d'expérimentations grandeur nature du composant. En regard de cet objectif, un plan de test accéléré est nécessairement défini.

À partir de cette double orientation "modèles de dégradation" et "test accéléré", plusieurs constats généraux, genèse de cette thèse, ont été mis en évidence dans ce chapitre en lien avec les objets de recherche étudiés :

- Il est difficile d'établir un modèle dynamique de l'ensemble composant complexe représentatif des multiples processus de dégradation de chacun des éléments constitutifs. Ce modèle "global" doit résulter des influences qui sont des facteurs de stress et des interactions de différents types entre les éléments en sachant que ces interactions sont présentes

à la conception et/ou lors du fonctionnement.

- Il est nécessaire de faire de nombreux tests pour chaque élément et le test est très long pour évaluer la durée de vie de ces composants et le profil des dégradations. En outre, les tests accélérés pour chaque élément ne sont pas efficaces, car il existe des influences entre éléments du composant.

Face à ces constats généraux et particuliers, la thèse a donc pour objectif d'apporter des contributions scientifiques qui vont être ensuite validées sur des cas applicatifs CEA. En ce sens, la contribution scientifique majeur de la thèse est de développer une méthodologie d'optimisation de plan de test accéléré pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques complexes.

Les contributions scientifiques proposées dans cette thèse, doivent répondre à trois verrous identifiés dans ce chapitre :

- La modélisation du processus de dégradation au niveau élément en prenant en compte des facteurs d'influence ;
- La prise en considération d'interaction entre éléments dans leurs processus de dégradations pour l'évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique étudié ;
- Le développement d'une méthode d'optimisation efficace pour la recherche d'un plan de test accéléré optimal.

Le chapitre 2 suivant va présenter en détail les objets de recherche de la thèse et la plateforme d'expérimentation. Puis, ces trois verrous seront reprécisés dans l'étude de bibliographie du chapitre 3 afin de définir les contributions scientifiques à aborder.

Chapitre 2

Caractérisation des composants optoélectroniques étudiés et Plateforme d'expérimentation

Sommaire

2.1	Introduction	37
2.2	Composants optoélectroniques étudiés	38
2.2.1	Élément émetteur - LED	38
2.2.2	Élément émetteur - Diode laser	40
2.2.3	Élément récepteur - photodiode	44
2.2.4	Composant complexe - véhicule de test	47
2.3	Plateforme d'expérimentation	48
2.3.1	Caractérisation des LEDs	48
2.3.2	Caractérisation des diodes laser	51
2.3.3	Caractérisation des photodiodes	54
2.3.4	Banc de mesure thermique à l'aide de la caméra infrarouge	57
2.4	Conclusion	59

2.1 Introduction

Dans le chapitre 1, le contexte global de la thèse est présenté avec notamment la problématique de l'évaluation de la fiabilité de composants complexes plus spécifiquement des composants optoélectroniques de ceux fabriqués au CEA LETI. Ce chapitre décrit donc l'ensemble des outils et moyens mis en œuvre dans cette thèse en termes d'expérimentation en regard de ces composants optoélectroniques. Cette étape d'expérimentation essentielle du protocole de recherche, suivi dans la thèse, a pour objet la caractérisation et le suivi des paramètres de performances des composants choisis et étudiés, en donnant aussi des informations sur les facteurs d'influence des dégradations et les indicateurs de dégradation. Ce chapitre présente ainsi les éléments étudiés, tout d'abord, des éléments de base de type émetteur (diode électroluminescence ou LED - Light emitting diode en anglais, diode laser ou LD - laser diode) et puis ceux récepteurs (photodiode-PD). Ensuite ce chapitre apporte des éléments sur un véhicule de test, composant complexe, qui est composé d'une diode laser III-V, une photodiode PIN germanium et un guide d'onde

silicium, le tout ayant été intégré par le laboratoire LIPS- CEA LETI. Enfin, toute la plateforme d'expérimentation, spécifiquement développée pour la thèse (tests des éléments et du composant complexe), est détaillée. Un argumentaire sur la dispersion statistique des paramètres électro-optiques et thermiques avant le test accéléré des éléments est aussi donné sous les conditions de la température et du courant. Ces études ont pour but de définir les marges opérationnelles de fonctionnement des éléments. Ces marges permettent d'ajuster les niveaux de contraintes au test accéléré afin d'éviter l'apparition de mécanismes de dégradation non représentatifs.

En cohérence avec les éléments précédents, le chapitre 2 est organisé comme suit. Dans un premier temps, les structures des éléments/composants optoélectroniques étudiés au cours de cette thèse sont présentées dans la section 2.2. Puis, les différentes caractérisations électro-optiques et thermiques mises en place, ainsi que la plateforme d'expérimentation associée sont décrits dans la section 2.3.

2.2 Composants optoélectroniques étudiés

Dans le contexte d'évolution des composants électroniques, le composant optoélectronique est totalement représentatif de cette évolution des composants simples aux composants complexes (voir le chapitre 1). Ils sont constitués par des éléments tels que : des capteurs ou photodiodes qui permettent la conversion de photons en charges électriques ; des émetteurs (diode laser ou DEL) qui réalisent la conversion inverse ; des amplificateurs, modulateurs, etc. Dans cette thèse, les composants optoélectroniques dits complexes, sont les objets étudiés principalement pour l'évaluation de leur fiabilité.. Vis-à-vis de ces objets de recherche, nous précisons ci-après, la structure et les caractérisations des éléments optoélectroniques de base tels que LED, LD, PD, pour finalement décrire un composant complexe - véhicule de test.

2.2.1 Élément émetteur - LED

2.2.1.1 Description des LEDs

La diode électroluminescence (DEL) (ou *Light emitting diode -LED*) est une diode à jonction PN réalisée sur un matériau semi-conducteur à recombinaisons radiatives. Lorsque la LED est polarisée dans le sens direct, sous l'effet du courant d'alimentation, les électrons (de plus grande mobilité) de la région n sont injectés vers la région p où ils sont minoritaires et se recombinent avec les trous dans une région au voisinage de la jonction, limitée par leur longueur de diffusion, appelée zone active (voir Figure 2.1).

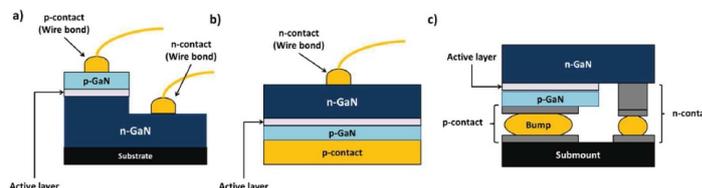


FIGURE 2.1 – Trois principales structures d'une puce LED ; a) Puce conventionnelle (Conventional Chip-CC ; b) Puce en couche mince verticale Vertical Thin Film-VTF ; c) Puce retournée (Flip chip- FC) [9]

Ils donnent ainsi lieu à un faisceau lumineux, donc de longueur d'onde, conditionné par la composition et l'état du matériau de type p dans lequel se produit l'essentiel des recombinaisons.

sons. La lumière émise peut ainsi être du domaine de radiations proches infrarouges, visibles ou ultraviolettes.

A partir de ce contexte de la LED, la Figure 2.2 présente une évolution de packaging de LED en regardant le management thermique. Un boîtier de LED monté sur une carte de circuit imprimé est composé d'un encapsulant qui joue le rôle de lentille et détermine l'angle d'émission lumineuse, d'une puce, d'un fil de liaison, d'une fixation de la puce, d'une cosse thermique et d'un joint de soudure. A ce jour, les embases sont les PCB en forme d'étoile (REBEL STAR) qui sont de type céramique, cuivre ou aluminium. Ceci permet notamment des facilités technologiques en plaçant plusieurs puces sur la même embase.

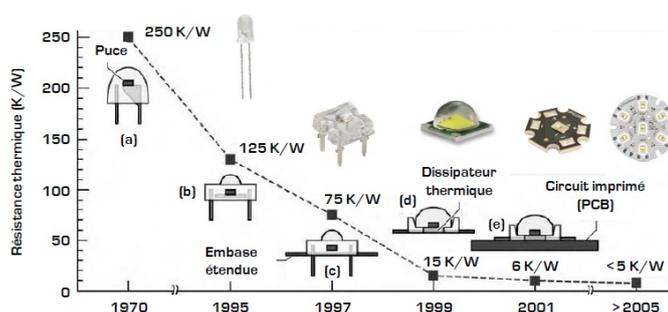


FIGURE 2.2 – Boîtier de LED assemblé avec une carte de circuit imprimé (PCB) [10]

2.2.1.2 Caractéristiques statiques et de performance des LED

Comme tout dispositif électronique, une LED est définie à l'aide de paramètres électriques et optiques.

Pour le paramètre d'optique, nous nous intéressons notamment à la puissance optique délivrée (P_{opt}) en fonction du courant fourni à l'élément (I) ; un exemple de la courbe de $P(I)$ est donné sur la Figure 2.3.

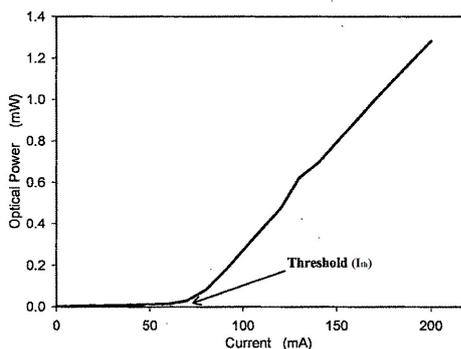


FIGURE 2.3 – LED - Puissance optique en fonction du courant d'alimentation

Dans la Figure 2.3, il y a l'émission de puissance au-delà du courant seuil (I_{th}), ensuite la puissance varie d'une façon linéaire du courant jusqu'à une valeur maximale (P_{max}), à partir de laquelle elle diminue. Au-dessus du seuil, la puissance est une fonction linéaire du courant :

$$P_{opt}(I) = \eta_{diff} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \quad (2.1)$$

où η_{diff} est l'efficacité optique; h est la constante de Planck ($6.63 \times 10^{-34} J.s$); ν la fréquence; q est la charge d'électron.

Le paramètre d'efficacité optique correspond à la pente de la $P_{opt}(I)$, dans sa partie linéaire. L'analyse de ses variations apporte une indication sur l'état de la région active de LED, qui nous renseigne sur la proportion de recombinaison non radiative par rapport aux recombinaisons radiatives.

La Figure 2.4 montre un exemple de caractéristique I-V en linéaire et en Semilog.

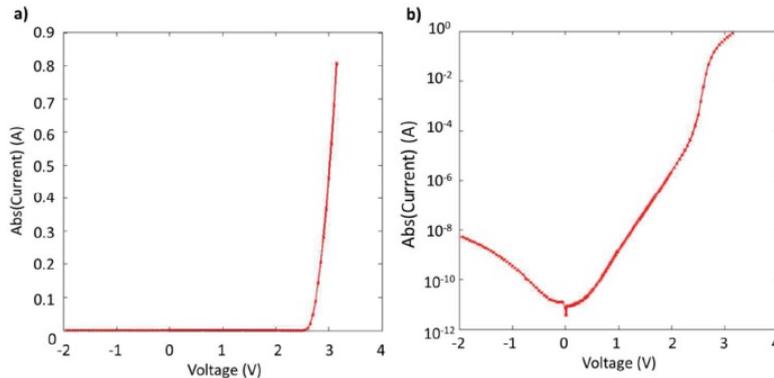


FIGURE 2.4 – Exemple de caractéristiques I-V ; a) Échelle linéaire ; b) Échelle Semilog [9]

La caractéristique I-V en linéaire permet d'obtenir une information sur la résistance série de l'élément et, après un bilan de puissance, de calculer la puissance dissipée. La résistance série de la LED est déterminée par la pente de la courbe caractéristique I-V au-dessus de la tension de seuil. En outre, la caractéristique I-V en Semilog, permet de situer le défaut dans la LED [43].

Caractéristique de la performance : Parmi des caractéristiques statiques telles que la puissance optique, le courant de seuil, résistance série, etc., il est nécessaire de choisir une caractérisation de performance à suivre pendant le test accéléré afin d'établir le processus de dégradation de la LED. Selon l'Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), la puissance optique a été choisie comme la caractéristique de performance de la LED [44]. Une LED est considérée comme défailante lorsque sa puissance optique atteint un seuil critique. Le seuil critique d'une LED est d'environ 70 % de la valeur initiale de la puissance optique de LED, appelée L_{70} .

2.2.2 Élément émetteur - Diode laser

2.2.2.1 Description des diodes laser

Fondamentalement, une diode laser est un amplificateur optique semi-conducteur converti en oscillateur en utilisant un chemin avec rétroaction optique, comme le montre la Figure 2.5. Un signal lumineux d'entrée (fourni par l'émission spontanée dans le cas des diodes laser) est amplifié, et la sortie retourne à l'entrée par la boucle de rétroaction, pour être à nouveau amplifiée. Le processus se poursuit jusqu'à ce que le gain de l'amplificateur sature et qu'un état d'équilibre soit atteint.

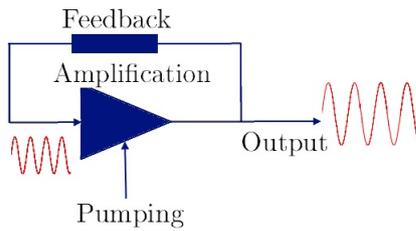


FIGURE 2.5 – Schématisation des mécanismes d'établissement de l'oscillation laser dans une cavité [11]

Puis, la cavité résonante supporte un certain nombre d'ondes stationnaires, ou modes. Comme l'illustre la Figure 2.6, ces derniers apparaissent lorsque la longueur de la cavité est un multiple d'une demi-longueur d'onde. Si le résultat de gain est suffisant pour surmonter les perturbations d'un mode résonant de la cavité, on dit que ce mode a atteint son seuil et qu'une lumière relativement cohérente est émise. La cavité résonante fournit la rétroaction positive nécessaire au rayonnement amplifié, de sorte qu'une oscillation laser peut être établie et maintenue au-dessus des niveaux de seuil.

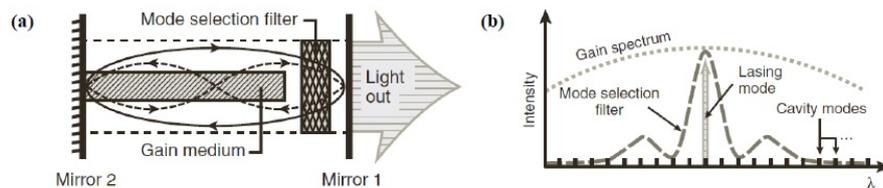


FIGURE 2.6 – a) Vue schématique des différents éléments nécessaires à la constitution d'un laser pour une longueur d'onde unique ; b) Caractéristiques spectrales des diodes laser pour un fonctionnement en mode unique [12]

Sur la base du procédé d'amplification, une diode laser Fabry Péro (FP) est illustrée schématiquement à la Figure 2.7. La diode laser FP consiste en un parallépipède rectangle d'un semiconducteur à bande interdite directe, généralement un semiconducteur composé III-V tel que le GaAs ou l'InP, incorporant une jonction p-n polarisée dans le sens direct et fortement dopée pour fournir le milieu de gain optique dans une cavité résonante. Puis, la diode laser FP consiste en un guide d'ondes délimité par deux faces clivées perpendiculairement sur le plan de la jonction qui forment deux miroirs semi-transparent, le clivage consistant à réaliser une cassure nette et parallèle à un plan réticulaire. Les autres côtés de la structure sont rugueux pour éviter des réflexions sur les autres faces de la structure.

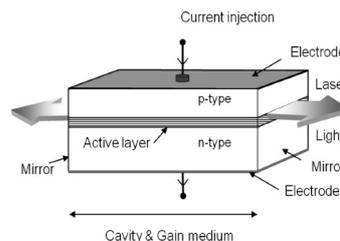


FIGURE 2.7 – Illustration d'une puce diode laser très basique [13]

D'autres structures existent, intégrant ce que l'on appelle un "réseau de Bragg", une structure périodique dont les éléments sont espacés d'une période définie, et qui diffracte la lumière suivant un angle défini. Le fait que le réseau de Bragg puisse sélectionner des longueurs d'onde spécifiques permet donc de l'envisager comme réseau de diffraction incorporé dans un guide d'onde à semiconducteur. Selon la position du réseau de Bragg (de chaque côté de la cavité ou sous celle-ci), deux types de diodes laser peuvent être présentés dans la Figure 2.8 : respectivement le "Distributed Bragg Reflector laser diode" ou encore diode laser DBR et "Distributed Feedback laser diodes" ou encore diode laser DFB.

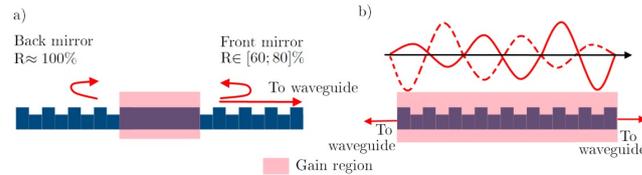


FIGURE 2.8 – Cavités de la diode laser ; (a) DBR ; (b) DFB [11]

Aujourd'hui, avec la forte demande de composants intégrant différentes fonctions optiques, **l'intégration des éléments sur silicium** est proposée pour résoudre le problème d'intégrer plusieurs fonctions optiques dans un composant. Dans cette thèse, la diode laser à rétroaction distribuée (DFB) intégrée sur silicium, réalisée au CEA LETI, est un de nos sous-objets de recherche. Dans un laser DFB, il n'y a qu'un seul réseau de Bragg incorporé dans le silicium, juste en dessous du III-V. Ensuite, une vue schématique du laser DFB hybride III-V sur silicium est présentée sur la Figure 2.9(a). Sa section transversale est identique à celle de la Figure 2.9(b). Le guide d'onde actif III-V est basé sous des MQW InGaAsP. Les couches de MQW sont entourées de deux couches d'InGaAsP et de deux couches d'InP dopées n et p, par conséquent en prenant en compte les cônes adiabatiques dans le guide d'onde en silicium et située de chaque côté du guide d'onde III-V.

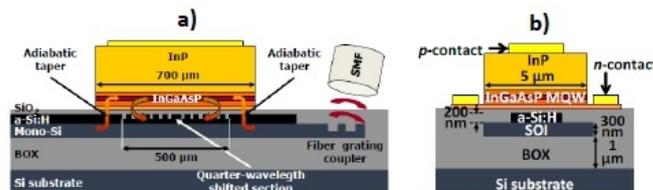


FIGURE 2.9 – Détails des DFB laser ; a) Schéma vue longitudinale du laser ; b) Schéma coupe transversale du laser [6]

Dans ces structures, la puissance optique générée par la cavité est partagée entre les guides actifs et passifs. Au milieu des guides, la lumière doit être confinée de préférence dans le guide actif pour augmenter le gain modal du laser. À ses extrémités, celle-ci doit être confinée dans le guide passif pour faciliter le couplage dans le circuit photonique de silicium. Les miroirs formant la cavité laser sont généralement présents dans les guides de silicium. Puis, la cavité laser s'étend au silicium et a un rôle de transfert de puissance optique vers le guide d'onde grâce à la théorie des modes couplés. Comme la structure DFB est symétrique, nous prenons l'hypothèse que la même puissance optique provient des deux sorties du laser.

2.2.2.2 Caractéristiques statiques et de performance des diodes laser

Pour une diode laser, plusieurs caractéristiques permettent d'accéder à un grand nombre d'informations, notamment sur la nature et la localisation des défauts dans l'élément [45]. La Figure 2.10 montre trois types de caractéristiques qui sont utilisées souvent pour l'évaluation de la fiabilité de la diode laser. Ce sont des caractéristiques puissance-courant, courant-tension, spectre optique [45, 46].

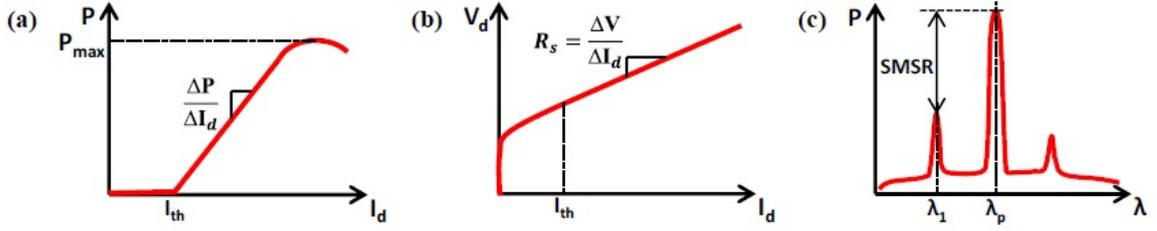


FIGURE 2.10 – Graphiques typiques utilisés pour caractériser la diode laser : a) Puissance optique en fonction du courant d'alimentation ; b) Tension en fonction du courant d'alimentation ; c) Puissance optique en fonction de la longueur d'onde à un courant d'alimentation donné

Sur la Figure 2.10.a, il est possible d'observer une caractéristique $P(I)$ classique d'une diode laser, avec un seuil d'émission I_{th} , et une puissance optique qui augmente linéairement à partir de ce seuil, jusqu'à une valeur P_{max} . La puissance est une fonction linéaire du courant :

$$P_{opt}(I) = \eta_{diff} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \quad (2.2)$$

où η_{diff} est l'efficacité optique ; h est la constante de Planck ($6.63 \times 10^{-34} J.s$) ; ν la fréquence ; q est la charge d'électron. Le paramètre d'efficacité optique correspond à la pente de la $P_{opt}(I)$, dans sa partie linéaire. L'analyse de ses variations apporte une indication sur l'état de la cavité laser au travers du rendement quantique interne, qui renseigne sur la proportion de recombinaison non radiative par rapport aux recombinaisons radiatives, et sur l'état des miroirs au travers de la perte intrinsèque à la structure de la diode laser.

La Figure 2.10.b présente une caractéristique V-I. La résistance en série de la diode laser est généralement déterminée par la pente de la courbe caractéristique I-V au-dessus de la tension de seuil. Des valeurs élevées de résistance série peuvent être un facteur important dans la dégradation de la diode laser.

La Figure 2.10.c trace la puissance en fonction de la longueur d'onde pour un courant d'alimentation donné. Cette courbe est un moyen de vérifier les modes du laser. A ce type de la diode laser DFB, le laser doit être monomode, ce qui signifie que la différence entre le sommet le plus élevé et le deuxième sommet doit être aussi grande que possible. Cette différence s'appelle le rapport de suppression de mode latéral (SMSR) et se mesure en décibels (dB).

$$SMSR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{opt}(\lambda_c)}{P_{opt}(\lambda_1)} \right) \quad (2.3)$$

Caractéristique de performance : Par rapport à l'ensemble des caractéristiques statique de la diode laser, il est nécessaire d'identifier une caractérisation de performance à suivre pendant le test accéléré afin de modéliser le processus de dégradation. Dans la littérature, deux types de caractérisation sont utilisées souvent : le courant de seuil dans la condition de la puissance

optique qui reste constante, et la puissance optique dans la condition du courant d'alimentation constant [47, 28]. Pour cette thèse, nous proposons de prendre la puissance optique comme la caractéristique de performance afin d'éviter l'effet de l'échauffement par le courant d'alimentation.

2.2.3 Élément récepteur - photodiode

2.2.3.1 Description de la photodiode

Les récepteurs - photodiodes sont des éléments photosensibles. Leur fonctionnement est basé sur l'interaction photon – électron, et sur les mécanismes de conduction dans une jonction PN polarisé en inverse et soumise à un rayonnement, voir la Figure 2.11. Lorsque la radiation lumineuse est absorbée par le matériau photosensible, les paires électron-trou créées sont dissociées par le champ électrique; l'électron est propulsé vers la région n et le trou vers la région p. ces deux photo-porteurs donnent naissance à un photocourant, I_p .

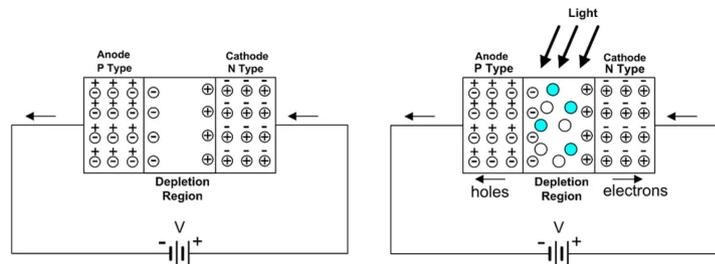


FIGURE 2.11 – La photodiode à polarisation inverse produit un courant proportionnel à l'intensité lumineuse en raison de la création de paires électron-trou dans la région de déplétion. Les cercles bleus représentent les électrons et les cercles blancs les trous

Puis, la jonction de photodiode polarisée en inverse, non éclairée, présente une zone de déplétion avec peu de porteurs libres. Elle ressemble à un condensateur chargé. Il y a un petit courant causé par l'ionisation thermiquement excitée, appelé courant d'obscurité, I_d .

Actuellement, la photodiode est largement utilisée. En regardant les domaines d'application, il existe plusieurs types de technologies ainsi que différentes structures de photodiode. La Figure 2.12 présente les différentes structures des photodiodes.

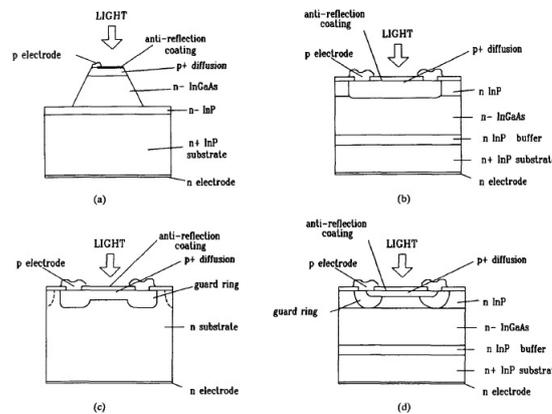


FIGURE 2.12 – Différentes structures de photodiode : a) PIN mesa III-V ; b) PIN planaire III-IV ; c) APD au germanium ; d) APD III-V [14]

Les Figures 2.12.(a) et (b) présentent une photodiode PIN. Une photodiode PIN est une photodiode avec une région intrinsèque entre les régions dopées n et p. La plupart des photons sont absorbés dans la région intrinsèque, et les porteurs qui y sont générés peuvent contribuer efficacement au photocourant [48]. Ensuite, les structures des photodiodes à avalanche sont illustrées aux figures Figure 2.12(c) et Figure 2.12(d). La technologie des photodiodes à avalanche est utilisée dans les zones de faible luminosité. La photodiode à avalanche offre des niveaux de gain très élevés, mais en contrepartie, elle présente des niveaux de bruit élevés [48].

De plus, à l'aide du développement de la technologie d'intégration, une Ge photodiode intégrée sur Si est proposée pour répondre à la demande de la construction d'un composant à multi-éléments. Cette photodiode est aussi un autre sous-objet de recherche pour cette thèse. La Figure 2.13 présente donc une photodiode Ge intégrée sur Si. Les Germanium photodétecteurs PIN à guide d'ondes en Si ont été fabriqués sur une plaque SOI avec une couche de silicium sur un oxyde enterré (Figure 2.13(a)). La couche d'absorption en germanium non dopée a été développée au-dessus d'un guide d'ondes en silicium dopé de type p, et un dopant de type n+ a été implanté [15]. Des contacts ohmiques et un routage métallique ont été formés à la fois sur la couche de guide d'ondes en Si de type p sur le côté du dispositif et sur la couche supérieure de Ge de type n+. La lumière qui se propage dans le guide d'ondes en silicium est directement couplée dans la couche supérieure de Ge déposée sur la couche de Si, où elle est absorbée dans la couche intrinsèque de la structure PIN. Une vue de haut en bas de la disposition du dispositif est présentée sur la Figure 2.13(b).

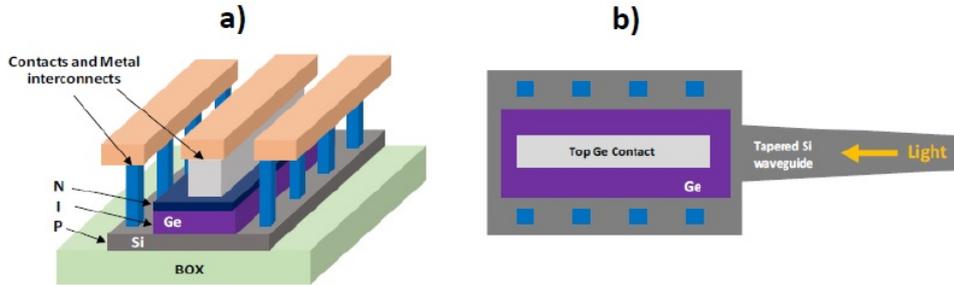


FIGURE 2.13 – Germanium photodiode sur silicium : a) Structure schématique de la photodiode (section transversale) ; b) Disposition de la photodiode [15]

2.2.3.2 Caractéristiques statiques et de performance de la photodiode

La caractéristique de la photodiode est présentée sur la Figure 2.14. La caractéristique courant-tension d'une photodiode sans lumière incidente est similaire à celle d'une diode redresseuse. Lorsque la photodiode est polarisée en sens direct, on observe une augmentation exponentielle du courant. Lorsqu'une polarisation inverse est appliquée, un petit courant de saturation inverse apparaît. Il est lié au courant d'obscurité de la manière suivante :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

où I_d est le courant d'obscurité de la photodiode, I_s est le courant de saturation inverse, q est la charge des électrons, V est la tension appliquée, $k_B = 1,38 \times 10^{-23} J/K$, est la constante de Boltzmann et T est la température absolue (273 K= 0 °C).

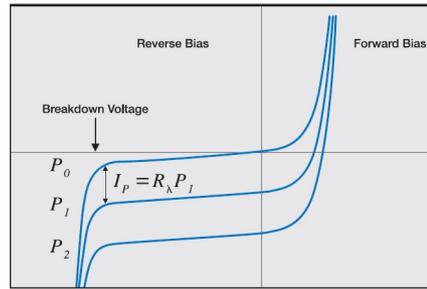


FIGURE 2.14 – Courbes I-V caractéristiques d'une photodiode. $P_0 - P_2$ représentent différents niveaux de lumière

Cette relation est illustrée à la Figure 2.14. À partir de l'Equation (2.4), trois différents états peuvent être définis :

- $V = 0$. Dans cet état, le courant devient le courant de saturation inverse.
- $V = +V$. Dans cet état, le courant augmente de façon exponentielle. Cet état est également connu sous le nom de mode direct.
- $V = -V$, Lorsqu'une polarisation inverse est appliquée à la photodiode, le courant se comporte comme indiqué sur la Figure 2.14.

L'illumination de la photodiode par un rayonnement optique déplace la courbe I-V de la quantité de photocourant (I_p). Donc :

$$I_{TOTAL} = I_{SAT} \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - I_p \quad (2.5)$$

Et I_p est défini comme suit :

$$I_p = R_\lambda \times P \quad (2.6)$$

où, R_λ est la sensibilité d'une photodiode. Elle est définie comme le rapport entre le photocourant I_p et la puissance lumineuse incidente P à une longueur d'onde donnée (λ). En d'autres termes, il s'agit d'une mesure de l'efficacité de la conversion de la puissance lumineuse en courant électrique.

Ensuite, lorsque la tension inverse appliquée augmente, on observe une forte augmentation du courant de la photodiode. La tension inverse appliquée à ce point est appelée tension de claquage. Il s'agit de la polarisation inverse maximale appliquée, en dessous de laquelle, la photodiode doit fonctionner (également connue sous le nom de tension inverse maximale). La tension de claquage, varie d'une photodiode à l'autre et est généralement mesurée, pour les petites surfaces actives, à un courant de photodiode de $10 \mu A$.

De plus, les autres caractéristiques de la photodiode peuvent être listées :

- La résistance shunt est la pente de la courbe courant-tension de la photodiode à l'origine, c'est-à-dire $V=0$. La résistance en dérivation est utilisée pour déterminer le courant de bruit dans la photodiode sans polarisation (mode photo-voltaïque). Pour une meilleure performance de la photodiode, la résistance shunt la plus élevée est souhaitée. Et la résistance en série d'une photodiode provient de la résistance des contacts.
- Les limites de la région de déplétion agissent comme les plaques d'un condensateur à plaques parallèles. La capacité de jonction, C_j , est directement proportionnelle à la zone diffusée et inversement proportionnelle à la largeur de la région de déplétion. En outre, les substrats à résistivité élevée ont une capacité de jonction plus faible. La capacité de jonction est utilisée pour déterminer la vitesse de réponse de la photodiode.

Toutes les caractéristiques des photodiodes sont affectées par les changements de température. Elles comprennent le courant d'obscurité, la tension de claquage, la réactivité et, dans une moindre mesure, d'autres paramètres telles que la capacité de jonction.

Caractéristique de performance : Pendant le fonctionnement à long terme, la dégradation de la photodiode induit trois modes de défaillance à travers le changement des caractéristiques de la photodiode, ce sont : graduel, rapide et soudain [47]. Puis, parmi des caractéristiques de la photodiode, la dégradation de la photodiode est déterminée souvent par la détérioration du **courant d'obscurité** [47, 28]. Donc, le courant d'obscurité est choisi dans cette thèse comme la caractérisation de performance à suivre pendant le test accéléré afin de modéliser le processus de dégradation de la photodiode.

2.2.4 Composant complexe - véhicule de test

Comme mentionné au chapitre 1, il existe actuellement deux approches pour combiner des éléments de type de ceux présentés en section précédente afin de créer un composant optoélectronique complexe : intégration monolithique et intégration hybride.

Dans notre étude, les éléments du composant sont intégrés sur substrats en silicium et sur isolant (SOI) avec le type d'intégration hybride. Afin de valider expérimentalement la démarche de la thèse, un véhicule de test avait été planifié par le laboratoire LIPS- CEA LETI. La Figure 2.15 présente le schéma bloc de ce véhicule de test, qui simule une liaison optique simplifiée et qui est composé d'une diode laser III-V, une photodiode PIN germanium et un guide d'onde silicium.

Dans le véhicule de test, une diode laser à réflecteur de Bragg distribué (DFB) a été prévue, où le réseau DFB est gravé le long du guide d'ondes en silicium de 500 nm d'épaisseur sous les couches actives III-V. Les réseaux sont construits en dessous de la région de gain, dans le silicium également. Le guide d'onde en silicium est constitué d'une nervure de 200 nm d'épaisseur sur une plaque de 300 nm d'épaisseur, comme cela est visible sur la coupe transversale du laser, voir la Figure 2.9(b). En fonctionnement, la lumière émise par le laser passe par un guide d'onde en silicium et est collectée hors de la puce à l'aide d'un coupleur guide d'onde réseau de fibres. De plus, la lumière de la diode laser passe par le guide d'onde jusqu'au photodétecteur, dans lequel la photodiode agit comme un capteur qui surveille le système.

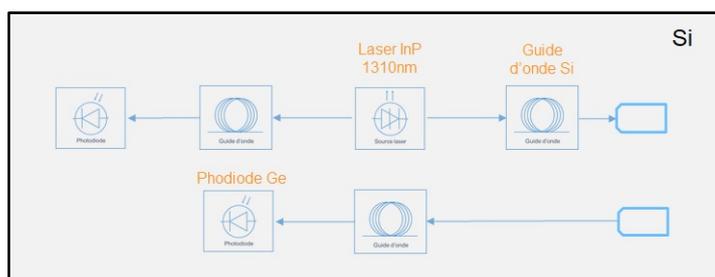


FIGURE 2.15 – Vue de Schéma bloc du véhicule de test

Cependant, ce véhicule de test n'a pas été développé au final suite à différentes contraintes (situation COVID, difficulté de fabrication de certains éléments). Donc, une réflexion a été menée pour redéfinir quels scénarios de tests pouvaient être réalisés dans le temps restant, mais aussi sur quel véhicule de test. Il a été décidé de se focaliser sur quelques éléments disponibles ; ce sont des émetteurs comme les LED et les diodes laser, les récepteurs comme la photodiode ; et faisant partie du véhicule initial.

2.3 Plateforme d'expérimentation

Dans la section 2.2, nous avons présenté les objets de recherche retenus pour l'expérimentation ainsi que leurs caractérisations qui ont été utilisées tout au long de ce travail de thèse, et sur les résultats desquels sont basés les développements des différents modèles de dégradations proposés par la suite. Il faut donc maintenant présenter plus globalement la plateforme utilisée au CEA qui a permis de réaliser ces caractérisations sur ces objets de recherche.

2.3.1 Caractérisation des LEDs

2.3.1.1 Préparation d'échantillon des LED

Afin de réaliser les expériences liées aux travaux sur les LED qui sont présentés aux chapitres 4 et 6, notre choix s'est porté sur un élément LED commercial mature et déjà largement étudié dans la littérature : LED CREE EZ1000. Cette puce a été brasée et câblée au laboratoire LAIP, sur un circuit imprimé à base céramique dit "STAR" du fait de sa forme, voir Figure 2.16. Une particularité de ces échantillons de test est cependant à noter : pour limiter les mécanismes de défaillances à la puce et à son assemblage, la puce n'a pas été encapsulée dans une lentille de silicone comme cela est généralement fait, et aucun luminophore n'a été ajouté dans le but de convertir l'émission bleue de la puce en lumière blanche.

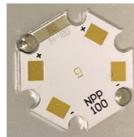


FIGURE 2.16 – LED montée sur un PCB

Ces "STAR" sont ensuite introduits dans des modules de vieillissement conçus dans le laboratoire LAIP. Les objectifs de ces modules sont de piloter les LEDs et d'assurer une bonne dissipation thermique. Ces modules sont constitués de deux parties : une base et un couvercle avec un point de connexion pour le raccordement électrique. La vue SolidWorks d'un module est présentée dans la Figure 2.17.

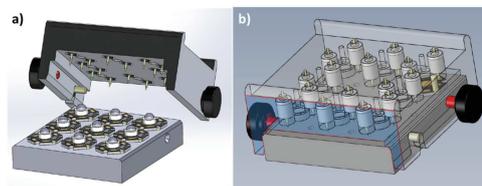


FIGURE 2.17 – Représentation des modules de caractérisation et test accéléré [9]

D'après la Figure 2.17, un module peut contenir jusqu'à huit LED. Les points de connexion sont montés dans un matériau polymère et sont en contact avec les pads du PCB. Ensuite, la partie optique est relativement délicate, car elle doit permettre le meilleur couplage entre la LED et la fibre optique du spectromètre, voir la Figure 2.18. 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.

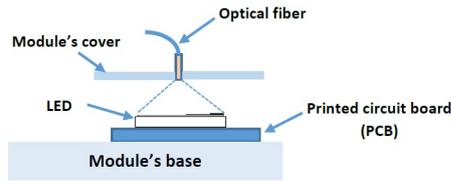


FIGURE 2.18 – Visualisation de la conception optique envisagée

2.3.1.2 Banc de mesure des LEDs

À l'aide du module développé dans la section précédente, le banc de mesure V-I et P-I de la LED est présenté sur la Figure 2.19. Le matériel utilisé est constitué :

- D'un générateur source mètre KEITHLEY 2600 connecté par un bus IEEE à l'unité de l'ordinateur qui pilote le banc. Cet appareil est utilisé comme source de courant biais, que nous appliquons aux LEDs, et permet de mesurer la tension de LED.
- D'un spectromètre (Spectrale Suite USB2000+) utilisé pour mesurer la spectrale et l'intensité de LED.
- D'une enceinte climatique (CLIMATS Excal) utilisée pour la régulation thermique lors des mesures.

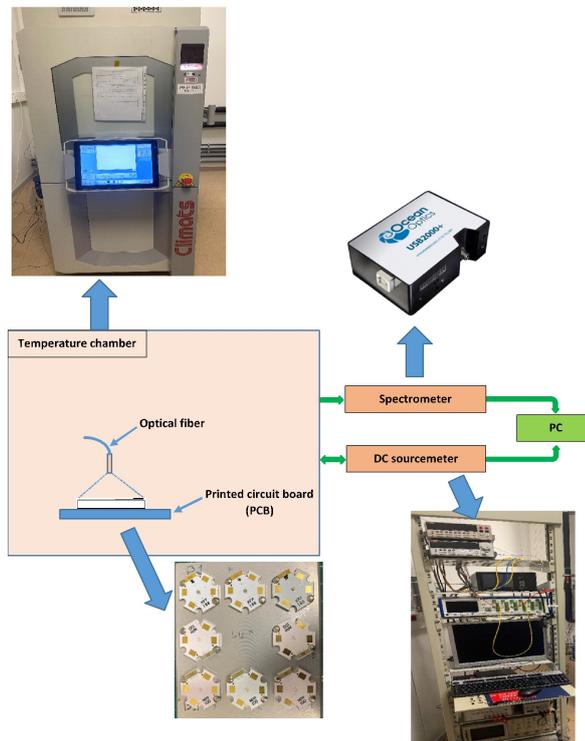


FIGURE 2.19 – Schéma de principe du banc de mesure pour V-I, P-I des LED

La LED est placée dans une enceinte climatique et illumine une fibre optique. Cette enceinte nous permet de maintenir la température autour de la LED pendant la caractérisation in-situ et le vieillissement. Et, la fibre optique est reliée à une mesure de la puissance optique à l'aide

du spectromètre. La puissance optique de LED est le paramètre clé. Dans le but d'observer une éventuelle défaillance sur les caractéristiques d'un élément, une baisse de la puissance optique nous renseigne sur un possible désalignement optique, ou encore sur une augmentation des pertes dans la région de LED. Pour cela, la caractéristique puissance-courant, ou encore appelée P-I, est mesurée en faisant varier la valeur du courant (le courant varie de 0 à 1200mA). Les résultats de mesure de P-I avec différentes températures sont présentés dans la Figure 2.20.

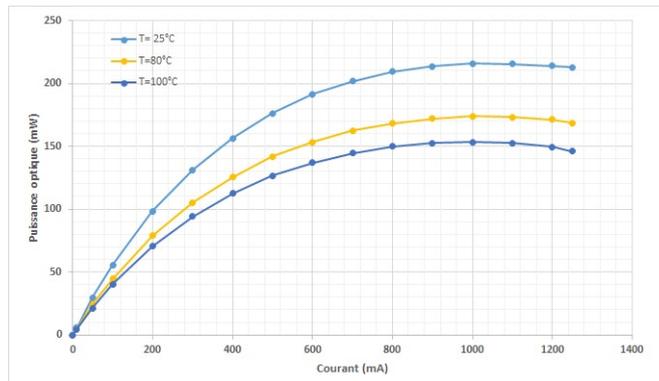


FIGURE 2.20 – Variation de la puissance optique de la LED

Enfin, la mesure de la tension (V-I) permet également d'obtenir une information sur la résistance série du Laser et après un bilan de puissance de calculer la puissance dissipée. Un exemple de courbe de V-I mesurée à des différentes températures pour une LED est donné sur la Figure 2.21.

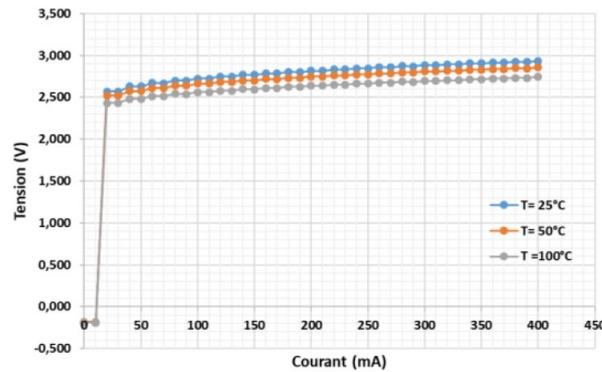


FIGURE 2.21 – Variation de la tension de la LED

Dans ce cas, le spectromètre a été calibré par un banc de caractérisation du laboratoire LCEM du CEA LETI avec une sphère intégrante. De plus, des LEDs référentes sont utilisées également pour déterminer les erreurs de mesure liées à la répétabilité et la reproductibilité. Pour cela, deux opérateurs du CEA ont réalisé des mesures successives sur cet élément et après traitement statistique par la méthode de l'analyse de la variance, les erreurs liées aux incertitudes de mesure ont été déterminées. Les caractéristiques électro-optiques des LEDs ainsi que les incertitudes de mesures sont présentées dans cette section, voir la Figure 2.22. Les incertitudes de mesure de la tension de LED sont inférieures à $\pm 1\%$, celles de la puissance optique est environ de $\pm 2\%$.

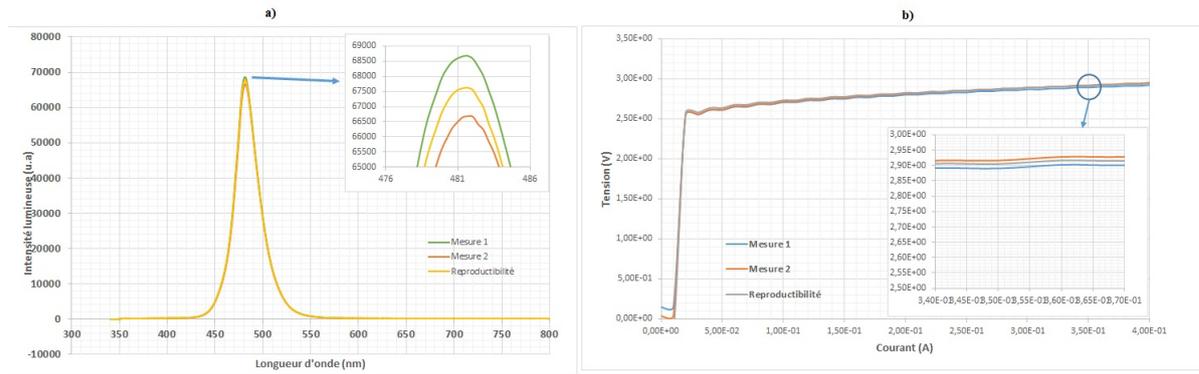


FIGURE 2.22 – La répétabilité et reproductibilité d'une LED en référence a) Optique ; b) Électrique

Le fait que ces caractéristiques soient affectées par les modifications de température, nous a conduit à proposer la mise en place d'un facteur d'influence de la température dans l'étude de modélisation de dégradation dans les chapitres suivants.

2.3.2 Caractérisation des diodes laser

2.3.2.1 Préparation d'échantillon des diodes laser

Contrairement à ce qui a été vu dans le cas de la LED, les puces choisies pour réaliser les tests sur les diodes laser (diode laser de type DFB - nos sous-objets de recherche) ne contiennent pas une, mais plusieurs structures de diodes, elles-mêmes représentées plusieurs fois. La diode laser DFB est représentée 5 fois sur la puce. Aussi, un packaging plus adapté a été choisi, notamment concernant le boîtier-ici, un boîtier DIL, nous permettant de connecter l'ensemble des diodes laser indépendamment les unes des autres, et d'utiliser un socket de type ZIF (Zero Insertion Force) afin de faciliter les manipulations, voir la Figure 2.23.

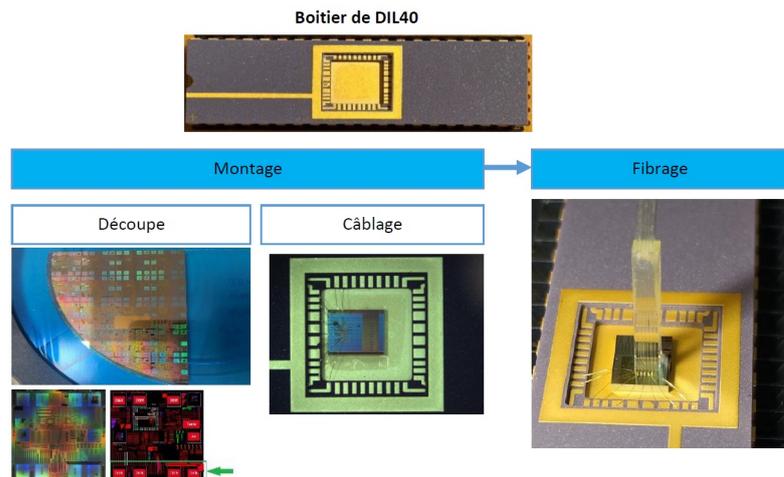


FIGURE 2.23 – Assemblage des LDs en boîtier DIL40

Une fois le câblage réalisé, une opération de fibrage est effectuée à l'aide d'un réseau de 5 fibres, permettant d'accéder aux informations optiques de chacune des diodes, voir la Figure 2.23.

De la même façon que pour la LED, la phase de préparation d'échantillon des LDs nous permet d'assembler des puces de diode laser en boîtier pour la caractérisation électro-optique et le test accéléré. Ces diodes laser viennent d'un premier wafer de la diode laser au CEA LETI.

Enfin, à la différence des LED, deux cartes différentes ont été conçues pour la caractérisation et le vieillissement, voir la Figure 2.24.

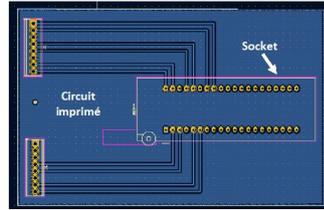


FIGURE 2.24 – Module de caractérisation et test accéléré des LDs

D'après la Figure 2.24, ce module consiste en un socket soudé sur une carte du circuit imprimé. L'objectif de ces modules est d'alimenter des LDs soit en même temps, soit individuellement.

2.3.2.2 Banc de mesure des diodes laser

Le banc de mesure des diodes laser est construit de la même façon que celui de la LED, voir la Figure 2.19. Cependant, dans le cas de la diode laser, un module (APEX) est remplacé par le spectromètre (USB2000+) pour mesurer la puissance optique de chaque diode laser.

La diode laser est donc placée dans une enceinte climatique pendant la caractérisation et le test accéléré. La puissance optique est mesurée grâce à la fibre optique en lien avec le module APEX. Afin d'assurer une bonne dissipation thermique pendant la caractérisation, un module Peltier est utilisé.

La Figure 2.25 présente la puissance optique d'une diode laser en fonction du courant d'alimentation à quatre températures : 25°C, 30°C, 40°C, 55°C. Nous avons remarqué pendant les tests que la courbe P-I n'est pas présentée comme la théorie (voir la Figure 2.10). En effet, ces diodes laser sont d'un des premiers wafers de diodes laser réalisés au CEA Leti – il s'agit donc de prototypes, ceci pouvant avoir un impact sur certaines caractéristiques. Le processus de fabrication est en cours de développement. Il est donc nécessaire de mettre en place une étape d'analyse de cause afin d'améliorer le processus de fabrication.

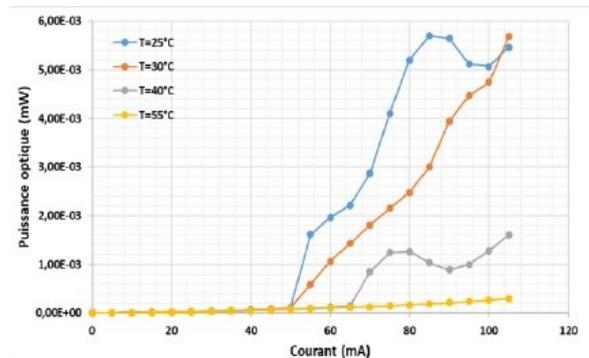


FIGURE 2.25 – Variation de la puissance optique d'une diode laser

En outre, la Figure 2.25 montre également que la puissance optique de la diode laser dimi-

nue avec l'augmentation de la température ambiante. Donc, il existe une dépendance entre la puissance optique et la température ambiante.

Ensuite, la mesure de la tension (V-I) permet également d'obtenir une information sur la résistance série de la diode laser. La variation de résistance série avant et après le test accéléré nous permet de situer la localisation de défaut dans l'élément. Un exemple de courbe de V-I mesurée à trois températures (25°C, 40°C, 55°C) pour une DFB laser sur silicium est donné sur la Figure 2.26. Puis, la résistance en série moyenne est obtenue, $R_s = 3,77\Omega$.

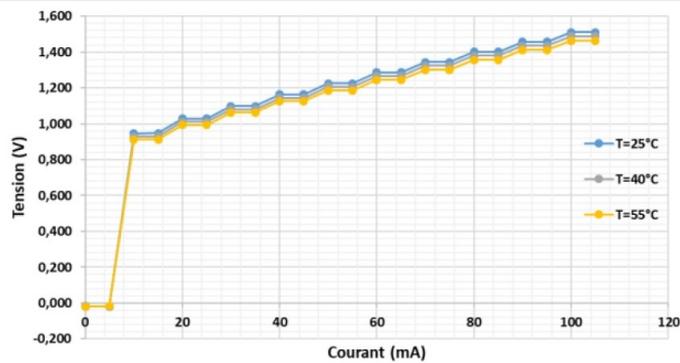


FIGURE 2.26 – Variation de la tension d'une diode laser

Les matériels sont par ailleurs vérifiés régulièrement au cours des expérimentations grâce à un élément référent. Les incertitudes de mesure de la tension de LD sont inférieures à $\pm 1\%$, celles de la puissance optique est de $\pm 2\%$, voir la Figure 2.27. Ces valeurs ont été obtenues préalablement grâce à une étape de calibration.

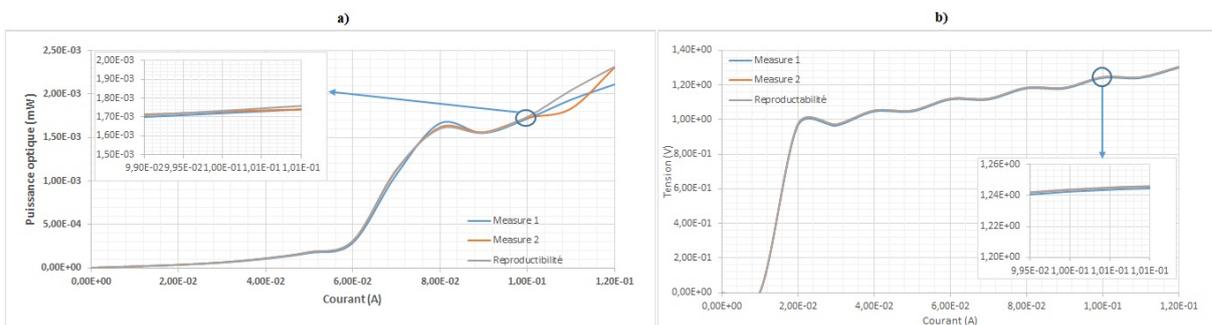


FIGURE 2.27 – La répétabilité et reproductibilité d'une LD en référence a) Optique ; b) Électrique

En effet, toutes les caractéristiques des LDs sont affectées par les changements de température. Elles comprennent la puissance optique, la tension. Ces résultats nous permettent de mettre en place le facteur d'influence de la température dans l'étude de modélisation de dégradation de l'élément dans les chapitres suivants.

2.3.3 Caractérisation des photodiodes

2.3.3.1 Préparation d'échantillon des photodiodes

Pour rappel, le sous-objet de recherche en photodiode est une photodiode de Germanium (Ge) intégrée sur Si qui a été développée par le CEA LETI.

La Figure 2.28 montre l'assemblage des photodiodes en boîtier LCC44.

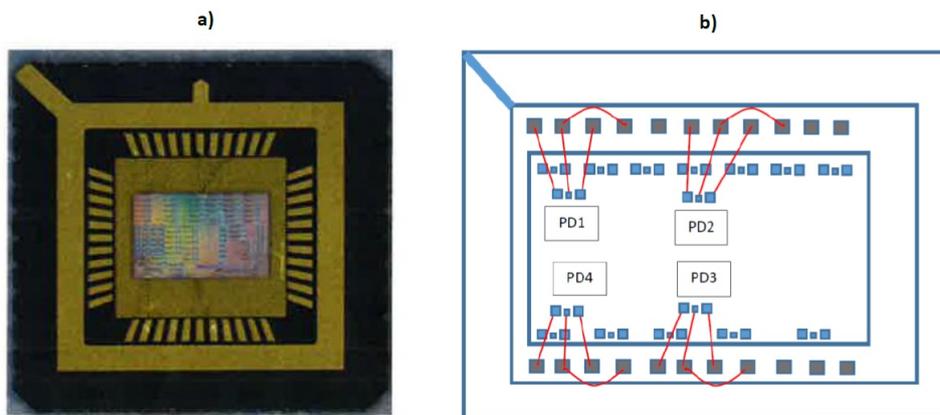


FIGURE 2.28 – Représentation d'assemblage des photodiodes ; a) puces en boîtier LCC 44 ; b) Plan de câblage

D'après la Figure 2.28, une puce consiste en 4 photodiodes à caractériser. Puis, afin de mesurer les caractéristiques et mettre en place des tests accélérés, un module de caractérisation est développé pour ces photodiodes, voir la Figure 2.29.

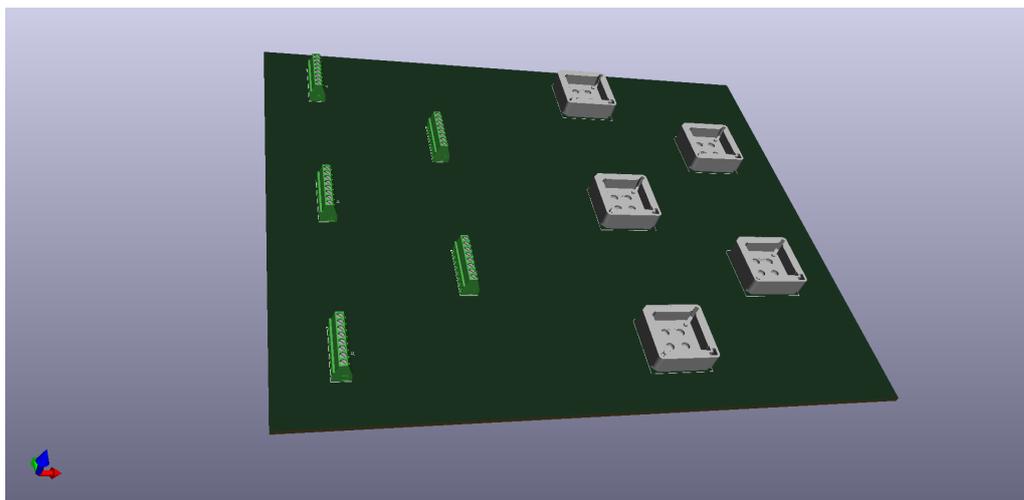


FIGURE 2.29 – Module de caractérisation et test accéléré des PDs

Ce module consiste en des sockets soudés sur une carte du circuit imprimé. L'objectif du module est de réaliser les caractérisations individuelles des photodiodes et de mettre toutes les photodiodes en test accéléré.

2.3.3.2 Banc de mesure des photodiodes

Comme déjà souligné, le courant d'obscurité est un paramètre important dans la modélisation des dégradations de la photodiode. Le banc de caractérisation de photodiodes est donc basé sur des mesures du courant d'obscurité. Le principe de base de mesure de la variation du courant d'obscurité en fonction du temps et sous stress (température) est représenté par la Fig. 2.30. De plus, ce banc de mesure permet de mesurer ainsi la tension de claquage. Les résultats sur la tension de claquage nous permettent de marquer cette photodiode dans le cas d'un test accéléré sur la tension inverse.

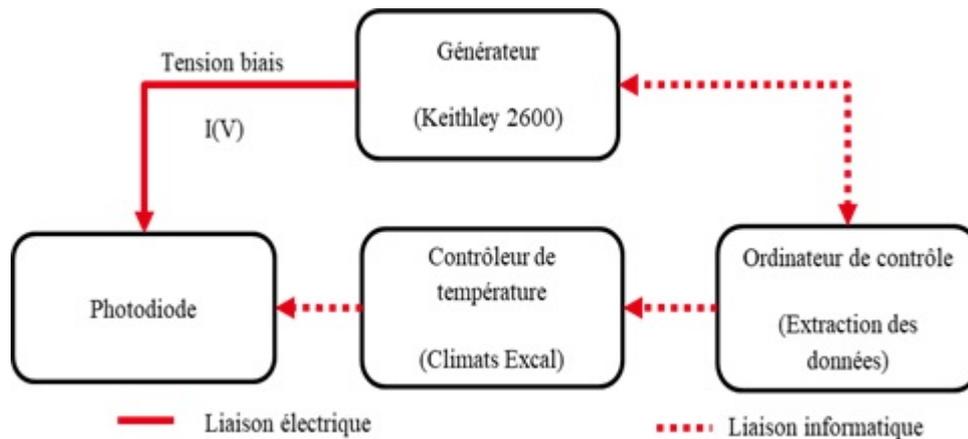


FIGURE 2.30 – Schéma de principe du banc de mesure pour le courant noir de la photodiode

La photodiode est placée dans une enceinte climatique (CLIMATS Excal). La plage de température retenue pour l'étude est $[25^{\circ}\text{C}; 175^{\circ}\text{C}]$. Le support de la photodiode est fixé dans une enceinte climatique disposant des traversées électriques adéquates pour interfacier l'élément avec l'instrumentation. Le matériel utilisé est constitué :

- D'un générateur source mètre KEITHLEY 2600 connecté par un bus IEEE à l'unité de l'ordinateur qui pilote le banc. Cet appareil est utilisé comme source de tension inverse, que nous appliquons à la photodiode, et nous permet de mesurer le photocourant lors de la caractérisation du courant d'obscurité.
- D'une enceinte climatique (CLIMATS Excal) utilisée pour la régulation thermique lors des mesures.

Afin de mettre en place le test accéléré des photodiodes avec une valeur de la tension nominale fixée à -5 V , il est nécessaire de réaliser une phase d'analyse à priori du composant qui nous permet de déterminer la limite de chaque stress applicable pendant l'expérimentation. C'est-à-dire le niveau de stress limite auquel la photodiode présente une défaillance catastrophique. Pour réaliser ce test de robustesse, une photodiode a été placée en chambre climatique et soumise à une série de stress croissants en surveillant l'évolution de son courant d'obscurité.

Une mesure du courant d'obscurité-tension est présentée en Figure 2.31 pour trois valeurs de température : 50°C , 100°C , 150°C . Comme on peut le remarquer, le courant augmente avec la valeur absolue de la tension, mais également avec la température. La modélisation de détérioration du courant d'obscurité selon la température de stress est détaillée dans le chapitre 5.

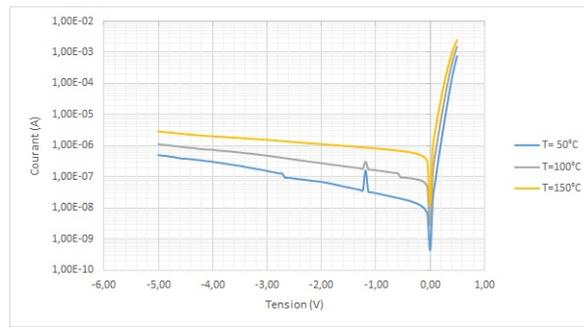


FIGURE 2.31 – Caractéristique I-V en obscurité d'une photodiode en température

Ensuite, la caractéristique I-V d'une photodiode, tracée entre 0 et -20 V est représentée sur la Figure 2.32. En effet, la tension de plaquage dépend aussi de la température.

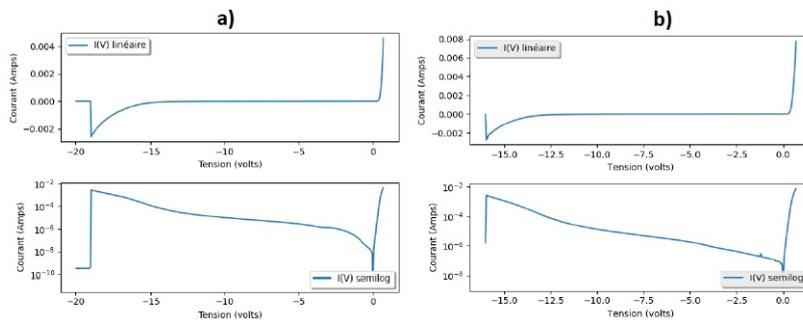


FIGURE 2.32 – Caractéristique courant-tension inverse d'une photodiode montrant le phénomène de claquage; a) à 25°C ; b) à 85°C

De manière similaire à la LED et la diode laser, un test de répétabilité a été effectué sur la mesure du courant d'obscurité. Lors de ces tests, l'incertitude de la mesure liée à sa répétition a été évaluée à 1%, voir la Figure 2.33.

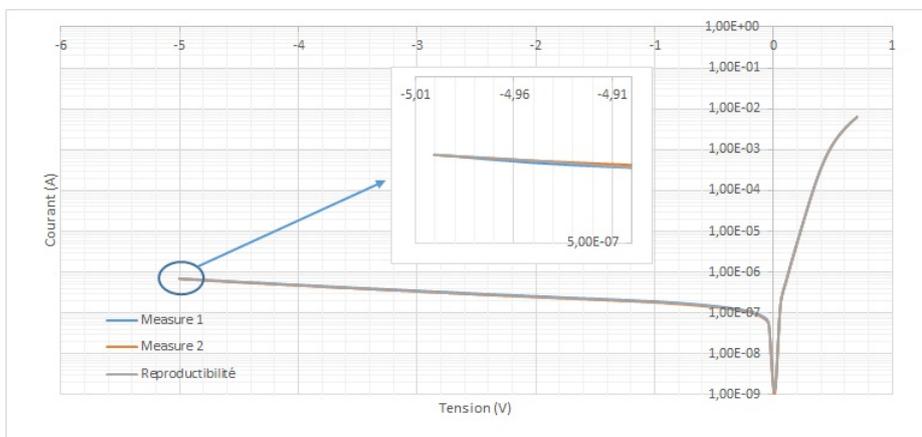


FIGURE 2.33 – La répétabilité et reproductibilité d'une PD de référence

2.3.4 Banc de mesure thermique à l'aide de la caméra infrarouge

Comme évoqué dans les sections précédentes, les performances des différents éléments étudiés (LED, LD et PD) sont sensibles à la température. Cette section consiste donc en la présentation de la méthode de mesure de la température en surface des éléments/composants, à l'aide d'une caméra infrarouge, qui prend l'image de la surface de l'élément/composant. La Figure 2.34 présente le banc de mesure thermique pour les composants optoélectroniques.

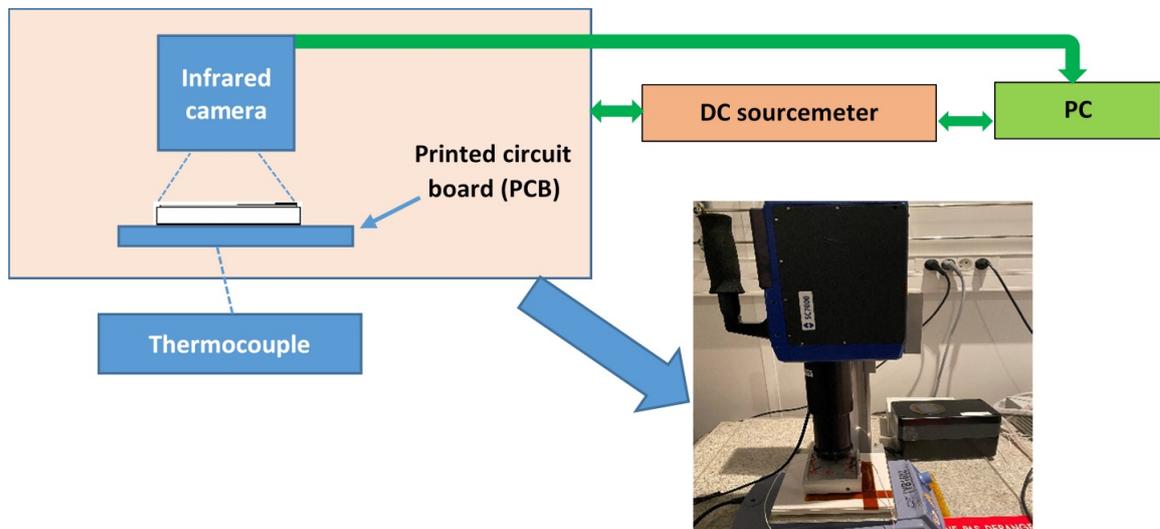


FIGURE 2.34 – Caractérisation thermique à l'aide de la caméra thermique

Cependant, ces éléments (par exemple, le GaN, le substrat, les fils de liaison puces/boîtier) ont des émissivités différentes, et chacun d'entre eux a sa réponse particulière à l'infrarouge. Ainsi, à une température donnée, tous les matériaux sont vus différemment par la caméra. Par conséquent, la caméra doit être calibrée avant d'être utilisée pour estimer avec précision la valeur de la température de l'élément/composant.

Par exemple, le principe de calibration de la caméra dans le cas d'une LED est présenté sur la Figure 2.35. Plus précisément, nous plaçons la LED (non alimentée) à trois températures T_1 , T_2 et T_3 ($T_1 < T_3 < T_2$), puis, les images sont mesurées en unité arbitraire (DL) à ces trois niveaux de température (i.e., $Im_1(i, j)$, $Im_2(i, j)$ et $Im_3(i, j)$ qui sont les valeurs fournies par le pixel (i, j) aux températures T_1 , T_2 et T_3). L'image donnée par le détecteur placé devant un élément n'est donc pas uniforme pour tous les pixels en raison de la dispersion technologique et d'une présence optique qui induit des aberrations. Ainsi, il est nécessaire de ramener la pente et le décalage de tous les pixels aux valeurs moyennes. Cette correction en trois points permet d'uniformiser la réponse des pixels. Après correction sur la plage $23^\circ C - 90^\circ C$, tous les pixels obtenus fournissent le même niveau d'intensité.

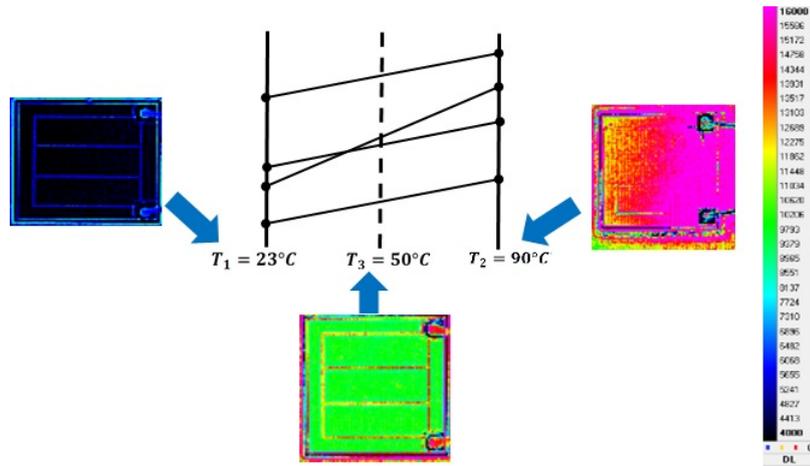


FIGURE 2.35 – Représentation de la valeur du pixel en fonction de la température

Après avoir calibré la caméra, la température des éléments est calculée et analysée à partir de l'image thermique à l'aide d'un outil logiciel propriétaire (Flir System Inc.). Lors de l'observation d'une scène, une image ($Im(i, j)$) en unités (DL) est enregistrée. La température de la scène observée par le pixel (i, j) de la matrice est donnée par [49] :

$$T_{frame}(i, j) = T_1 + (T_2 - T_1) \left[\frac{Im(i, j) - Im_1(i, j)}{Im_2(i, j) - Im_1(i, j)} \right] \quad (2.7)$$

La Figure. 2.36 montre la température de jonction d'une LED avant (Figure 2.36.a) et après (Figure 2.36.b) l'application du courant direct (350 mA).

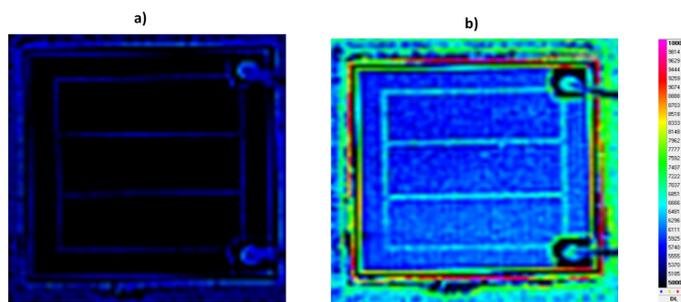


FIGURE 2.36 – Analyse thermique d'une LED : a) sans courant direct et b) avec courant direct à 350mA

Ensuite, le Tableau 2.1 rapporte les résultats pour les 19 LED disponibles dans notre expérimentation en utilisant l'Equation (2.7). Par conséquent, sur la base des résultats obtenus, il est montré une augmentation de la température de jonction avec une moyenne de 10,14 degrés et un écart type de 1,14 degré avec un courant alimenté de 350 mA.

TABLE 2.1 – Augmentation de la température de la jonction de LED due au courant alimenté

Élément	ΔT [$^{\circ}C$]	Élément	ΔT [$^{\circ}C$]
1	12.0	11	8.9
2	10.9	12	11.3
3	8.3	13	8.4
4	11.0	14	8.5
5	12.3	15	8.8
6	10.7	16	7.6
7	11.5	17	12.0
8	11.0	18	10.5
9	9.6	19	9.0
10	10.4		

Dans cette mesure, en utilisant un outil logiciel propriétaire et son protocole (Flir System Inc.), les incertitudes de mesure de la température des éléments/composants sont dans l'intervalle de $0,1^{\circ}C$ au $1,5^{\circ}C$, pour l'élément/composant non alimenté et avec un courant d'alimentation, respectivement.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les structures des éléments/composants optoélectroniques étudiés au cours de cette thèse. Ce sont les LEDs, LD, PDs et le composant complexe-véhicule de test qui n'a pas été cependant développé (situation COVID, difficulté de fabrication de certains éléments). Ce constat nous amené à nous focaliser sur des éléments qui faisaient parti du véhicule de test (LED, LD, PD) et avoir retenu en ce sens les éléments : LED Cree EZ1000, diode laser DFB, photodiode comme sous-objet de recherche. Puis, les différentes caractérisations de ces éléments comme électro-optiques et thermiques mises en place, ainsi que les moyens de caractérisation associés sont décrits. Il en ressort que :

- Les bancs de caractérisation des éléments ont été présentés principalement pour la caractérisation des photodiodes, des diodes laser DFB et LEDs. 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 tests accélérés. Ainsi, cette démarche permet d'éviter les montages et démontages successifs des éléments, garantissant une standardisation et une bonne répétabilité/reproductibilité des mesures.
- Les mesures réalisées sur les diodes laser DFB, LEDs Cree EZ1000 sont : caractéristiques P-V-I, I-V. Le courant nominal est fixé à 100 mA et 350 mA ce qui correspond à une puissance optique d'environ 5.5nW et 140mW à $25^{\circ}C$ pour la diode laser et LED, respectivement. La dépendance en température de la puissance optique du Laser et LED a également été déterminée.
- Les photodiodes Ge ont été caractérisé sous obscurité (courant, tension, température). Le courant d'obscurité de ces photodiodes est de $7.21 * 10^{-7}A$ à $25^{\circ}C$ et $-5V$. Les marges opérationnelles de fonctionnement ont été identifiées. Les températures retenues pour les tests accélérés sont entre l'intervalle de $25^{\circ}C$ et $125^{\circ}C$. La tension de plaquage de ces photodiodes est déterminée à $-19V$ à $25^{\circ}C$.

Par conséquent, les caractérisations de performance pour chaque élément sont identifiées, ce sont la puissance optique pour les émetteurs (LED, LD) et le courant d'obscurité pour les récepteurs (PD). En effet, toutes les caractéristiques des éléments sont affectées par les changements de température. Ces résultats nous permettent de mettre en place le facteur d'influence de la température dans l'étude de modélisation de dégradation de l'élément dans les chapitres suivants. En outre, les données obtenues à l'aide de ces caractérisations sont utilisées au chapitre 3 pour réduire les modèles de dégradations utilisables, les mesures du test accéléré dans le chapitre 4, 5, et les niveaux de contraintes au plan de test accéléré dans le chapitre 6.

Chapitre 3

État de l'art sur l'évaluation de la fiabilité et l'optimisation d'un plan de test accéléré pour un composant optoélectronique

Sommaire

3.1	Introduction	61
3.2	Modélisation du processus de dégradation d'un élément optoélectronique	62
3.2.1	Modélisation de la dégradation	62
3.2.2	Modèles de dégradation existants	64
3.3	Évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique avec facteurs d'influence multiples	69
3.3.1	Fiabilité d'un composant optoélectronique	69
3.3.2	Interaction de dégradation entre éléments	69
3.4	Optimisation d'un plan de test	72
3.4.1	Critères d'optimisation	72
3.4.2	Formulation du problème d'optimisation	74
3.5	Conclusion	76

3.1 Introduction

Dans le chapitre 1, trois verrous scientifiques ont été proposés. Le chapitre 2 quant à lui a présenté les caractéristiques d'éléments optoélectroniques tels que LED, LD, PD et un composant dit "complexe". Ainsi, le chapitre 2 a identifié les facteurs de stress importants, qui influencent la dégradation d'un composant optoélectronique complexe. Sur cette base, le chapitre 3 a pour objet de faire un état de l'art pour crédibiliser les trois verrous scientifiques relatifs à l'optimisation de plan de test accéléré pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques.

En ce sens, le chapitre 3 aborde tout d'abord, dans la section 3.2, la modélisation de dégradation et des processus de dégradation existants afin de modéliser la dégradation des éléments optoélectroniques étudiés (LED, LD, PD). Plusieurs modèles de dégradation des éléments avec

des facteurs d'influences (facteur de stress) sont analysés. Les critères de sélection des modèles de dégradation sont ensuite présentés. Un composant complexe est introduit comme une intégration d'élément en interaction. Cette relation d'intégration met en évidence clairement qu'un dysfonctionnement de l'élément peut impacter le fonctionnement global du composant. Cela amène à justifier une première question liée à "Comment modéliser le processus de dégradation d'élément en prenant en compte des facteurs d'influences?".

De plus, sur une vision "système" du composant, il existe des interactions entre éléments. Une étude bibliographique sur des modèles de dégradation en considérant l'interdépendance fait l'objet de la section 3.3. Cela permet de mettre en évidence une seconde question "Comment calculer la fiabilité d'un composant en prenant en compte l'interaction entre éléments?".

Cette notion de complexité est enfin référée à la qualité/quantité des tests à faire pour évaluer expérimentalement la fiabilité du composant. La section 3.4 est consacrée à une présentation de l'état de l'art sur la prise de décision et l'optimisation d'un plan de test. Dans cette section, plusieurs critères d'optimisation d'un plan de test et de la problématique d'optimisation sont présentés et analysés, mais pour un élément simple. Dans le contexte de cette thèse, ceci conduit à isoler une troisième question à attaquer : "Comment optimiser les plans de test accéléré tout en assurant la bonne précision sur le calcul de fiabilité?" pour des composants avec des dépendances.

Enfin, des conclusions sont données dans la section 3.5.

3.2 Modélisation du processus de dégradation d'un élément optoélectronique

La conception de composants à haute fiabilité exige généralement que les éléments individuels de ces composants aient une fiabilité extrêmement élevée, même après de longues périodes de temps. Il est fréquent qu'aucune défaillance ne se produise au cours des tests de fiabilité. Il est donc difficile d'évaluer la fiabilité avec les tests de durée de vie traditionnels qui n'enregistrent que le temps de défaillance. Pour certains éléments, la dégradation peut être mesurée. Une relation entre la défaillance de l'élément et le niveau de dégradation permet d'utiliser des modèles et des données de dégradation pour faire des déductions et des prédictions sur le temps de défaillance à partir de la dégradation. Par conséquent, nous présentons dans les sous sections suivantes, la modélisation de dégradation et des processus de dégradation existants afin de modéliser la dégradation des éléments optoélectroniques étudiés.

3.2.1 Modélisation de la dégradation

La dégradation est la détérioration progressive des caractéristiques d'un élément ou d'un composant qui peut altérer son aptitude à fonctionner dans les limites des critères d'acceptabilité et qui est engendrée par les conditions d'utilisation [50]. En général, un élément qui est soumis au phénomène de dégradation peut ne jamais perdre sa fonction principale même si son utilisation n'est pas optimale, ceci se traduit par la notion d'état dégradé. En ce sens, la dégradation peut être définie comme la détérioration d'une performance ou une caractéristique de l'élément [37].

L'indicateur de dégradation, $X(t)$, pour des éléments optoélectroniques comme ceux cités dans le chapitre 2, peut être donc identifié comme suit :

- LED [44] : $X(t) = \phi(t) = \frac{P_{opt}(t)}{P_{opt}(0)}$, où $\phi(t)$: moyenne normalisée de l'intensité lumineuse au temps t , $P_{opt}(t)$ est la puissance optique de la LED au temps t ;
- LD [28] : $X(t) = 1 - \frac{P_{opt}(t)}{P_{opt}(0)}$ ou $X(t) = \Delta I_{th}(t)$, où $\Delta I_{th}(t)$ est la détérioration du courant seuil de LD ;

— PD [28] : $X(t) = \Delta I_d(t)$, où $\Delta I_d(t)$ est la détérioration du courant d'obscurité.

En outre, l'état dégradé peut devenir critique pour l'élément lorsque sa dégradation dépasse un seuil de dégradation prédéfini, voir Figure 3.1. En ce sens, l'élément est dit défaillant.

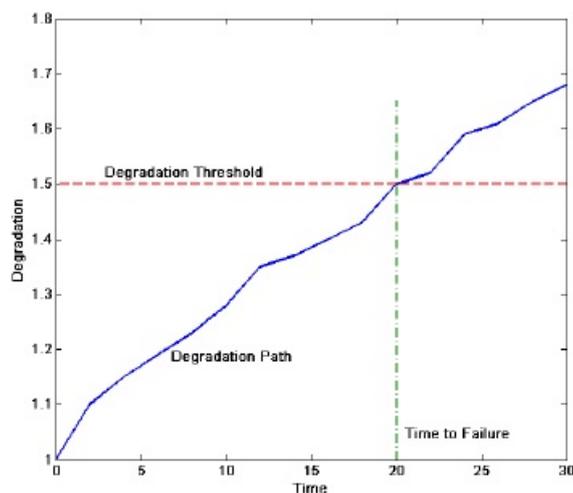


FIGURE 3.1 – Schéma d'une dégradation avec le seuil de défaillance

Cependant, dans des conditions d'utilisation normales, la dégradation des éléments peut être lente, ce qui rend difficile la collecte des données de la dégradation et la description du processus de dégradation. Pour cette raison, les tests de dégradation accélérée (ADT) sont utilisés dans l'analyse de fiabilité, et ce type de tests est appliqué en augmentant le taux de dégradation, μ par les facteurs d'influence. Les facteurs d'influence sont des facteurs de stress (température, tension, courant, etc.) dans le test d'accélération et des dépendances.

Les facteurs de stress sont modélisés sur le taux de dégradation par les modèles d'accélération tels que : loi de Black, loi d'Arrhenius, loi de puissance inverse, etc. [36]. En général, la dégradation des composants est causée par des phénomènes liés à l'échelle atomique et moléculaire par une barrière d'énergie, notée par **l'énergie d'activation**, E_a , en eV, voir la Figure 3.2.

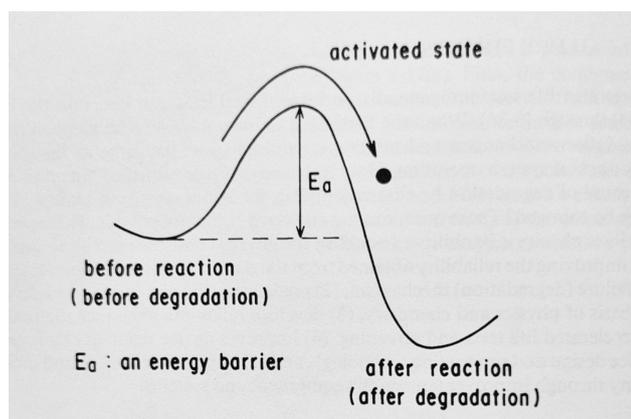


FIGURE 3.2 – La barrière d'énergie [16]

En référence aux caractéristiques des éléments présentés dans le chapitre 2, les performances des éléments sont sensibles à la température. Donc, selon le loi d'Arrhenius, le facteur de stress

en température est modélisé dans le modèle d'accélération comme suit :

$$\mu = A.exp\left(-\frac{E_a}{k_B.T}\right) \quad (3.1)$$

où, h est la constante de Planck, k_B est la constante de Boltzman.

De plus, les autres facteurs d'influence de type dépendance, par exemple, l'effet de l'auto-chauffement sur la LED cité dans [51, 52], ne sont généralement pas pris en compte dans la modélisation de processus de dégradation des éléments. Or, cela amène à justifier une première question posée dans la thèse et liée à "*Comment modéliser le processus de dégradation d'éléments en prenant en compte des facteurs d'influence ?*".

L'étude de la dégradation au cours des tests de dégradation accélérée permet de déterminer l'instant de défaillance. Dans ce cas, la dégradation est modélisée par un modèle de dégradation.

3.2.2 Modèles de dégradation existants

Dans les applications réelles, la modélisation de dégradation du composant basée sur un modèle physique est difficile à utiliser d'une dégradation subtile au niveau moléculaire [16]. Donc, deux types de modèle de dégradation sont principalement utilisés : le modèle de dégradation déterministe et le modèle de dégradation stochastique [37].

a) Modèles de dégradation déterministes

Dans un test de dégradation accéléré, les mesures de la performance sont obtenues au fur et à mesure qu'elle se dégrade dans le temps pour un échantillon aléatoire d'unités de test. Ainsi, l'approche générale consiste à modéliser les dégradations des unités individuelles en utilisant la même forme fonctionnelle et les différences entre les unités individuelles en utilisant des effets aléatoires. Un modèle général à effets aléatoires pour décrire les dégradations est donné par Lu et Meeker [53] :

$$y_{ij} = X(t_{ij}, \varphi, \theta_i) + \epsilon_{ij} \quad (3.2)$$

où $X(t_{ij})$ est la dégradation réelle de l'élément i à un moment prédéfini t_{ij} ; φ est un vecteur d'effets fixes qui reste constant pour chaque élément; θ_i est un vecteur d'effets aléatoires qui varient en fonction des diverses propriétés des matériaux des différents composants; les ϵ_{ij} sont l'erreur aléatoire associée du i^{eme} élément au temps t_{ij} . Les ϵ_{ij} ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m_i$) ont supposés être indépendamment et identiquement distribués (iid) avec une moyenne à zéro et une variance inconnue σ_ϵ^2 .

Pour intégrer des facteurs de stress dans le modèle de dégradation, un exemple simple est présenté ci-dessous. Supposons que la dégradation d'un composant sous une contrainte S puisse être écrite comme suit :

$$X(t, S) = X_0 + \theta_1 t + \epsilon \quad (3.3)$$

où X_0 est le vecteur du paramètre fixe identique pour toutes les unités; θ_1 est un vecteur de paramètre aléatoire; et ϵ est une erreur de mesure indépendante du temps t . Le temps de défaillance de l'élément peut être défini, quand la dégradation a dépassé un seuil critique D_f , comme suit :

$$t_S = \frac{D_f - X_0}{\theta_1} \quad (3.4)$$

Selon le modèle accéléré, le temps de défaillance de l'élément sous un niveau de contrainte S_0 peut être défini comme suit :

$$t_{S_0} = \frac{t_S}{AF(S_0)} = \frac{D_f - X_0}{\theta_1 \times AF(S)} \quad (3.5)$$

où $AF(S_0)$ est le facteur d'accélération, si la variable de contrainte est la température et que le type de modèle accéléré est la relation d'Arrhenius, donc, $AF(T) = \exp\left(\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)$

Le modèle déterministe est largement utilisé afin de simuler la dégradation pour des éléments optoélectroniques car il est un modèle simplifié pour les données de dégradation et utilisé dans un environnement homogène [37]. Les modèles suivants sont couramment utilisés :

- 1) LED - Le modèle de dégradation de la puissance optique est défini par [44] :

$$X(t) = X_0 \times e^{(-\eta \cdot t)} \quad (3.6)$$

où,

- X_0 : constante initiale projetée et dérivée de l'ajustement de la courbe des moindres carrés ;
 - η : constante de vitesse de décroissance dérivée de l'ajustement de la courbe des moindres carrés ; $\eta = \alpha \times \exp\left(-\frac{\beta}{T_k}\right)$; où α est le facteur préexponentiel, $\beta = \frac{E_a}{k_B}$.
- 2) Photodiode - En général, un modèle linéaire doit être utilisé [28]

$$X(t) = A \times \exp\left[-\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right] \times t \quad (3.7)$$

où,

- A est une constante empirique,
- t est le temps.

- 3) Laser diode - il est dérivé des modèles décrits par les équations (3.8) et (3.9) [28] :

$$X(t) = X_0 \times A \times \exp\left[-\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right] \times t^m \quad (3.8)$$

$$X(t) = X_0 \times B \times \exp\left[-\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right] \times (\alpha + \beta t) \quad (3.9)$$

où,

- A, B, α , β sont des constantes empiriques,
- m est un exposant (également trouvé empiriquement),
- t est le temps.

Bien que les modèles déterministes soient faciles à établir comme mentionné ci-dessus, ils ne permettent pas de considérer des caractéristiques dynamiques et aléatoires du processus de dégradation. Le modèle stochastique est un modèle alternatif qui décrit la dégradation dynamique.

b) Modèles de dégradation stochastiques

La dégradation dynamique peut souvent être bien décrite par certains processus stochastiques. Parmi les processus stochastiques, deux processus de dégradation sont principalement utilisés : le processus gamma et le processus de Wiener [37].

Processus gamma :

Le processus gamma [54, 55] est un processus à accroissement indépendant qui décrit des trajectoires de dégradation monotone.

Le processus $X(t)$ (avec $t > 0$) est un processus gamma $Ga(\alpha, \beta)$ stationnaire si :

- $X(0) = 0$,
- X est un processus à accroissement indépendant,
- quelque soient $t > 0$ et $\Delta t > 0$, la loi de l'accroissement $X(t + \Delta t) - X(t)$ est une loi gamma $Ga(\alpha(t + \Delta t) - \alpha(t), \beta)$ de densité :

$$f(x) = \frac{\beta^{-\alpha\Delta t}}{\Gamma(\alpha\Delta t)} x^{\alpha\Delta t-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \text{ pour } t > 0 \quad (3.10)$$

où $\alpha(t + \Delta t) - \alpha(t)$ est le paramètre de forme et β est le paramètre de la distribution gamma. La fonction Γ est définie par :

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1} e^{-x} dx \quad (3.11)$$

et $\alpha(t)$ est une fonction croissante, continue à droite en fonction du temps t , avec $\alpha(0) = 0$. Lorsque $\alpha(t)$ est une fonction linéaire du temps t , le processus gamma est stationnaire, sinon il est non stationnaire. La Figure 3.3 présente un processus de dégradation modélisé par le processus gamma.

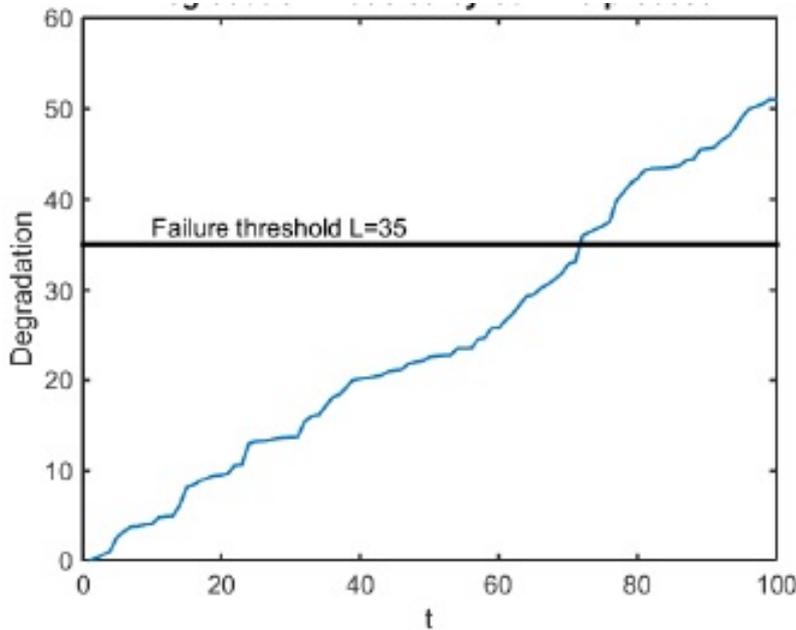


FIGURE 3.3 – Un processus de dégradation modélisé par le processus gamma

Pour intégrer des modèles accélérés, le choix de la forme de la fonction accélérée devrait dépendre de la façon dont les paramètres du modèle influent sur le facteur d'accélération. Il est commun de considérer β comme constant, et la fonction $\alpha(\bullet)$ est en fonction d'accélération [56]. Pour simplifier le problème, Tseng, et al. [56] ont proposé $\Delta\alpha(t) = \mu\Delta t$, ou $\mu(T) = \alpha \cdot \exp(-\frac{E_a}{k_B \cdot T})$ pour la relation d'Arrhenius.

Le processus de Wiener

Le processus de Wiener [57, 58, 59] est également appelé processus gaussien de mouvement brownien. En général, un processus stochastique $B(t)$ (avec $t > 0$) est appelé processus de Wiener s'il possède les propriétés suivantes :

- $B(0) = 0$,
- $B(t)$ (avec $t \geq 0$) est un processus stochastique à accroissement indépendant à trajectoires continues ;
- quelque soit $t > 0$ et $\Delta t > 0$, la loi de l'accroissement $B(t + \Delta t) - B(t)$ est une loi normale $N(0, \Delta t)$.

La fonction de densité de probabilité de la distribution normale $N(0, t)$ est donnée par :

$$f(x|0, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{2t}\right) \quad (3.12)$$

Puis, le processus de dégradation du composant au temps t peut être exprimé comme :

$$X(t) = \mu t + \sigma B(t) \quad (3.13)$$

où μ et σ sont les deux paramètres caractérisant le processus de dégradation du composant de sorte que l'incrément entre deux temps successifs $t + \Delta t$ et t . Le niveau de dégradation des composants, $X(t + \Delta t) - X(t)$, suit une distribution normale avec une moyenne μ une variance $\sigma^2 t$. La Figure 3.4 présente un processus de dégradation modélisé par le processus de Wiener.

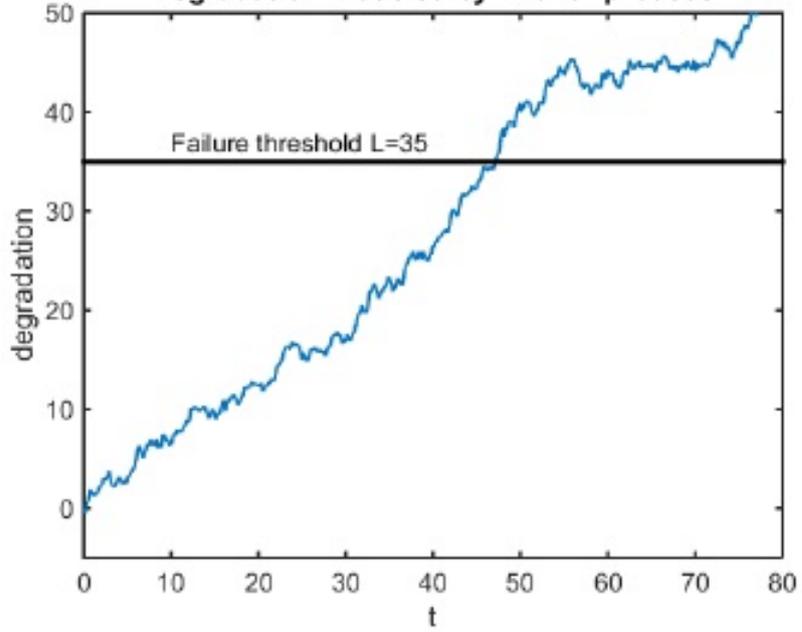


FIGURE 3.4 – Un processus de dégradation modélisé par le processus de Wiener

Pour intégrer les modèles accélérés, le choix de la forme de la fonction devrait dépendre de la façon dont les paramètres du modèle sont impactés par les facteurs de stress. Il est courant de considérer σ comme constant, et le paramètre de dérivé μ est considéré fonction de l'accélération :

— La relation d'Arrhenius : $\mu(T) = \alpha \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right)$

Pour la modélisation de dégradation des éléments optoélectronique :

— Il est largement considéré que les LEDs se dégradent exponentiellement avec le temps lorsqu'ils ont été vieillis dans des conditions de haute température [60, 61, 62].

$$X(t) = X_o \times e^{(-\eta \cdot t)} + \sigma \cdot B(t) \quad (3.14)$$

où σ est le paramètre de diffusion, $B(t)$ est un mouvement brownien standard.

— Pour les diodes laser [63, 64] :

$$X(t) = X_o + A \times \exp\left[-\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right] \times t + \sigma \cdot B(t) \quad (3.15)$$

où, $X(t)$ est une mesure de dégradation cumulative avec une valeur initiale X_o , $X(t) = 1 - \frac{P_{opt}(t)}{P_{opt}(0)}$, σ est le paramètre de diffusion, $B(t)$ est un mouvement brownien standard.

Par conséquent, le modèle stochastique est une solution alternative au modèle déterministe, ce qui permet de saisir les caractéristiques dynamiques et aléatoires du processus de dégradation. La nature aléatoire du processus de dégradation reflète un lien étroit entre l'état de l'élément et sa fiabilité, ce qui permet de mieux comprendre les mécanismes de défaillance de l'élément étudié. L'utilisation de l'information sur la dégradation en conjonction avec la caractéristique de dégradation permet ainsi d'évaluer avec précision la fiabilité de l'élément [65].

La Table 3.1 présente une synthèse sur le processus de dégradation appliqué aux éléments optoélectroniques.

Processus de dégradation	Propriétés	Références
Modèle déterministe	- Un modèle simplifié pour les données de dégradation - Utilisé dans un environnement homogène	[44, 28, 66, 67]
Processus gamma	- Processus de dégradation monotone - Homogène dans le temps avec un incrément indépendant	[54, 55, 68, 69]
Processus de Wiener	- Processus de dégradation non monotone - Prise en compte des erreurs de mesure	[61, 62, 63, 64, 70, 71, 72, 73]

TABLE 3.1 – Résumé des processus de dégradation

Parmi les deux processus stochastiques, le processus gamma est homogène dans le temps avec un incrément indépendant et positif [54], il est donc judicieux d'utiliser ce processus pour décrire une détérioration progressive, en particulier les dégradations s'accumulant de manière monotone dans le temps en une séquence de minuscules incréments, comme l'usure, la fatigue, la corrosion, la croissance des fissures, l'érosion, le fluage, etc. [74]. En outre, des processus stochastiques sont également utilisés pour modéliser la dégradation des composants optoélectroniques avec plusieurs conditions accélérées. Le processus de Wiener peut être utilisé pour décrire facilement le processus de dégradation dynamique des composants tandis que le processus gamma peut décrire une dégradation s'accumulant de manière monotone. Des modèles de processus de Wiener modifiés ont été aussi développés par des techniques de mise à l'échelle du temps [75, 76], en considérant un coefficient de dérive non linéaire [77, 78, 39], ou un paramètre adaptatif qui peut être mis à jour dynamiquement [79, 80, 81]. Les extensions du processus de Wiener sont totalement en phase avec des caractéristiques de composant optoélectronique en R&D présenté dans le chapitre 2. Ceci nous a amené à poser l'hypothèse d'utiliser ce type de modèle pour modéliser la dégradation des éléments optoélectroniques dans cette thèse.

Cependant, quelque constats à poser en lien avec cette hypothèse :

- Les facteurs de stress sont bien pris en compte dans le modèle de dégradation de type : température [28, 44, 61, 62, 63, 64, 82] et courant-tension [82, 83, 84] ;
- Il n'y a pas, ou, très peu de recherche sur la modélisation du facteur d'influence (auto-échauffement) sur le processus de dégradation [52].

Par rapport à ce double constat et en référence à la question scientifique posée en lien avec la modélisation du processus de dégradation au niveau élément en prenant en compte des facteurs d'influence, la thèse va chercher à développer deux contributions :

- Investigation et formulation d'impacts de facteurs d'influence (l'auto-échauffement au niveau élément) sur le processus de dégradation des éléments (ex. diode laser, photodiode) d'un composant optoélectronique (contribution C1) ;
- Développement de modèles de dégradation permettant de tenir compte de l'impact de ces facteurs d'influence (auto-échauffement) pour chacun des éléments (contribution C2).

3.3 Évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique avec facteurs d'influence multiples

3.3.1 Fiabilité d'un composant optoélectronique

Dans la section 3.2, un élément est dit défaillant lorsque sa dégradation dépasse un seuil de dégradation prédéfini, D_f . En ce sens, la fiabilité d'un élément en fonction du temps t peut être exprimée comme suit :

$$R(t) = P(X(t) < D_f) \quad (3.16)$$

De façon complémentaire, pour la dégradation d'un élément modélisé par le processus de Wiener avec des paramètres (μ, σ) , la fiabilité de cet élément est calculé comme suit :

$$R(t) = \Phi\left(\frac{D_f - \mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\mu D_f}{\sigma^2}\right) \Phi\left(-\frac{D_f + \mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) \quad (3.17)$$

où, $\phi(\bullet)$ est l'expression mathématique de la fonction de distribution cumulative de la distribution normale standard.

De plus, comme mentionné dans le chapitre 1, un composant optoélectronique est à rapprocher de la définition d'un système, c.-à-d. un ensemble d'éléments en interaction pour délivrer le service global attendu. C'est-à-dire la défaillance du composant, dépend de la défaillance des éléments constituants. Donc, une autre hypothèse posée dans cette thèse est de considérer que la défaillance d'un élément entraîne la défaillance du composant [37]. En ce sens, il est nécessaire d'avoir les connaissances a priori des processus de dégradation des éléments constituants et de leurs dépendances pour évaluer la fiabilité du composant.

En général, les dépendances entre éléments peuvent être classées en trois grandes catégories : les dépendances économiques, stochastiques et structurelles [85, 86]. Dans cette thèse, nous nous focalisons sur la dépendance de type stochastique, ou interaction, entre éléments qui influencent de manière significative le processus de dégradation des éléments. Cela permet de mettre en évidence une seconde question adressée par cette thèse "*Comment calculer la fiabilité d'un composant en prenant en compte l'interaction entre éléments ?*", spécifiquement sur des interactions de type stochastique.

Donc, la contribution C1 est complétée par l'"*Investigation et formulation d'impacts de facteurs d'influence (l'auto-échauffement au niveau de l'élément et l'interaction d'états au niveau du composant) sur le processus de dégradation des éléments (ex. diode laser, photodiode) d'un composant optoélectronique*"

En effet, afin de calculer la fiabilité du composant, il est nécessaire d'avoir des processus de dégradation des éléments constituants. Ceci nous amène à développer un état de l'art sur le modèle de dégradation pour chacun des éléments constituants en tenant compte de la dépendance de type stochastique ou interaction entre éléments. Puis, la fiabilité du composant étudié est investiguée.

3.3.2 Interaction de dégradation entre éléments

Chacun des éléments du composant est associé à plusieurs indicateurs de performance dépendants. La dépendance est représentée en considérant que le processus de dégradation d'un élément peut être affecté par la détérioration d'autres composants. En ce sens, [87] suppose que l'évolution du niveau de détérioration de l'élément i est notée par :

$$X_{t+1}^i = X_t^i + \Delta X_t^i \quad (3.18)$$

où, ΔX_t^i est l'augmentation du niveau de dégradation de l'élément i pendant une unité de temps.

D'un point de vue pratique, l'incrément de détérioration d'un élément au temps t peut dépendre de la condition opérationnelle, de son propre état actuel ainsi que de l'état actuel des autres éléments. Donc, un modèle stationnaire général pour l'incrément est proposé comme suit :

$$\Delta X_t^i = \Delta O_t^i + \Delta X_t^{ii} + \sum_{j \neq i} \Delta X_t^{ji} \quad (3.19)$$

où,

- ΔO_t^i est l'augmentation du niveau de détérioration de l'élément i causé par les conditions de fonctionnement pendant une unité de temps, c'est-à-dire l'effet de fonctionnement,
- ΔX_t^{ii} représente l'incrément du niveau de détérioration de l'élément i induit par lui-même pendant une unité de temps, à savoir l'effet intrinsèque. Cela signifie que ΔX_t^{ii} ne dépend que de l'état de l'élément i au temps t ,
- ΔX_t^{ji} est l'incrément du niveau de détérioration de l'élément i induit par l'élément j pendant une unité de temps, appelé effet d'interaction. ΔX_t^{ji} représente l'état d'interaction entre les deux éléments j, i .

Plusieurs variantes du modèle proposé peuvent être spécifiées :

- Cas 1 - $\Delta O_t^i > 0, \Delta X_t^{ii} = 0$ et $\Delta X_t^{ji} = 0$: ni effet intrinsèque ni effet d'interaction et le modèle proposé devient un modèle de base décrivant le comportement de dégradation homogène de composants indépendants [38] ,
- Cas 2 - $\Delta O_t^i > 0, \Delta X_t^{ii} > 0$ et $\Delta X_t^{ji} = 0$: aucun effet d'interaction et le modèle proposé devient un modèle de base décrivant le comportement de dégradation non homogène [39],
- Cas 3 - $\Delta O_t^i > 0, \Delta X_t^{ii} = 0$ et $\Delta X_t^{ji} > 0$: l'augmentation du niveau de détérioration de l'élément i ne dépend pas de l'état de l'élément lui-même, mais dépend de l'état de l'élément j [40, 41, 42],
- Cas 4 - $\Delta O_t^i > 0, \Delta X_t^{ii} > 0$ et $\Delta X_t^{ji} > 0$: l'augmentation du niveau de détérioration de l'élément i dépend de la condition opérationnelle, de l'état de l'élément i ainsi que de l'état de l'élément j .

Le troisième cas, également connu sous le nom de modèle d'interaction du taux de dégradation, est clarifié par Bian and Gebrael [42]. Supposons qu'un composant soit composé de L éléments, et que chaque élément ait un indicateur de performance décrit par le processus de dégradation $X_l(t)$ avec $l = 1, \dots, L$. Soit $\mu_l(t)$ le taux de dégradation associé au processus de dégradation $X_l(t)$. Pour incorporer la dépendance entre les processus de dégradation, une forme générale du taux de dégradation $\mu_l(t)$ est donné comme suit.

$$\mu_l(t) = \mu_l(t; \kappa(t), f(X(t))) \quad (3.20)$$

Le taux de dégradation est défini sur t et déterminé en outre par la relation fonctionnelle de $\kappa(t)$ et $f(X(t))$, pour laquelle $\kappa(t)$ est le taux de dégradation inhérente de l'élément sans l'interaction d'autres éléments, et $f(X(t))$ est le taux de dégradation inductif en tenant compte de l'effet d'autres éléments.

Sur la base de la fonction de taux de dégradation, le processus de dégradation $X_l(t)$ peut être donné comme suit :

$$X_l(t) = \int_0^t \mu_l(t; \kappa(t), f(X(t))) du + \epsilon_l(t) \quad (3.21)$$

où $\epsilon_l(t)$ est un élément d'erreur pour capturer le bruit de mesure et l'incertitude non identifiée, qui est généralement donné comme un processus de bruit blanc ou un processus de mouvement brownien stationnaire.

Il est difficile de dériver la distribution du temps de défaillance de l'élément sous le modèle de processus de dégradation donné par l'équation (3.21). En supposant une forme simplifiée du taux de dégradation comme $\mu_l(t) = \kappa(t) + \sum_{l \neq k} \delta_{lk} \cdot x_k(t)$, est utilisé un taux de dégradation invariable dans le temps $\kappa(t)$ et une combinaison linéaire de taux de dégradation inductifs $\delta_{lk} \cdot x_k(t)$ avec un coefficient constant δ_{lk} , et un élément d'erreur brownienne stationnaire, alors une distribution approximative du temps de défaillance est obtenue par Bian et Gebraeel [42], où les processus de dégradation de l'élément sont reconstruits par une équation différentielle stochastique (Stochastic differential equation - SDE) :

$$dX(t) = (\kappa + \delta \times X(t))dt + d\epsilon(t) \quad (3.22)$$

où $\kappa = (\kappa_1, \dots, \kappa_L)$ et $\epsilon = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_L)$ qui suit une distribution normale multivariée $MVN(0, \sigma^2 t)$ avec $\sigma^2 = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_L^2)$; et $\delta \in \mathbb{R}^{L \times L}$ avec les non-diagonales δ_{lk} et les diagonales $\delta_{ll} = 0$.

Il a été démontré que les équations différentielles stochastiques données dans l'équation (3.22) avec la condition initiale $X(0) = X_0$ ont une forme fermée sous la forme $X(t) | (\kappa, \sigma^2)$, qui suit une distribution normale multivariée avec un vecteur moyen $\mu_o(t) | (\kappa, \sigma^2)$ et une matrice de covariance $\Sigma_0(t) | (\kappa, \sigma^2)$, comme suit :

$$\mu_o(t) | (\kappa, \sigma^2) = \exp(t\delta) \times X_0 + \int_0^t \exp((t-u)\delta) \kappa du \quad (3.23)$$

$$\Sigma_0(t) | (\kappa, \sigma^2) = \int_0^t \exp((t-u)\delta) \times \sigma^2 \times \exp((t-u)\delta)^T du \quad (3.24)$$

Étant donné les seuils de dégradation des L indicateurs de performance, D , la fonction de fiabilité du composant peut être approximée comme suit :

$$\begin{aligned} R(t) &= Pr(X_1(t) \leq D_1, \dots, X_L \leq D_L) \\ &\approx \Phi_L(D_1, \dots, D_L; \mu_o(t) | (\kappa, \sigma^2), \Sigma_0(t) | (\kappa, \sigma^2)) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Supposons que les caractéristiques du composant, telles que la structure, la fonctionnalité, les conditions de fonctionnement, le mécanisme de défaillance et les interactions des éléments, soient bien étudiées, dans notre thèse, le modèle d'interaction de la dégradation est bien adapté à la modélisation de la dégradation et à l'analyse de la fiabilité.

En outre, le modèle des copules basé sur le modèle multivarié est introduit pour modéliser le processus de dégradation d'un composant à plusieurs indicateurs de dégradation [88]. La distribution des observations de dégradation de ces indicateurs à un moment spécifique peut être décrite par une distribution multivariée conjointe [89]. La dépendance entre les processus de dégradation est caractérisée par la variance-covariance de la distribution multivariée conjointe à travers des fonctions de copule. Il existe différents types de fonctions de copule pouvant être utilisées pour la modélisation de la dégradation, qui sont répertoriés tels que [37] : Copule de gaussienne, Copule de Frank. Cependant, l'étude sur les processus de dégradation multivarié basé sur les copules est encore limitée et requérant de mener d'autres investigations sur l'évaluation de la durée de vie résiduelle, la planification des tests de dégradation [37].

La Table 3.2 présente une synthèse sur les études d'interaction de dégradation.

Modèle de dégradation	Applications	Références
Modèle de copules	Copule de gaussienne	[90]
	Copule de Frank	[91]
Modèle d'interaction de dégradation	Incrément indépendant de la dégradation	[38]
	- Aucun effet d'interaction - Dégradation non homogène	[39]
	- Aucun effet intrinsèque - Effet d'interaction	[40, 41, 42]
	- Effet intrinsèque - Effet d'interaction	[87, 92]

TABLE 3.2 – Résumé des études sur l'interaction de dégradation

Cependant, dans la littérature, très peu d'études sont faites sur le modèle d'interaction de la dégradation en intégrant le modèle d'accélération. Ceci amène, par rapport à la question scientifique (la deuxième) liée au calcul de la fiabilité d'un composant en prenant en compte l'interaction entre éléments, la troisième contribution qui est l'"*Extension de chacun des modèles de dégradation proposés au niveau élément pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique constitué à partir de ses éléments (contribution C3)*"

3.4 Optimisation d'un plan de test

Lors de la réalisation d'une expérience de dégradation, en raison de la limitation des ressources expérimentales, le coût de l'expérience et la précision de l'estimation de la durée de vie du composant sont deux préoccupations majeures [24]. Parmi des constats de réalisation d'une expérimentation, la taille de l'échantillon, la fréquence d'inspection et le temps de fin (le nombre total de mesures) doivent faire l'objet d'une attention particulière [24]. Il est évident que des valeurs inappropriées de ces facteurs non seulement gaspillent des ressources expérimentales, mais réduisent également la précision de l'analyse des données. Par conséquent, la manière de déterminer les valeurs de ces facteurs de manière appropriée est un défi pour les personnels menant les expérimentations.

3.4.1 Critères d'optimisation

Un plan de test accéléré optimal est un plan de test permettant d'évaluer la fiabilité du composant étudié avec un intervalle de confiance donné selon un ou plusieurs critères d'optimisation.

De nombreuses publications ont fourni des algorithmes pour obtenir des plans ADT en fonction de plusieurs critères d'optimisation différents [93]. De plus, il est nécessaire d'avoir une hypothèse du modèle de dégradation et de ses paramètres pour construire le critère d'optimisation à travers la matrice de Fisher, I . En effet, les matrices de Fisher jouent un rôle important dans la conception des expériences et dans l'analyse des données [94]. Leur rôle principal est de faire des prédictions pour l'inférence des paramètres du modèle - à la fois leurs erreurs et leurs covariances.

La matrice de Fisher est établie comme suit :

- Soit $f(x, \theta)$ la distribution de vraisemblance du processus de dégradation X (qui peut être multidimensionnelle), paramétrées par le vecteur $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots)$. Le score est défini

comme la dérivée partielle du log-vraisemblance par rapport au paramètre θ :

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \log f(X, \theta) = \frac{1}{f(X, \theta)} \frac{\partial f(X, \theta)}{\partial \theta} \quad (3.26)$$

— L'information de Fisher est alors définie comme le moment d'ordre deux de la fonction de score :

$$I(\theta_i, \theta_j) = E \left[\left(\frac{\partial}{\partial \theta_i} \log f(X, \theta) \right) \left(\frac{\partial}{\partial \theta_j} \log f(X, \theta) \right) | \theta \right] \quad (3.27)$$

Parmi les critères, les deux catégories les plus pertinentes sont : la précision sur l'estimation des paramètres de dégradation et sur le calcul de la fiabilité.

Précision sur l'estimation des paramètres de dégradation :

Habituellement, la matrice de variance-covariance asymptotique des estimations du maximum de vraisemblance (MLEs) des paramètres du modèle de dégradation, qui est proportionnelle à la matrice inverse de la matrice d'information de Fisher, est utilisée comme mesure de la variabilité globale et le déterminant de cette matrice est souvent appelé variance généralisée. Sur cette base, le critère D-optimal est établi en maximisant le déterminant de la matrice d'information de Fisher des estimations des paramètres du modèle afin de minimiser la variance de tous les paramètres du modèle de dégradation des éléments/composant ainsi que la plus grande précision de confiance conjointe. La formulation du critère de « D-optimal » [93, 95, 96] est :

$$\text{Maximiser } \{ \text{Det}(I(\theta)) \} \quad (3.28)$$

Précision sur le calcul de la fiabilité

D'autres critères d'optimisation visent principalement à améliorer la précision de la prédiction de certains indices de fiabilité des composants, par exemple le temps moyen de défaillance et le p-ième percentile de la distribution de la durée de vie dans les conditions d'utilisation. Pour cela, le critère est représenté par V-optimal pour minimiser la variance asymptotique de la valeur de p^{ième} percentile de la distribution des durées de vie des éléments/composants en conditions nominales. La formulation du critère de « V-optimal » [93, 97, 73] est :

$$\text{Minimiser } \left\{ \text{Avar}(\hat{t}_{f,p,S_0}) \right\} = \text{Minimiser } \left\{ h^T \cdot I^{-1}(\theta) h \right\} \quad (3.29)$$

où, \hat{t}_{f,p,S_0} est la valeur p^{ième} percentile de la distribution des durées de vie en conditions nominales, et des éléments de h est définie comme suit : $h_i = \frac{\partial \hat{t}_{f,p,S_0}}{\partial \theta_i}$

Par rapport aux constats soulevés dans le cadre CEA, l'objectif premier en support du problème d'optimisation est de développer des modèles de dégradation les plus adaptés pour chacun des éléments du composant étudié et des paramètres de ces modèles les plus précis possibles tout en considérant la contrainte de limitation des ressources disponibles (nombre total d'échantillons ; durée de test). Donc, le critère D-optimal est retenu comme le critère principal à mettre en oeuvre en regard de la problématique de cette thèse.

Une synthèse des études sur l'optimisation d'un plan de test de dégradation accéléré est donnée dans le Tableau 3.3

Contrainte	Modèle de dégradation	Critère d'optimal	Références
Constante	Régression	Coût de réaliser des tests accélérés	[98, 99, 100, 101, 102]
	Processus de Wiener	V-opt	[103, 104, 73, 105, 106, 107, 97]
	Processus Gamma	D-opt	[95, 96, 107]
Échelonnée	Processus de Wiener	V-opt	[108, 109, 74, 110, 111, 112, 113]
	Processus Gamma		[114, 115, 116, 56]
	Processus d'inverse gamma		[117, 118]
Progressive	Processus de Wiener	V-opt	[119]

TABLE 3.3 – Synthèse des travaux en optimisation d'un plan de test de dégradation accélérée

À partir des études bibliographiques, nous avons constaté que les études actuelles partent majoritairement sur un composant simple. La formulation du critère d'optimisation est obtenue facilement et ne dépend que de la valeur des paramètres du modèle de dégradation. Cependant, dans cette thèse, le composant est complexe (plusieurs éléments constituants) ; la dégradation des éléments est difficile à établir, car elles sont affectées par des facteurs d'influence (facteur de stress, dégradation de l'autre élément, etc.). Cela permet d'isoler une troisième question scientifique à investiguer dans la thèse : "*Comment optimiser les plans de test accéléré pour un composant complexe tout en assurant la bonne précision sur le calcul de fiabilité ?*". Nous allons reformuler dans la section suivante le processus d'obtention d'un plan de test optimal grâce aux méthodes existantes.

3.4.2 Formulation du problème d'optimisation

Dans les méthodes existantes, plusieurs éléments sont à considérer afin de planifier un test accéléré dans l'objectif d'utiliser le plus efficacement possible les ressources de test pour réaliser un test de dégradation accélérée. Ces éléments sont les suivants [24] :

- Nombre total d'échantillons à tester (n_{total}),
- Durée de test (t_{total}),
- Intervalles de temps entre les mesures (f),
- Nombre de niveau de stress (K),
- Les niveaux de contrainte k (S_k) à utiliser dans le test accéléré,
- Proportion relative (π_k) : $\pi_k = n_k/n_{total}$ pour la contrainte constante, et $\pi_k = t_k/t_{total}$ pour la contrainte échelonnée ; où, n_k est le nombre d'échantillons soumis au niveau de stress k (uniquement pour la contrainte constante), t_k est la durée de test pour le niveau de stress k (uniquement pour la contrainte échelonnée).

Puis, ces variables de décision doivent être déterminées en tenant compte de plusieurs contraintes, telles que la durée limitée du test accéléré, le budget et la disponibilité des ressources nécessaires à la réalisation du test accéléré. Par conséquent, le problème de décision optimale est formulé comme suit :

$$\begin{aligned}
 &\text{Critère d'optimisation : Maximiser } \{Det(I(\theta))\} \text{ ou Minimiser } \{Avar(\hat{\xi}_{p,S_0})\} \\
 &\text{Contrainte : } TC(n_{total}, t_{total}, \{n_k, \text{ou}, t_k\}_{k=1}^K) \leq C_b \\
 &\quad n_{total}, t_{total}, (n_k, \text{ou}, t_k) \in N \\
 &\quad k = 1, 2, 3, \dots, K
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

Hypothèse d'un modèle de dégradation : Avant de commencer à concevoir un plan de test, le modèle de dégradation du composant doit être spécifié, et la valeur des paramètres

du modèle de dégradation doivent être définis (Table 3.3). Ensuite, la formulation du critère d'optimisation est obtenue à partir d'un modèle de dégradation prédéfini.

Établir la contrainte de réalisation d'un test accéléré : La première étape de la planification des tests accélérés consiste à obtenir la durée totale du test accéléré, le nombre d'unités et le nombre de temps de mesure. Cette contrainte est établie par une fonction de coût total de réalisation d'un plan de test accéléré, qui est satisfait pour un budget de coût donné, C_b . La restriction des nombres entiers sur certaines variables de décisions peut faciliter l'obtention de ces valeurs par une méthode d'énumération. Le coût total (TC) de réalisation des tests accélérés peut être évalué par exemple [120] :

Contrainte constante

$$TC = C_1 * n_{total} + C_2 * t_{total} + \sum_{k=1}^K C_k * n_k \quad (3.31)$$

Contrainte échelonnée

$$TC = C_1 * n_{total} + C_2 * t_{total} + \sum_{k=1}^K C_k * t_k \quad (3.32)$$

où, C_1 est le coût unitaire du composant, C_2 est le coût unitaire de l'opération, C_k le coût unitaire d'expérimentation spécifique à niveau de stress k . Dans ces deux cas, il est admis l'hypothèse que le niveau de contrainte est prédéfini.

À partir de ces deux modèles de coût total, nous pouvons estimer la durée totale du test, t_{total} , le nombre d'unités de test mise en œuvre, n_{total} , et la fréquence de mesure, f , pour un budget de coût donné, C_b . En général, la valeur de C_2 n'a pas d'effet important sur n_{total} , t_{total} , f . Mais, C_2 nous permet d'estimer la proportion de l'unité/temps de test accéléré au niveau de stress k .

Recherche d'un plan de test optimal : Cette étape consiste à trouver un plan de test accéléré qui satisfait aux contraintes en regardant le critère d'optimisation. Dans la littérature, un ensemble de plans de test, qui satisfait à la contrainte des coûts, est créé par la méthode exacte (Table 3.3) ou l'algorithme génétique [7, 120]. Dans la méthode exacte, par exemple dans [111], un algorithme est proposé afin d'extraire tous les cas possibles des plans de test qui sont satisfaits relativement à la contrainte de budget. Cet algorithme est efficace lorsque le nombre de possibilités est fini, et la combinatoire reste limitée. Toutefois, la combinatoire des cas rend son exploration coûteuse en temps de calcul. En ce sens, les algorithmes génétiques fournissent un complément utile à l'expérimentation pour créer l'ensemble de plans de test [7].

Ensuite, comme mentionné ci-dessus, le critère d'optimisation pour un composant simple est facile à obtenir qui dépend que de la valeur des paramètres du modèle de dégradation ainsi que du plan de test. Un plan de test optimal est défini par des nombres d'échantillons, durée de test, et des proportions d'unités à allouer au niveau de stress choisi. Le niveau de stress élevé est choisi pour être aussi élevé que possible afin d'introduire autant de dégradations que possible.

Par conséquent, l'importance de ces méthodes d'optimisation d'un plan de test accéléré dans la littérature est de bien identifier le modèle de dégradation et la valeur des paramètres du modèle. Cependant, dans le contexte d'un composant, l'établissement du modèle de dégradation pour chacun des éléments du composant étudié est difficile (voir les section 3.2 et 3.3). Puis, le critère d'optimisation ne dépend pas seulement de la valeur des paramètre du modèle de dégradation et de plan de test accéléré, mais aussi du niveau de dégradation des éléments du composant. De plus, dans le contexte de R&D du CEA, il n'y a pas donc de REX relatif par

exemple à l'exploitation d'une flotte de ces composants (les résultats d'expérimentation sont peu nombreux) et il n'existe qu'un nombre limité des composants disponibles. La méthode exacte est par conséquent plus adaptée pour le problème d'optimisation à résoudre dans cette thèse.

Le problème d'optimisation d'un plan de test accéléré pour un composant complexe est par conséquent une nouvelle contribution à apporter. Elle se résume pour quatrième contribution sur le *Développement d'un plan optimisé de tests accélérés pour chacun des composants optoélectroniques étudiés (Contribution C4)*.

3.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré à un état de l'art en relation avec la problématique globale de la thèse autour de la fiabilité. Cela conduit à justifier premièrement la question liée à "*Comment modéliser le processus de dégradation d'élément en prenant en compte des facteurs d'influences ?*". Les facteurs d'influence sont des facteurs de stress (température, courant, humidité, etc.), ou, la notion d'interaction entre éléments se construit sur différents types de dépendances qui sont maîtrisés dès la conception (ex. topologique, fonctionnel, physique) ou sont émergents dans le fonctionnement (ex. propagation de dégradations, rayonnement). L'interaction entre éléments du composant a des conséquences sur l'étude de leur fiabilité, donc une seconde question concerne le calcul de la fiabilité du composant au sens "*Comment calculer la fiabilité d'un composant en prenant compte l'interaction entre éléments ?*". En outre, la complexité d'un composant optoélectronique a des conséquences sur l'étude de sa fiabilité, notamment au travers du nombre de tests à appliquer et du temps nécessaire à leur application. Cela conduit à poser une dernière question liée à "*Comment optimiser les plans de test accéléré tout en assurant la bonne précision sur le calcul de fiabilité ?*"

Ces questions scientifiques sont investiguées dans cette thèse au travers de 4 contributions principales :

- Investigation et formulation d'impacts de facteurs d'influence (l'auto-échauffement au niveau élément et l'interaction de dégradation au niveau composant) sur le processus de dégradation des éléments (ex. diode laser, photodiode) d'un composant optoélectronique (contribution C1) ;
- Développement de modèles de dégradation permettant de tenir compte de l'impact de ces facteurs d'influence (auto-échauffement) pour chacun des éléments (contribution C2) ;
- Extension de chacun des modèles de dégradation proposés au niveau élément pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique constitué à partir de ses éléments (contribution C3) ;
- Développement d'un plan optimisé de tests accélérés pour chacun des composants optoélectroniques étudiés (Contribution C4).

Donc, le Chapitre 4 et le Chapitre 5 sont consacrés aux trois premières contributions. Le Chapitre 4 se concentre plus spécifiquement sur les contributions C1 et C2 en se focalisant sur des éléments optoélectroniques, tandis que le Chapitre 5 traite des composants optoélectroniques. Le Chapitre 6 quant lui adresse la quatrième contribution en proposant une méthode optimale d'un plan de test accéléré qui prend en compte les modèles avec des dépendances.

Chapitre 4

Modèle de dégradation d'un élément optoélectronique

Sommaire

4.1	Introduction	77
4.2	Analyse de l'impact des facteurs d'influence par la simulation multi-physique sur l'élément étudié	78
4.2.1	Structure de la LED	79
4.2.2	Analyse de l'impact des facteurs d'influence par la simulation multi-physique	80
4.3	Proposition d'un modèle de dégradation considérant l'impact de l'auto-échauffement	84
4.3.1	Taux de dégradation modifié	85
4.3.2	Modèle de dégradation modifié	86
4.3.3	Modèle de calcul de la fiabilité d'un élément optoélectronique	88
4.3.4	Estimation des paramètres du modèle de dégradation	88
4.4	Validation du modèle de dégradation proposé	89
4.4.1	Évaluation des mesures optiques au cours du vieillissement	90
4.4.2	Impact du courant d'alimentation sur la température de jonction	91
4.4.3	Impact de la dégradation de puissance optique sur la température de jonction	92
4.4.4	Estimation des paramètres du modèle de dégradation	93
4.4.5	Analyses comparatives	94
4.5	Conclusion	99

4.1 Introduction

Le quatrième chapitre a pour objet de présenter deux contributions autour de l'investigation et la formulation d'impacts de facteurs d'influence (l'auto-échauffement au niveau élément) sur le processus de dégradation des éléments d'un composant optoélectronique (contribution C1) et du développement de modèles de dégradation permettant de tenir compte de l'impact de ces facteurs d'influence (auto-échauffement) pour chacun des éléments (contribution C2). Pour illustrer et valider expérimentalement ces propositions, un élément LED a été choisi. Pour l'étude de l'impact des dépendances, une analyse a priori du composant est réalisée dans la section 4.2. Tout d'abord,

la structure de l'élément est présentée afin d'identifier des paramètres de performance. Ensuite, la focalisation sur le flux d'énergie transformé par l'élément nous permet d'analyser l'impact des dépendances sur cet élément. Ces travaux sont réalisés par une modélisation multi-physique (avec l'outil COMSOL) et bien évidemment en parallèle une partie expérimentale est menée. La section 4.3 est consacrée à la modélisation de dégradation de cet élément. Lorsque l'impact de dépendance est quantifié, cela nous permet de formuler cet impact sur le taux de dégradation modifié. Un modèle intégrant l'impact de dépendance sur le processus de dégradation de l'élément est ensuite développé. La formulation de la fiabilité de l'élément en est finalement dérivée. Une validation du modèle de dégradation proposé par des expérimentations est également réalisée dans la section 4.4. Enfin, des conclusions sont données dans la section 4.5.

4.2 Analyse de l'impact des facteurs d'influence par la simulation multi-physique sur l'élément étudié

Les résultats de la section 2.3 du Chapitre 2 ont montré que la température est un facteur important qui influence la performance de la LED. Effectivement, dans la littérature, le stress thermique est l'une des façons les plus couramment utilisées pour accélérer la défaillance/dégradation des LED selon le modèle d'Arrhenius, qui décrit le taux de dégradation de la puissance optique des LED en fonction de la température opérationnelle [44, 121]. Cependant, dans de nombreuses études, la température de jonction utilisée dans le modèle d'Arrhenius est considérée comme constante et égale à la température ambiante, car elle peut être contrôlée avec une enceinte thermique pendant le test d'accélération. Cependant, il a été démontré que la prédiction de la durée de vie de la LED, qui utilise la température ambiante pour modéliser le taux de dégradation, peut conduire à des erreurs de prédiction et des incertitudes significatives avec la durée de vie réelle de l'application [52]. En effet, selon des travaux existants, la température de jonction, qui affecte directement les défaillances des LED (par exemple, défaillance du semi-conducteur, défaillance de l'interconnexion), influence significativement la dégradation [10, 121, 122]. Ainsi, pour la modélisation du taux de dégradation des LED, la température de jonction en tant que stress thermique est plus pertinente que la température ambiante. Cependant, la mesure directe de la température de jonction est complexe et peut conduire à une erreur importante [10, 123, 124]. En outre, sur la base des analyses de défaillance des LED (par exemple, microscope optique et infrarouge, microscope électronique à balayage, etc.), de nombreuses études ont montré que la température de jonction des LED n'est pas constante et peut augmenter pendant le test d'accélération en raison de l'impact de la dégradation de la LED [52, 125].

En lien avec l'importance de la température de jonction sur les performances des LED, notre objectif à ce stade est de construire un modèle thermique dynamique de la LED sur l'environnement de simulation COMSOL. Le modèle thermique dynamique est basé sur une application technique et réelle. Ainsi, le modèle électrique et thermique assemblé des LED a été simulé dans un processus dynamique de charge dans le programme de simulation COMSOL.

C'est la première étape de notre démarche scientifique dans le but d'élaborer la méthodologie d'optimisation de plan de test. Elle nous aide à mieux comprendre l'élément à étudier. À partir de ces résultats, nous pouvons identifier et modéliser des impacts d'influence qui affectent la dégradation de l'élément étudié.

4.2.1 Structure de la LED

La structure élémentaire est constituée d'une puce GaN sur la couche métallique interconnecte et du substrat céramique brasé sur un support en aluminium (Al) dit "STAR". La Figure 4.1 présente un exemple de structure de LED et de son conditionnement sur le circuit imprimé (PCB). Il s'agit d'une LED Cree EZ1000, dont la structure est verticale avec deux bornes de cathode (-) à plot de liaison carré de $150\ \mu\text{m}$ sur la face supérieure et une anode à terminaison AuSn 80 :20 (+) sur la face inférieure du substrat en silicium [126]. La couche émettrice de la LED est liée métalliquement au substrat de silicium, et la périphérie du mesa émettrice est passive. Ces puces LED à structure verticale ont une hauteur d'environ $170\ \mu\text{m}$. Les puces reçues sont montées sur un MCPCB de type "STAR" (Figure 4.1.b) permettant de les alimenter.

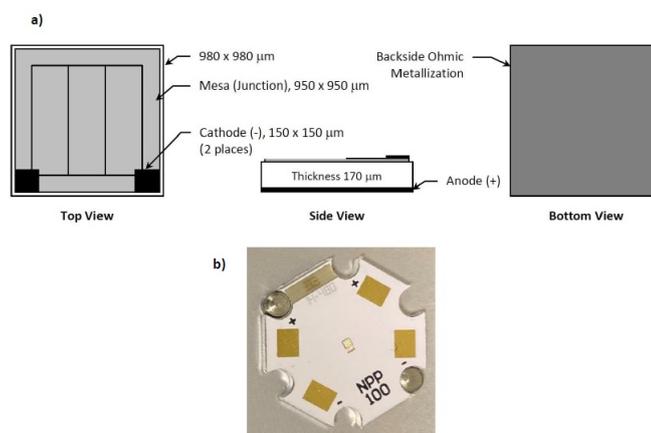


FIGURE 4.1 – Détails des LED Cree EZ10000 ; a) Schéma de la structure des LED ; b) Boîtier de LED sur le PCB

Ensuite, un module de vieillissement est utilisé pour maintenir les LEDs. Les supports sont en aluminium pour une meilleure dissipation de la chaleur. La Figure 4.2 présente la coupe transversale de la LED en test accéléré.

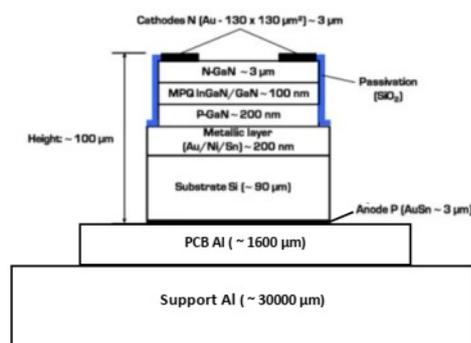


FIGURE 4.2 – Coupe transversale de la LED CREE EZ1000 monté sur un PCB et le support d'aluminium [17]

Le fonctionnement plus détaillé de la LED a été présenté dans la Figure 2.1 du Chapitre 2, et en plus détaillé dans la Figure 4.3. Lorsque la jonction est polarisée en direct, les trous et les électrons sont recombinaison. La bande de conduction est alors formée pour émettre l'énergie

lumineuse sous forme de photons. Ce phénomène est appelé phénomène d'électroluminescence, et cette énergie lumineuse dépend de la quantité de courant absorbée. En d'autres termes, cette énergie lumineuse est directement proportionnelle au courant absorbé. Lorsqu'elle absorbe plus de courant, la lumière est élevée ; de même, la lumière est faible lorsqu'elle absorbe un faible courant. Tout le courant absorbé n'est pas converti en énergie lumineuse ; l'efficacité de conversion de puissance des émetteurs est généralement comprise entre 10% et 20%. Une partie de ce courant est donc convertie en chaleur qui est dissipée par la diode pendant l'émission de la lumière dans l'environnement extérieur. Cette chaleur est connue sous le nom d'énergie dissipée par les électrons et cette puissance dissipée dépend également du matériau semi-conducteur de la diode. En outre, l'absorption de bande à bande peut être exclue en tant que source directe de chaleur.

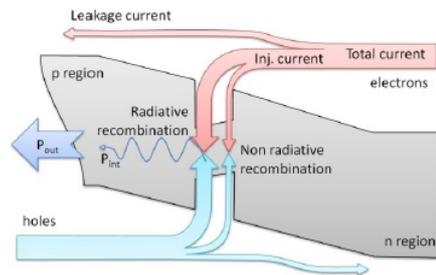


FIGURE 4.3 – Vue schématique de la région active et du courant total réparti en courant de fuite, courant radiatif et courant non radiatif dans les émetteurs [18]

Donc, la puissance dissipée, qui est libérée dans l'environnement sous forme d'énergie thermique, se produit dans un volume du composant sous l'action du courant d'alimentation. Dans le cas où P_e est la puissance électrique d'entrée et P_{opt} est la puissance optique de sortie, la puissance dissipée P_{heat} est obtenue :

$$P_{heat} = P_e - P_{opt} \quad (4.1)$$

4.2.2 Analyse de l'impact des facteurs d'influence par la simulation multi-physique

En regardant la structure de la LED présentée dans la section précédente, cela nous permet d'analyser et d'interpréter le chemin thermique en 3 dimensions sur LED grâce à la simulation multi-physique. Cette simulation est composée de 3 étapes : Géométries simplification ; Maillage et Condition aux limites ; Présentation des résultats.

a. Géométries simplification

La définition des matériaux dans tous les domaines de la LED est une étape importante pour construire le modèle thermique dynamique dans l'environnement de simulation COMSOL. Nous supposons que la bibliothèque de matériaux, qui fait partie du module thermique de COMSOL répond au besoin de cette analyse, et offre l'ensemble des propriétés thermiques des sous-éléments individuels [17]. Le Tableau 4.1 énumère les matériaux utilisés dans les différents domaines.

TABLE 4.1 – Données matériaux et valeurs de thermique

Matériaux	Conductivité thermique($W/(m.K)$)	Capacité thermique($J/(Kg.K)$)
Anode (P-AuSn)	60	160
Substrate - Si	130	700
Métallique - Au	317	129
GaN	130	490
Aluminium - Al	155	893

Vis-à-vis des éléments de la LED avec leur caractérisation thermique mais aussi en discutant avec des experts du CEA, l'élément métallique (Au) n'a pas été retenu dans la simulation, car il présente un rôle mineur dans la dissipation des thermiques. La géométrie simplifiée de la LED est présentée sur la Figure 4.4 et dans le Tableau 4.2.

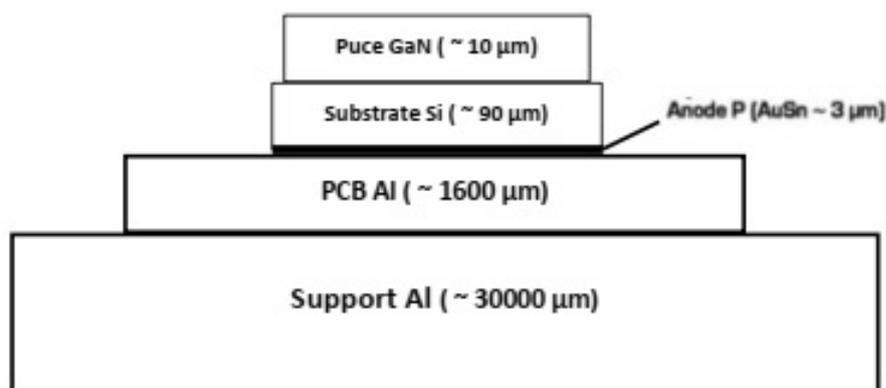


FIGURE 4.4 – Représentation de la coupe transversale de la géométrie simplifiée de la LED

TABLE 4.2 – Modèle géométrique retenu de la LED

Matériaux	Dimensions dans la structure : X*Y*Z (μm)
Puce (GaN)	980x980x10
Substrate (Si)	980x980x90
Anode P (AuSn)	980x980x3
PCB (Al)	20000x20000x1600
Support (Al)	80000x80000x30000

b. Maillage et Condition aux limites

Dans l'étape suivante de la résolution de la simulation, il est nécessaire de créer le maillage dans le modèle géométrique simplifié. La vue du maillage est présentée à la Figure 4.5.

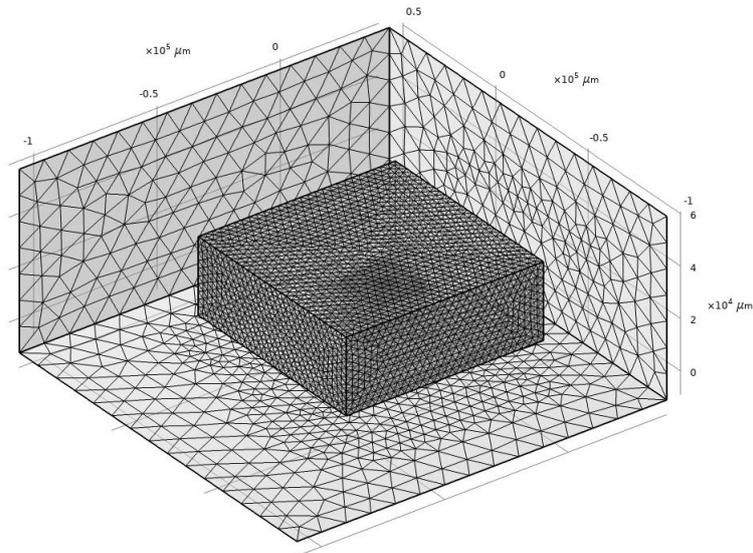


FIGURE 4.5 – Vue d'ensemble du maillage de LED dans l'air

Le premier maillage tétraédrique est effectué avec l'outil de maillage automatique de COMSOL. 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. Les maillages de cette structure sont illustrés en Figure 4.6.

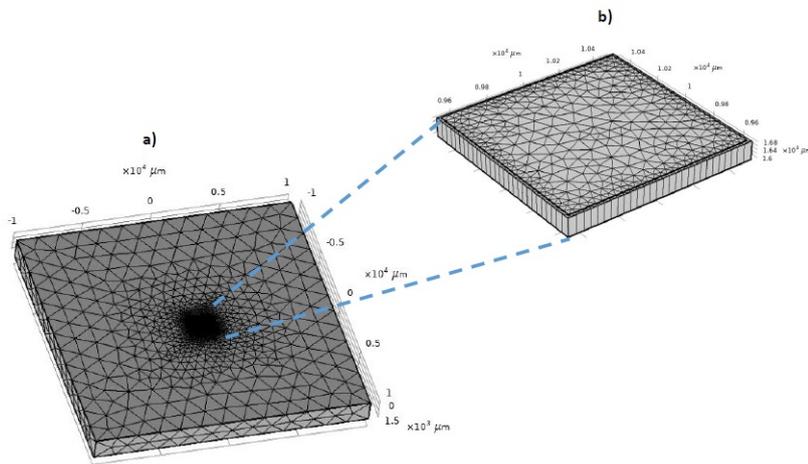


FIGURE 4.6 – Maillage de LED ; a) LED sur star (PCB) ; b) Puce LED

Les conditions aux limites consistent en l'application de deux contraintes thermiques. D'une part, l'injection d'un flux thermique, la vitesse d'air est de 0,55 m/s selon consigne d'étuve, sur la surface des puces définies et considérées comme générateurs thermiques parfaits. Le domaine de la puce LED elle-même est chargé de la puissance dissipée $P_{heat} = 0,9W$ [126, 17]. Les autres domaines ont la source de chaleur définie à zéro. Cela signifie qu'ils ne sont pas une source

de chaleur. Les limites entre la LED et l'environnement sont fixées au flux d'air laminaire ce qui présente l'avantage d'obtenir directement la valeur des résistances thermiques par le relevé des températures après simulation. Nous avons imposé la température initiale à 298°K (25°C). Les faces des éléments échangent la thermique avec environnement extérieur par la fonction multiphysique - Flux laminaire.

c. Présentation des résultats

Comme mentionné ci-dessus, les limites entre la LED et l'environnement sont fixées au flux d'air laminaire. Cela permet d'approcher au mieux les conditions réelles de la LED sur notre banc de mesure. Puis, nous avons réalisé la simulation thermique en mode de solution stationnaire. Le résultat de simulation est présenté dans la Figure 4.7.

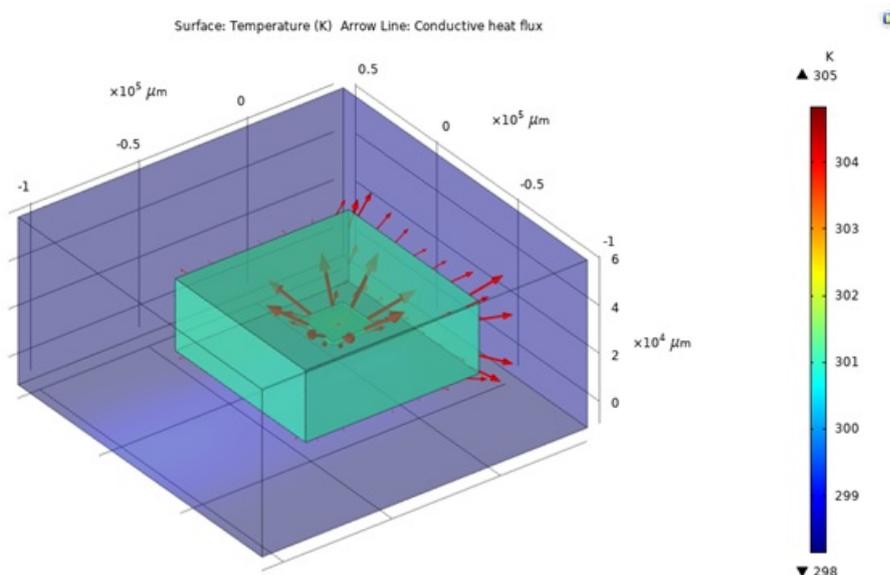


FIGURE 4.7 – Résultat de la simulation en considérant que la LED est en bon état

Dans la Figure 4.7, nous pouvons voir la diode thermique dans les graphiques en couleur. En effet, il y a une augmentation de 7 degrés sur la température de jonction de la LED. Le transfert de chaleur de la puce vers la plaque en aluminium est visible sur le modèle, représenté par des flèches en rouge. L'échelle indiquant la plage de température et les températures maximales et minimales de l'objet simulé sont affichés à côté de l'objet simulé. De plus, le résultat de mesure de la température sur le PCB et la plaque d'aluminium avec trois capteurs est confirmé par la précision suffisante du résultat de la simulation.

Ensuite, en posant l'hypothèse que la puissance électrique appliquée à la LED est constante et que la puissance optique diminue dans le temps à cause de la dégradation, il y a donc une augmentation de la puissance dissipée en regardant l'Équation (4.1). Une LED est considérée comme défaillante lorsque sa puissance optique atteint un seuil critique, qui est d'environ 70% de la valeur initiale de la puissance optique de la LED. La puissance dissipée augmente par approximation de 30% de la valeur initiale, $P'_g = 1,17W$. Le résultat de simulation est présenté à la Figure 4.8

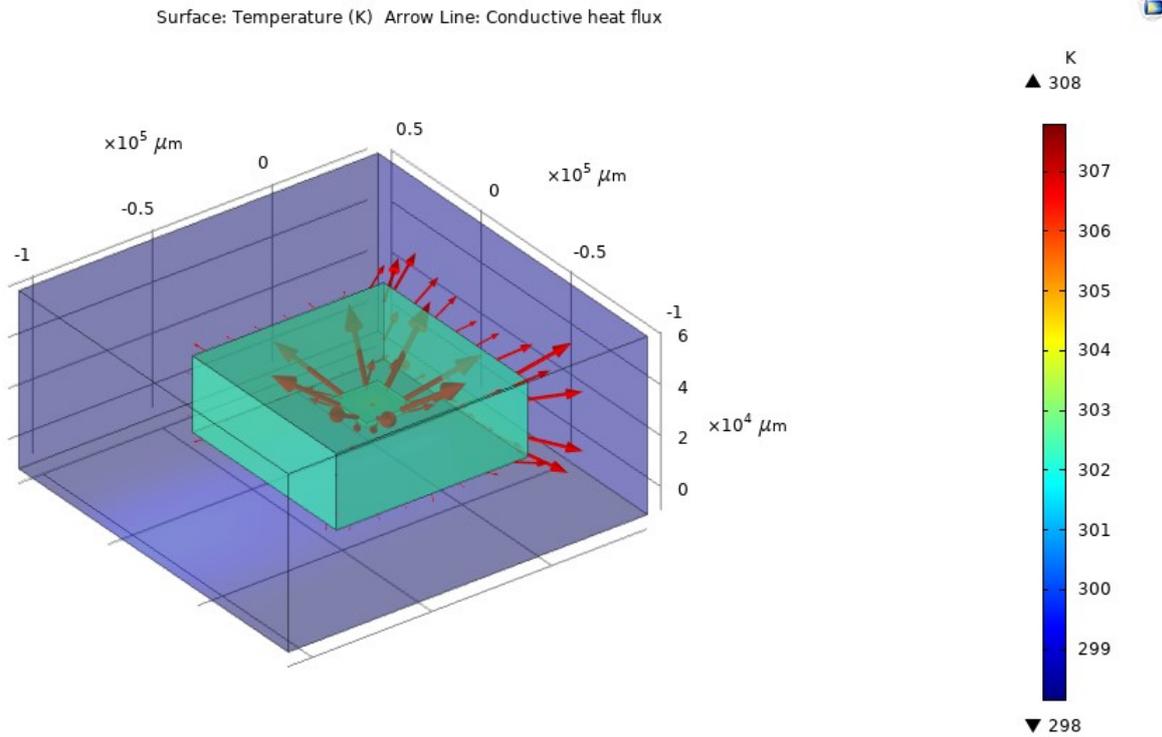


FIGURE 4.8 – Résultat de la simulation en considérant que la LED est en état dégradé

Ces résultats montrés en Figure 4.8, indiquent que la température de jonction de LED augmente à cause de la dégradation de la puissance optique. L'augmentation de la température de jonction peut être donc divisée en deux parties : effet de puissance dissipée et impact de la dégradation. En outre, l'augmentation de la température de la jonction peut accélérer encore le taux de dégradation des LED. En résumé, il existe une boucle de stress thermique, soumise à **un auto-échauffement** sur la LED, qui affecte le processus de dégradation de la LED dans le temps. Ce constat nous permet d'envisager pour la suite de développer un modèle de calcul de la fiabilité au niveau élément en considérant l'auto-échauffement dans la section suivante.

4.3 Proposition d'un modèle de dégradation considérant l'impact de l'auto-échauffement

La dégradation de la puissance optique est l'un des principaux indicateurs de défaillance des LED et a été étudiée dans divers travaux [121, 44, 61, 62, 68, 21, 69, 127]. Dans ces études, le modèle de dégradation conventionnel pour la LED est présenté comme dans l'équation (4.2). Les détails sont déjà présentés dans la section 3.2.2 du chapitre 3.

$$\phi(t) = \phi_o \times e^{(-\eta \cdot t)} + \sigma \cdot B(t) \quad (4.2)$$

où,

- t : durée de fonctionnement en heures ;
- $\phi(t)$: moyenne normalisée de l'intensité lumineuse au temps t , $\phi(t) = \frac{P_{opt}(t)}{P_{opt}(0)}$
- ϕ_o : constante initiale projetée dérivée de l'ajustement de la courbe des moindres carrés ;

- η : constante de vitesse de décroissance dérivée de l'ajustement de la courbe des moindres carrés ; $\eta = \alpha \times \exp\left(-\frac{\beta}{T_k}\right)$; où α est le facteur préexponentiel, $\beta = \frac{E_a}{k_B}$, E_a est l'énergie d'activation, k_B est la constante de Boltzmann ;
- $B(t)$ est un mouvement brownien standard

Cependant, les résultants dans la section 4.2.2 ont indiqué que la température de jonction des composants augmentait durant les tests de vieillissement, du fait de l'apparition de défauts. L'impact de l'auto-échauffement sur la température de jonction peut alors être divisé en deux parties liées à :

- (a) La puissance dissipée : Lorsqu'un courant direct est appliqué à une LED, la jonction de la LED génère de la chaleur, ce qui a pour effet d'augmenter la température de la jonction de la LED. Cette chaleur dépend non seulement du courant direct, mais aussi de la conception de la LED (liée à la résistance thermique).
- (b) L'impact de la dégradation : cela signifie que lorsque la dégradation se produit, elle augmente la température de la jonction de la LED.

Cette variation de température de jonction n'est pas totalement prise en compte dans le processus de dégradation conventionnel. Nous proposons ici de l'intégrer à nos modèles de dégradation en considérant l'impact de l'auto-échauffement sur le processus de dégradation du composant.

Tout d'abord, comme l'intensité lumineuse normalisée diminue au cours du temps sous une température de contrainte donnée, l'indicateur de dégradation de la LED est construit comme suit :

$$X(t) = 1 - \frac{P_{opt}(t)}{P_{opt}(0)} \quad (4.3)$$

Selon la théorie du taux de réaction d'Arrhenius [22], le taux de dégradation $\mu(T_k)$ sous la température de contrainte T_k peut être formulé par :

$$\mu(T_k) = \alpha \times \exp\left(-\frac{\beta}{T_j}\right) \quad (4.4)$$

Où

- T_j est la température de jonction.
- α et β représentent les caractéristiques du mécanisme de défaillance du composant et les conditions de test. La valeur de β peut être exprimée comme suit

$$\beta = \frac{E_a}{k_B}$$

4.3.1 Taux de dégradation modifié

Selon le phénomène d'auto-échauffement, illustré par l'augmentation de la température de la jonction, nous proposons ici un taux de dégradation modifié permettant de prendre en compte l'impact de l'auto-échauffement, c'est-à-dire l'augmentation de la température de la jonction. Ainsi, l'augmentation de la température de jonction, par rapport à la température de stress, peut être exprimée comme suit :

$$\Delta T(t) = a + f(X(t)) \quad (4.5)$$

où,

- a est un nombre réel non négatif et dépend du courant direct et des caractéristiques de la structure et du matériau de la LED. Dans cette étude, nous supposons que a est constant

si le courant direct est constant ; il peut être estimé dans l'étape d'analyse, section 2.3.4 du chapitre 2.

- $f(X(t))$ indique l'effet de l'état de dégradation, $X(t)$, sur le processus de dégradation de la LED.

En générale, l'effet de l'état de dégradation, $X(t)$, peut être décrit par l'Equation (4.6)

$$f(X(t)) = b.X^c(t) \quad (4.6)$$

Cependant, pour un modèle simplifié, nous proposons que l'effet de l'état de dégradation peut être décrit comme l'équation suivante :

$$f(X(t)) = b.X(t) \quad (4.7)$$

où b est un nombre réel non négatif qui qualifie l'influence de l'état de dégradation de la LED sur son taux de dégradation accélérée. Une explication détaillée est présentée en Annexe A.

D'après les Équations (4.5) et (4.7), la température de jonction peut être calculée par :

$$\mathcal{T}_j = T_k + \Delta\mathcal{T} = T_k + a + b.X(t) \quad (4.8)$$

Ainsi, la formulation du taux de dégradation de la LED peut être étendue en considérant l'auto-échauffement comme suit :

$$\mu(T_k, t) = \alpha \times \exp\left(-\frac{\beta}{T_k + a + b.X(t)}\right) \quad (4.9)$$

Ce modèle indique en quelque sorte l'effet des impacts d'influence sur l'état du composant, c'est-à-dire que l'évolution de la dégradation dépend du niveau de dégradation actuel [42, 106]. Ceci nous permet à la suite de développer un modèle de dégradation en prenant en compte l'impact d'auto-échauffement sur un élément isolé.

4.3.2 Modèle de dégradation modifié

A ce stade, nous modélisons l'impact du phénomène d'auto-échauffement dans le processus de dégradation accélérée de la LED. À partir du taux de dégradation, l'Équation (4.9), l'évolution du processus de dégradation en tenant compte de l'impact de l'auto-échauffement doit être un modèle d'état à temps continu. Donc, en regardant le modèle physique donné dans la section 3.2.1, nous proposons d'utiliser une équation différentielle stochastique (Stochastic differential equation - SDE) modifiée, qui peut être considérée comme un cas particulier des modèles d'espace d'état à temps continu, pour modéliser le processus de dégradation [128]. L'avantage d'utiliser le modèle SDE est qu'il fournit un modèle mathématiquement efficace pour décrire et capturer les interactions entre les taux de dégradation des composants [42].

$$dX(t) = \mu(T_k, t).dt + \sigma.dB(t) \quad (4.10)$$

où $B(t)$ est un mouvement brownien standard avec les propriétés suivantes :

- $B(0) = 0$, où $B(t) \in [0, \infty)$;
- Station et incréments indépendants, à savoir $B(t + \Delta t) - B(t) \sim N(0, \Delta t)$;
- σ est le paramètre de diffusion, σ est une constante et $\sigma > 0$.

Notons cependant que la détermination de la formulation analytique de $X(t)$ basé sur l'Équation (4.9) et (4.10) est très difficile à obtenir [128]. Afin de déterminer la formulation analytique du modèle de dégradation et estimer des paramètres du modèle, nous proposons donc d'utiliser

une approximation par la série de Taylor, auquel cas le taux de dégradation du composant peut être exprimé par :

$$\mu(T'_k, t) = \alpha \cdot \left[e^{\left(-\frac{\beta}{T'_k}\right)} + b \times \frac{\beta}{T'_k{}^2} \cdot e^{\left(-\frac{\beta}{T'_k}\right)} \times X(t) \right] \quad (4.11)$$

où, $T'_k = T_k + a$.

Une comparaison des taux de dégradation entre l'approximation et la valeur exacte, qui a été fait par la simulation, a montré qu'une erreur relative à 5% lorsque la valeur de $f(X(t))$ est moins de $15^\circ C$

En utilisant l'Équation (4.10), l'Équation (4.11) peut être écrite comme suit :

$$dX(t) = \lambda \cdot [\kappa + X(t)] dt + \sigma \cdot dB(t) \quad (4.12)$$

où,

$$\kappa = \frac{T'_k{}^2}{b\beta} \quad (4.13)$$

$$\lambda = b \times \frac{\alpha\beta}{T'_k{}^2} \cdot \exp\left(-\frac{\beta}{T'_k}\right) \quad (4.14)$$

Ici, nous trouvons la solution explicite de l'Équation (4.12). Afin de résoudre l'équation SDE, nous introduisons alors certaines transformations comme suit :

— L'expression $\exp(-\lambda \cdot s)$ satisfait l'équation suivante :

$$d\exp(-\lambda \cdot s) = -\lambda \times \exp(-\lambda \cdot s) ds \quad (4.15)$$

— Ensuite, nous considérons la différence de $\exp(-\lambda \cdot s) \times X(s)$. En utilisant la formule d'Ito [129], nous avons :

$$d(\exp(-\lambda \cdot s) \times X(s)) = -\lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot s) \cdot X(s) \cdot ds + \exp(-\lambda \cdot s) \times dX(s) \quad (4.16)$$

— Alors, nous avons

$$\begin{aligned} d(\exp(-\lambda \cdot s) \times X(s)) &= -\lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot s) \cdot X(s) \cdot ds \\ &+ \exp(-\lambda \cdot s) [\lambda \cdot [\kappa + X(s)] ds + \sigma \cdot dB(s)] \\ &= \exp(-\lambda \cdot s) \cdot \lambda \cdot \kappa \cdot ds + \sigma \cdot \exp(-\lambda \cdot s) \cdot dB(s) \end{aligned} \quad (4.17)$$

— En intégrant les deux côtés de 0 à t, nous avons :

$$\exp(-\lambda \cdot t) \times X(t) - X(0) = \int_0^t \exp(-\lambda \cdot s) \cdot \lambda \cdot \kappa \cdot ds + \int_0^t \sigma \cdot \exp(-\lambda \cdot s) \cdot dB(s) \quad (4.18)$$

— Donc,

$$X(t) = \exp(\lambda \cdot t) \cdot X(0) + \int_0^t \exp[\lambda \cdot (t - s)] \cdot \lambda \cdot \kappa \cdot ds + \int_0^t \sigma \cdot \exp[\lambda \cdot (t - s)] \cdot dB(s) \quad (4.19)$$

Enfin, le modèle de dégradation du composant qui tient compte de l'auto-échauffement est trouvé comme solution explicite de l'Équation (4.12), [42] :

$$X(t) = X(0) \cdot e^{\lambda \cdot t} + \kappa (e^{\lambda \cdot t} - 1) + \int_0^t \sigma \cdot e^{\lambda(t-s)} dB(s) \quad (4.20)$$

Dans le cas où l'auto-échauffement n'est pas pris en compte, le modèle de dégradation de l'élément se construit à partir de l'Équation (4.2).

4.3.3 Modèle de calcul de la fiabilité d'un élément optoélectronique

En regardant le processus de dégradation développé dans la section précédente, cela nous permet de calculer la fiabilité d'un élément isolé. Le temps de défaillance est défini comme le temps de passage du processus de dégradation stochastique dépassant la valeur du seuil de défaillance D . La fonction de distribution cumulative de la défaillance peut alors être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} F(t) &= P(X(t) > D) \\ &= \Phi\left(\frac{E(X(t)) - D}{\sqrt{Var(X(t))}}\right) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Puis, la fiabilité du composant en prenant en compte l'auto-échauffement peut être évaluée par :

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{E(X(t)) - D}{\sqrt{Var(X(t))}}\right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

où $E(X(t))$, $Var(X(t))$ sont respectivement l'espérance mathématique et la variance de $X(t)$.

$$\begin{aligned} E(X(t)) &= E\left(X(0).e^{\lambda.t} + \kappa(e^{\lambda.t} - 1)\right) \\ &\quad + E\left(\int_0^t \sigma.e^{\lambda(t-s)} dB(s).ds\right) \end{aligned} \quad (4.23)$$

Notons que $E(X(0).e^{\lambda.t} + \kappa(e^{\lambda.t} - 1))$ sont des valeurs déterministes pour tous t donnés, alors que $E\left(\int_0^t \sigma.e^{\lambda(t-s)} dB(s).ds\right) = 0$. Donc,

$$E(X(t)) = X(0).e^{\lambda.t} + \kappa(e^{\lambda.t} - 1) \quad (4.24)$$

La variance de $X(t)$ peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} Var(X(t)) &= Var\left(\int_0^t \sigma.exp(\lambda(t-s)) dB(s).ds\right) \\ &= \sigma^2 \times \int_0^t exp(2.\lambda(t-s)).ds \\ &= \frac{\sigma^2}{2.\lambda} (exp(2.\lambda.t) - 1) \end{aligned} \quad (4.25)$$

4.3.4 Estimation des paramètres du modèle de dégradation

Le modèle proposé sur l'Equation (4.20) de la section 4.3.2 est caractérisé par un ensemble de paramètres $\theta = \{\alpha, \beta, a, b, \sigma\}$ qui doivent être estimés à partir des données expérimentales grâce au banc d'expérimentation détaillé dans la section 2.3.1 du chapitre 2. Notons que "a" peut être directement estimé avec l'étape analytique décrite dans la section 2.3.4 [130]. Pour estimer les paramètres restants (α, β, b, σ) à partir des données expérimentales, nous développons ici une

approche d'estimation basée sur le maximum de vraisemblance discrète (DML) [131, 42]. En effet, le niveau de dégradation au temps t peut être exprimé par :

$$X(t_j) = X(t_{j-1}) + \kappa \left(e^{\lambda \cdot \Delta t} - 1 \right) + e^{\lambda \cdot \Delta t} \cdot X(t_{j-1}) + \sigma^* \cdot dB(t_j) \quad (4.26)$$

où,

$$(\sigma^*)^2 = \frac{\sigma^2}{2 \cdot \lambda} \left(e^{2 \cdot \lambda \cdot \Delta t} - 1 \right) \quad (4.27)$$

Supposons que des signaux de dégradation soient surveillés à des instants séparés, et $\Delta t = t_j - t_{(j-1)}$ est la fréquence de mesure et Δt est suffisamment petit. Selon l'intégrale stochastique d'Ito [129], la densité de probabilité conditionnelle d'une observation $X(t_j)$ étant donné l'observation précédente $X(t_{j-1})$, avec Δt étant le pas de temps, est donnée par

$$f(X(t_j)|X(t_{j-1}), \kappa, \lambda, \sigma^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi (\sigma^*)^2}} * \exp \left(- \frac{[X(t_j) - \kappa (e^{\lambda \cdot \Delta t} - 1) - e^{\lambda \cdot \Delta t} \cdot X(t_{j-1})]^2}{2 (\sigma^*)^2} \right) \quad (4.28)$$

Ensuite, la fonction de log-vraisemblance d'une donnée d'observation peut être la suivante :

$$l(\alpha, \beta, b, \sigma) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{m_k} \ln (f(X(t_j)|X(t_{j-1}), \alpha, \beta, b, \sigma)) \quad (4.29)$$

Les dérivations partielles pour l'estimation du maximum de vraisemblance sont requises et fixées à zéro, c'est-à-dire,

$$\begin{aligned} \frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \alpha} &= 0 \\ \frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \beta} &= 0 \\ \frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial b} &= 0 \\ \frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \sigma} &= 0 \end{aligned} \quad (4.30)$$

En utilisant une méthode numérique pour les équations algébriques non linéaires, les paramètres $(\alpha, \beta, b, \sigma)$ peuvent être obtenus en résolvant intégralement les équations aux dérivées partielles à l'aide d'une procédure MATLAB de la méthode simplex de Nelder-Mead [132]. Un développement mathématique détaillé de l'Équation (4.30) est présenté dans l'Annexe B.

Enfin, la fiabilité de l'élément est calculé à partir la valeur des paramètres du modèle de dégradation et l'Equation (4.22).

4.4 Validation du modèle de dégradation proposé

Dans cette section, un plan de test accéléré (sans qu'il soit optimal) sur des LED est appliqué pour évaluer pour évaluer leur fiabilité afin de valider le modèle de dégradation en considérant l'auto-échauffement.

Le choix des conditions de températures, T_k avec $k = 1, 2$, ont été choisies en restant dans les gammes de températures de fonctionnement préconisées par le fabricant pour la LED [126]. Les conditions des tests desquels sont issues les données sont indiquées dans le Tableau 4.3. Dans ce cas, le courant d'alimentation est fixé à 350 mA pour tous les tests.

TABLE 4.3 – Conditions de test pour les LED Cree EZ1000

Termes	Conditions du test
Durée du test	1500 h
Intervalle de collecte des données	Minimum à toutes les 48h
Courant d'entrée	350mA
Température d'étuves	
T_1	$85^{\circ}C(358^{\circ}K)$
T_2	$100^{\circ}C(373^{\circ}K)$
Taille de l'échantillon	9 LED sous T_1 et 10 LED sous T_2

4.4.1 Évaluation des mesures optiques au cours du vieillissement

Notre expérience a été réalisée pour 19 LEDs pendant 1500 heures avec deux niveaux de stress de test (9 LEDs avec $T_1 = 85^{\circ}C$ et 10 LEDs avec $T_2 = 100^{\circ}C$). La puissance optique, notée $P_{opt}(t)$, a été mesurée toutes les 48 heures. Pour mieux montrer l'évolution de la puissance optique dans le temps, nous avons utilisé le normalisé ($\phi(t)$) qui est définie comme le rapport entre la puissance optique ($P_{norm}(t)$) et sa valeur initiale $P_{norm}(0)$. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4.9.

$$\phi(t) = \frac{P_{opt}(t)}{P_{opt}(0)} \quad (4.31)$$

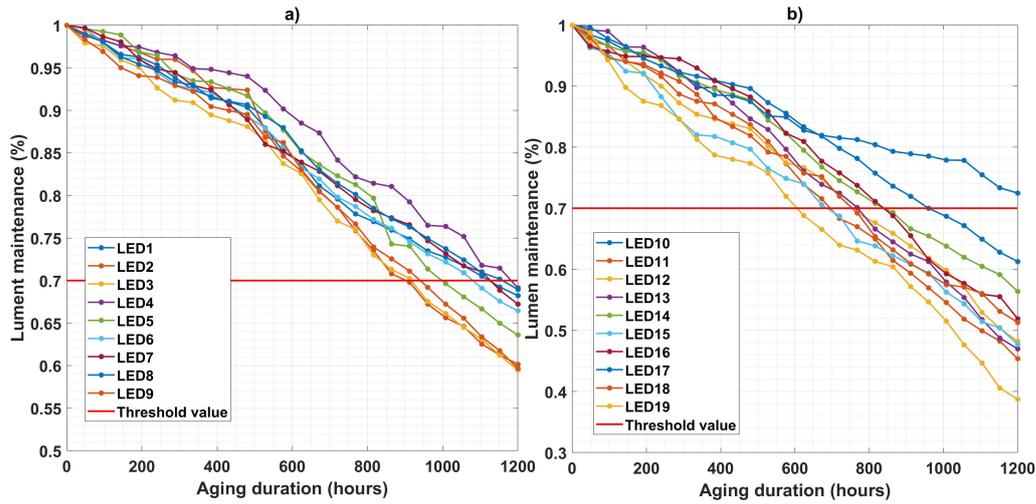


FIGURE 4.9 – Dégradation de la puissance optique sous deux conditions de température ; a) $T_1 = 85^{\circ}C$; b) $T_2 = 100^{\circ}C$

Comme l'intensité lumineuse normalisée diminue sous une température de contrainte donnée, l'indicateur de dégradation, $X(t)$, de la LED est un processus croissant, voir la Figure 4.10.

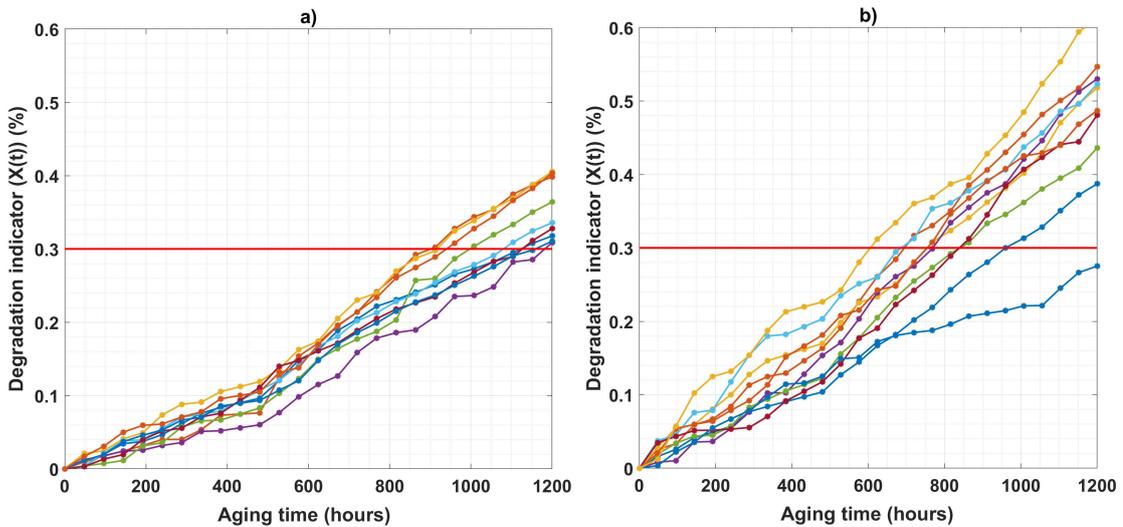


FIGURE 4.10 – Indicateur de dégradation à deux conditions de stress ; a) $T_1 = 85^\circ C$; b) $T_2 = 100^\circ C$

Il est montré que sous une contrainte de température, la puissance optique diminue avec le temps. Il est donc important de modéliser cette évolution afin de prédire le temps de défaillance de la LED sous une température de contrainte donnée. Ainsi, une évaluation de la température de jonction est présentée dans la partie suivante afin de développer le modèle de dégradation pour le processus de la puissance optique.

4.4.2 Impact du courant d'alimentation sur la température de jonction

Nous analysons ici la variation de la température de jonction de la LED à l'aide d'une caméra infrarouge. La Figure 4.11 indique l'image thermique en unité arbitraire (DLs) prise avant (Figure 4.11.a) et après application du courant d'alimentation de 350 mA (Figure 4.11.b). Nous pouvons constater un éclaircissement de la zone centrale de la puce avec l'application d'un courant de 350 mA aux bornes de la LED, démontrant une augmentation de la température de la LED. En effet, ce changement est converti en incrément de température en utilisant l'Équation (2.7) (section 2.3.4). Le Tableau 4.4 rapporte les moyennes de la température converties pour 19 composants de LEDs dans notre expérimentation.

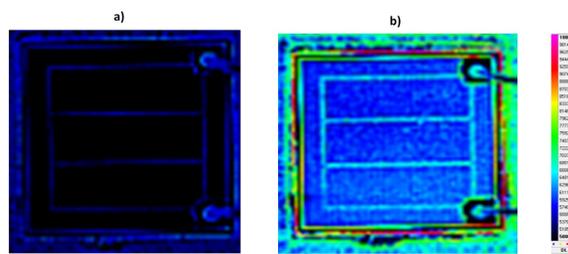


FIGURE 4.11 – Analyse thermique d'une LED : a) sans courant direct et b) avec courant direct à 350mA

TABLE 4.4 – Augmentation de la température de la jonction due au courant d'alimentation

LED	ΔT [$^{\circ}C$]	LED	ΔT [$^{\circ}C$]
1	12.0	11	8.9
2	10.9	12	11.3
3	8.3	13	8.4
4	11.0	14	8.5
5	12.3	15	8.8
6	10.7	16	7.6
7	11.5	17	12.0
8	11.0	18	10.5
9	9.6	19	9.0
10	10.4		

Par conséquent, sur la base des résultats obtenus dans le Tableau 4.4, nous avons constaté une augmentation de la température de jonction avec une moyenne de 10,14 degrés et un écart type de 1,14 degré. Ainsi, avec un courant d'alimentation de 350 mA, la température de jonction devient 95,14 $^{\circ}C$ et 110,14 $^{\circ}C$ lorsque les conditions de contrainte de 85 $^{\circ}C$ et 100 $^{\circ}C$, respectivement, sont appliquées. L'impact du courant d'alimentation sur sa température de jonction est modélisé et présenté dans la section suivante.

4.4.3 Impact de la dégradation de puissance optique sur la température de jonction

La Figure 4.12 présente les différentes images en unités (DL) fournies par la caméra infrarouge à différents instants t (avant le test d'accélération $t = 0$, $t = 576h$, $t = 720h$ et $t = 1500h$) pour une même LED. Il est montré que la température de jonction de la LED augmente pendant le test d'accélération.

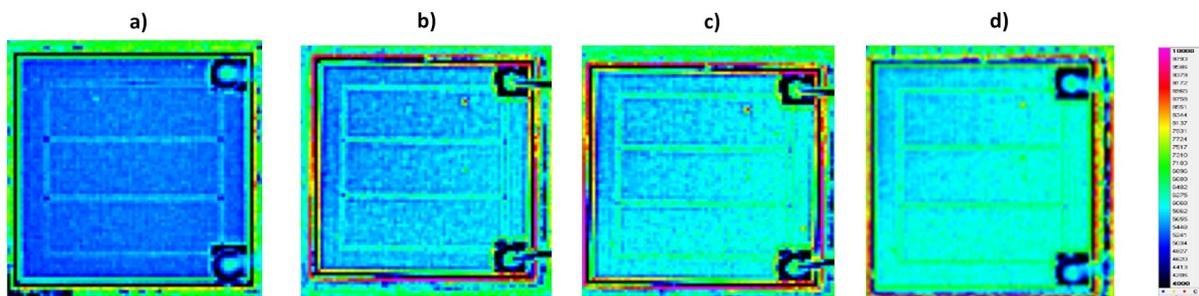


FIGURE 4.12 – Analyse thermique d'une LED avec un courant d'alimentation à 350 mA : a) avant le test ; b) à 576 heures ; c) à 720 heures et d) à 1500 heures

En effet, à partir de ces images thermiques pour toutes les LEDs, l'augmentation de la température de jonction de la LED est évaluée en utilisant le protocole présenté dans la section 2.3.4 du Chapitre 2. Les résultats obtenus sont reportés dans les Tableaux 4.5 et 4.6.

TABLE 4.5 – Augmentation de la température de jonction due à la dégradation des LEDs sous une contrainte de $T = 85^{\circ}C$

Composant	$\Delta T(t)$ [$^{\circ}C$]			
	$t = 0h$	$t = 576h$	$t = 720h$	$t = 1500h$
1	0	2.4	3.4	5.7
2	0	2.5	3.6	7.0
3	0	2.7	3.8	7.2
4	0	1.6	2.6	5.5
5	0	2.0	3.0	6.2
6	0	2.4	3.4	6.0
7	0	2.5	3.3	5.7
8	0	2.2	3.9	7.0
9	0	2.3	3.7	5.3
Average	0	2.28	3.41	5.5

TABLE 4.6 – Augmentation de la température de jonction due à la dégradation des LEDs sous une contrainte de $T = 100^{\circ}C$

Composant	$\Delta T(t)$ [$^{\circ}C$]			
	$t = 0h$	$t = 576h$	$t = 720h$	$t = 1500h$
1	0	2.6	3.8	6.7
2	0	3.8	5.3	9.5
3	0	3.7	4.7	9.0
4	0	3.5	4.5	9.2
5	0	3.0	4.3	7.8
6	0	4.2	5.2	9.2
7	0	2.9	4.0	8.3
8	0	2.5	3.1	5.8
9	0	3.7	4.7	8.7
10	0	4.8	6.0	10.5
Average	0	3.47	4.56	8.47

Ensuite, en regardant la dégradation de puissance optique, voir Figure 4.9, ce résultat peut être considéré comme compatible avec le problème mentionné ci-dessus concernant l'augmentation de la température de jonction due à la dégradation de la LED. La température est aussi considérée comme un facteur d'influence d'importance qui affecte la dégradation de la LED ; donc, une augmentation de la température de jonction va forcément augmenter le stress de la jonction et donc accélérer le vieillissement. Par conséquent, en raison de l'impact de la dégradation, il existe une boucle de stress thermique, soumise à un auto-échauffement sur la LED, qui affecte le processus de dégradation de la LED dans le temps.

Dans les sections suivantes, nous analysons certains résultats obtenus en appliquant le modèle de dégradation proposé (Équation (4.20)) à notre jeu de données expérimental.

4.4.4 Estimation des paramètres du modèle de dégradation

Précédemment, nous avons proposé un modèle de dégradation modifié qui tient compte de l'auto-échauffement du composant. Ensuite, des données expérimentales ont montré qu'il existe

une boucle de stress thermique, soumise à un auto-échauffement sur la LED. Donc, nous allons chercher à estimer les paramètres du modèle de dégradation modifié en utilisant des données expérimentales de la LED.

Tout d'abord, a peut être estimé par le fait que le courant d'alimentation à 350mA conduit à une augmentation de 10 degrés de la température de jonction (voir la section 2.3.4 et 4.4.2), c'est-à-dire, $\hat{a} = 10$. Les autres paramètres α, β, b, σ sont estimés par l'approche d'estimation présentée dans la section 4.3.4. Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 4.7. En particulier, le taux de décroissance suivant la convention ADT sous deux contraintes de température $85^{\circ}C$ et $100^{\circ}C$ est trouvé à $3.5 \times 10^{-4}, 5.7 \times 10^{-4}$, respectivement.

TABLE 4.7 – Paramètres d'estimation

Terms	Paramètres	
	Moyenne	std
$\hat{\alpha}$	4.5	0.1
$\hat{\beta}(\times 10^3)$	3.6	0.2
\hat{a}	10	2
\hat{b}	16.78	2.72
$\hat{\sigma}$	0.002	-

4.4.5 Analyses comparatives

Suite aux paramètres estimés dans le Tableau 4.7, nous pouvons calculer la fonction de distribution cumulative (CDF) et la comparer avec les données expérimentales.

Tout d'abord, la puissance optique des LED, voir Figure 4.9, s'est dégradée à 70% de sa valeur initiale. Ainsi, les t_{L70} de chaque LED sous deux niveaux de contrainte ($T_1 = 85^{\circ}C, T_2 = 100^{\circ}C$) sont données dans le Tableau 4.8 et le Tableau 4.9 respectivement.

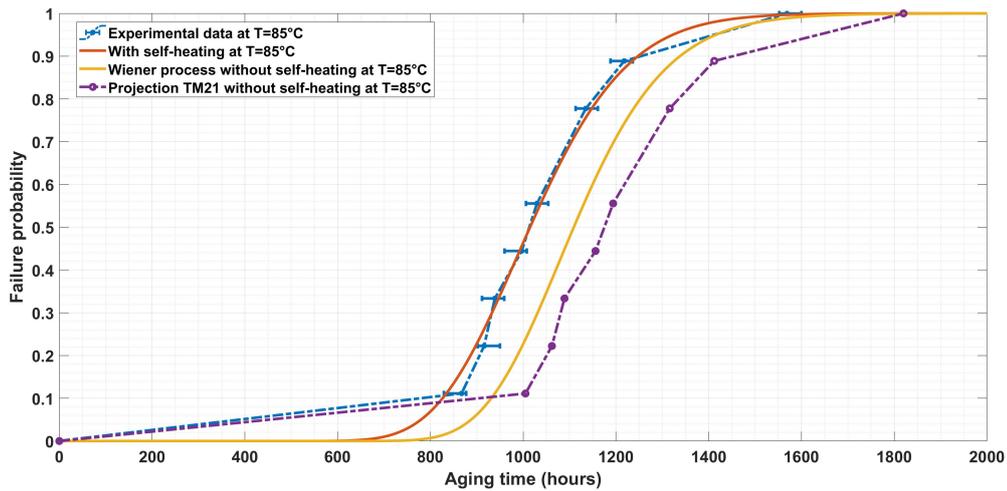
TABLE 4.8 – Résultat du test d'accélération sous contrainte $T_1 = 85^{\circ}C$

Élément	t_{L70} [h]	Incertitude [h]
1	867	[-38, +10]
2	916	[-14, +34]
3	939	[-28, +20]
4	997	[-37, +11]
5	1030	[-24, +24]
6 et 7	1135	[-22, +26]
8	1218	[-30, +18]
9	1569	[-17, +31]

TABLE 4.9 – Résultat du test d'accélération sous contrainte $T_2 = 100^\circ C$

Élément	t_{L70} [h]	Incertitude[h]
1	605	[-30, +18]
2 et 3	681	[-20, +28]
4	712	[-23, +25]
5	754	[-25, +23]
6	769	[-18, +30]
7	840	[-25, +23]
8	912	[-37, +11]
9 et 10	1230	[-18, +30]

Selon l'Équation (4.21), la fonction de distribution cumulative (CDF) basée sur le modèle de dégradation proposé est calculée en utilisant les paramètres estimés indiqués dans le tableau 4.7. Les résultats obtenus sont ensuite comparés aux données expérimentales dans les tableaux 4.8 et 4.9, voir les figures 4.13 et 4.14.

FIGURE 4.13 – Fonction de défaillance cumulée de la LED selon l'Équation (4.21) comparée aux valeurs expérimentales sous contrainte à $85^\circ C$

On constate que la CDF basée sur le modèle de dégradation proposé, qui prend en compte l'auto-échauffement, s'adapte bien aux valeurs expérimentales. Une erreur moyenne est de 57h et 30h en comparant avec les valeurs expérimentales, pour la température à $T_1 = 85^\circ C$ et $T_2 = 100^\circ C$. En revanche, sans tenir compte de l'auto-échauffement, le modèle conventionnel ADT conduit à une erreur, de 133h et 110h sous les contraintes $T_1 = 85^\circ C$ et $T_2 = 100^\circ C$, notamment dans le calcul de la CDF.

De plus, la Figure 4.15 présente la fiabilité de la LED avec et sans considération de l'auto-échauffement sous la température de contrainte à $T_1 = 85^\circ C$ et $T_2 = 100^\circ C$. Les résultats obtenus montrent que la non-prise en compte de l'impact de l'auto-échauffement dans le processus de dégradation d'une LED conduit à une erreur significative dans l'évaluation de la fiabilité de la LED.

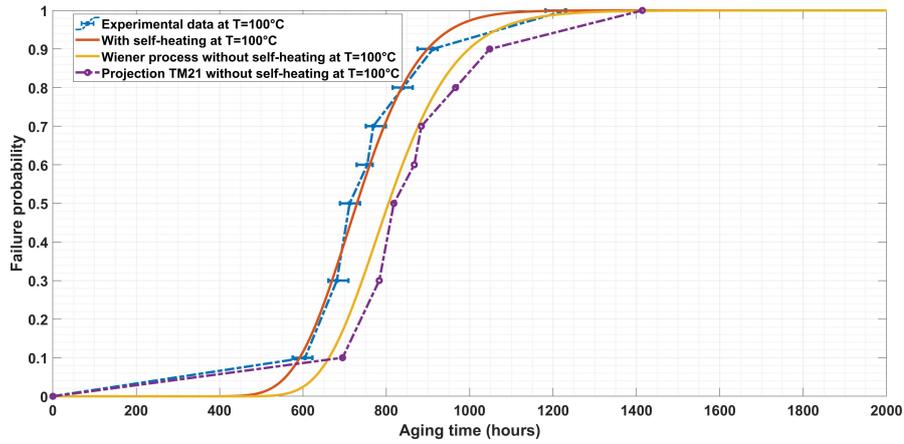


FIGURE 4.14 – Fonction de défaillance cumulée de la LED selon l'Équation (4.21) comparée aux valeurs expérimentales sous contrainte à $100^{\circ}C$.

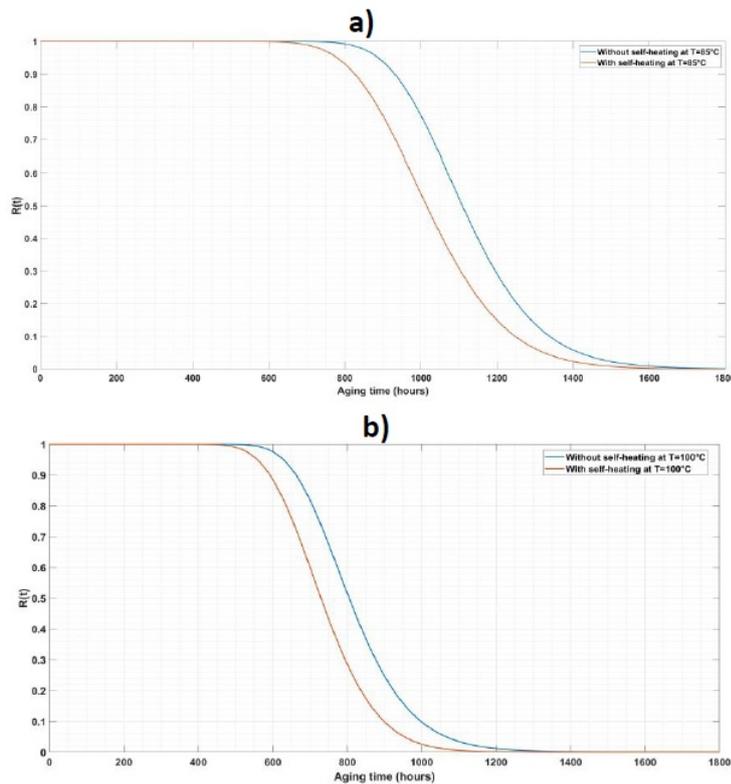


FIGURE 4.15 – Fiabilité des LED sous contrainte à a) $85^{\circ}C$; b) $100^{\circ}C$

4.4.5.1 Évolution de la température de jonction

À titre d'illustration, la Figure 4.16 présente les évolutions simulées de la température de jonction en fonction du temps en utilisant le modèle proposé avec les paramètres estimés qui sont reportés dans le Tableau 4.7.

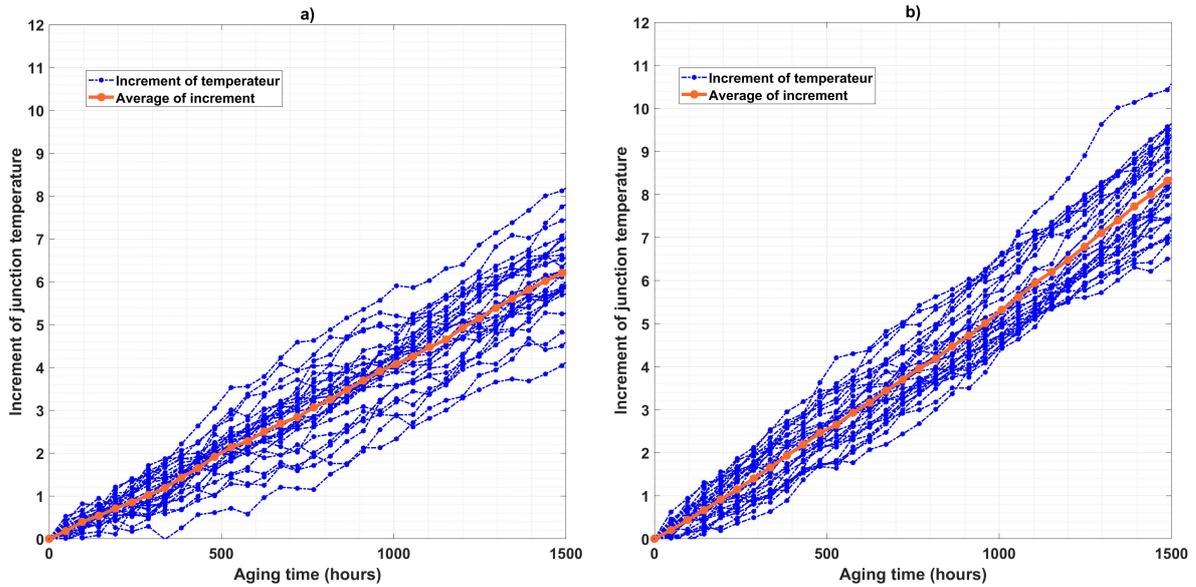


FIGURE 4.16 – Évolution simulée de la température de jonction avec a) $T_1 = 85^\circ\text{C}$ et b) $T_2 = 100^\circ\text{C}$.

Le Tableau 4.10 rapporte les incréments moyens simulés sur la température de jonction à plusieurs points de temps t ($t = 0\text{h}, 576\text{h}, 720\text{h}, 1500\text{h}$).

TABLE 4.10 – **Incrément de la température de jonction obtenu à partir des simulations**

		$\Delta T(t)$ [$^\circ\text{C}$]			
Stress		t = 0h	t = 576h	t = 720h	t = 1500h
85°C	Simulation	0	2,28	3,29	6,23
	Expérimentation	0	2,28	3,41	5,5
100°C	Simulation	0	3,43	5,53	8,37
	Expérimentation	0	3,47	4,56	8,47

Ici, nous avons remarqué que les résultats simulés sont très proches des résultats expérimentaux (voir Tableaux 4.5 et 4.6).

4.4.5.2 Analyse de sensibilité aux échantillons de données

Nous cherchons notamment à examiner l'impact de la durée de test (des échantillons de données) sur l'évaluation de la fiabilité ou la fonction de probabilité cumulative de défaillance (CDF) de la LED en gardant que la condition de test ne change pas pour les 19 LEDs. Pour ce faire, des données de deux durées de test sont utilisées. Le premier est constitué des données de 0 à 576h, noté Y_1 , et le second de 0 à 720h, noté Y_2 .

En utilisant les données expérimentales Y_1 et Y_2 , nous allons estimer le paramètre du modèle de dégradation proposé. Ensuite, les figures 4.17 et 4.18 présentent la CDF du modèle de dégradation proposé avec deux échantillons de données différents.

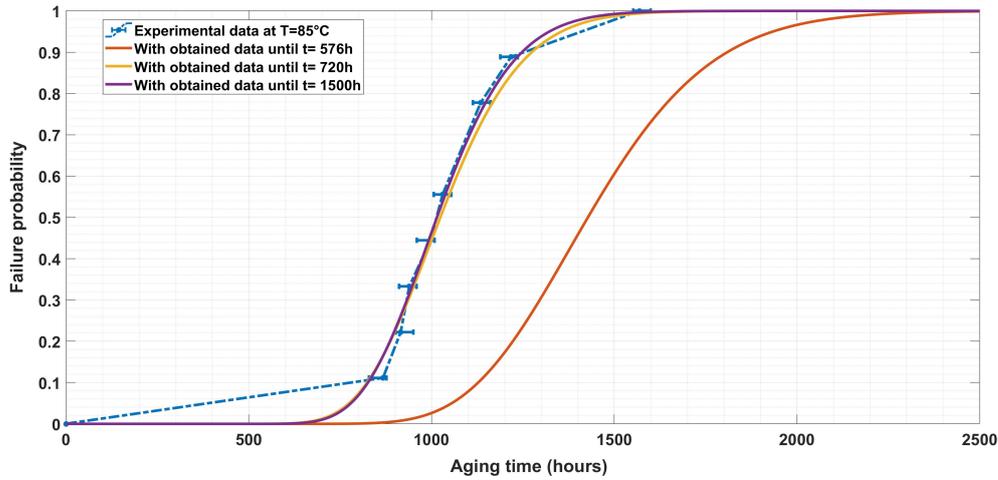


FIGURE 4.17 – Fonction de défaillance cumulée estimée avec différents échantillons de données sous contrainte à $85^{\circ}C$

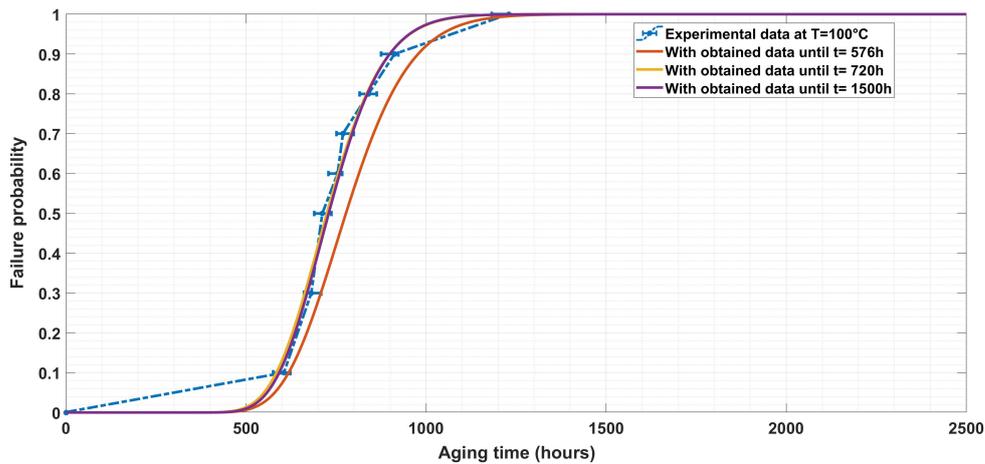


FIGURE 4.18 – Fonction de défaillance cumulée estimée avec différents échantillons de données sous contrainte à $100^{\circ}C$

Les résultats indiquent que la CDF construite avec une durée de test de 720h est bien proche des valeurs expérimentales, avec une erreur moyenne de 65h et 35h pour les contraintes à $T_1 = 85^{\circ}C$ et $T_2 = 100^{\circ}C$. Elle est également très proche des résultats obtenus avec le jeu de données complet ($t = 1500h$). Par ailleurs, une erreur significative est obtenue en utilisant les données avec la durée de test de 576h. Ceci peut s'expliquer par le fait que les données avec une durée de test de 576h ne sont pas suffisantes pour fournir de bons estimateurs alors qu'un jeu de données accéléré jusqu'à $t = 720h$ est tout à fait suffisant pour obtenir un bon estimateur qui permet d'obtenir une bonne précision pour l'évaluation de la fiabilité de la LED. C'est un résultat intéressant qui nous permet d'arrêter le test accéléré à partir de $t = 720h$ tout en assurant la précision de l'évaluation de la fiabilité du composant LED.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté l'architecture d'un élément optoélectronique disponible qui une LED Cree EZ1000 (déjà introduite dans le chapitre 2). Une analyse des impacts d'influence a été mise en place ensuite. Au travers de nos études bibliographiques, des résultats de la simulation multiphysique et des résultats des expérimentations, nous avons mis en évidence qu'il y a un phénomène d'auto-échauffement dans la LED.

Ensuite, basé sur l'idée de l'auto-échauffement, nous avons d'abord modélisé mathématiquement le taux de dégradation de l'élément LED avec la relation d'Arrhenius. Dans ce taux de dégradation, l'augmentation de la température de jonction du composant est proposée due à la contrainte de test et au comportement de dégradation du composant. Un nouveau modèle de dégradation accélérée a été proposé sur la base d'une équation stochastique différentielle. La fiabilité d'élément étudié a été formulée. Une approche d'estimation est également proposée pour estimer les paramètres du modèle développé. Les résultats obtenus, données réelles de 19 LEDs Cree EZ1000, indiquent que le modèle de dégradation proposé s'adapte bien aux données expérimentales. Il est également démontré que le fait de ne pas prendre en compte l'auto-échauffement peut conduire à une erreur significative dans l'évaluation de la fiabilité des éléments LED.

De plus, le développement d'un modèle de dégradation prenant en compte l'auto-échauffement basé sur le modèle homogène discuté au chapitre 3, le processus gamma, est notre priorité dans le futur. Il s'agit d'une autre approche du problème de la modélisation de la récession. En même temps, une approche basée sur les données peut être appliquée pour estimer les paramètres du modèle ainsi que la durée de vie de l'élément.

Les résultats de ce chapitre montrent que nos modèles de dégradation sont bien adaptés pour calculer la fiabilité des éléments en tenant compte du phénomène de l'auto-échauffement. Ceci est une étape importante pour optimiser la procédure de plan de test. Sur la base des résultats, nous développons dans le chapitre 6 la méthode de choix d'un plan de test optimal et de sa réalisation.

Chapitre 5

Extension du modèle de dégradation proposé dans le chapitre précédent pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique complexe

Sommaire

5.1	Introduction	101
5.2	Description d'un composant complexe	102
5.3	Modélisation des impacts de l'interaction entre éléments	103
5.3.1	Flux d'énergie dans les composants optoélectroniques complexes	103
5.3.2	Analyse de l'impact d'interaction entre éléments par la simulation multi-physique	104
5.4	Extension du modèle de dégradation considérant l'impact de l'interaction	108
5.4.1	Modèle de dégradation étendu au niveau élément	109
5.4.2	Estimation des paramètres du modèle de dégradation	111
5.5	Évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique	112
5.6	Illustration du modèle de dégradation proposé par un exemple numérique pour un composant complexe	112
5.6.1	Fiabilité du composant étudié à un niveau de température contrainte donné	114
5.6.2	Impacts des interactions sur la fiabilité du composant étudié	115
5.7	Conclusion	116

5.1 Introduction

Le cinquième chapitre traite de l'extension du modèle de dégradation proposé dans le chapitre 4 pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique "complexe". Ce chapitre propose par conséquent deux contributions scientifiques : l'extension de la contribution C1 pour l'investigation et la formulation des impacts de facteurs d'influence (l'auto-échauffement au niveau de l'élément et l'interaction d'états au niveau du composant) sur le processus de dégradation des éléments (ex. diode laser, photodiode) d'un composant optoélectronique; et l'extension de chacun des

modèles de dégradation proposés au niveau élément dans le chapitre 4 pour calculer la fiabilité d'un composant optoélectronique complexe constitué à partir de ses éléments (contribution C3).

Pour souligner l'existence de l'influence d'un composant sur un autre, la notion de composant optoélectronique "complexe" est décrite dans la section 5.2. Suite à la description du composant complexe et à la compréhension de ces propriétés, sur la base des études des flux d'énergie et des interactions possibles entre éléments du composant étudié, il est proposé dans la section 5.3 une modélisation et une quantification de l'effet des interactions sur la dégradation d'autres éléments. Ensuite, dans la section 5.4, un modèle de dégradation prenant en compte les interactions stochastiques entre éléments est développé pour chaque élément. Puis, le modèle de calcul de la fiabilité pour les deux niveaux d'élément et de composant "complexe" est étudié dans la section 5.5. Dans la section 5.6, un exemple numérique de calcul de la fiabilité sur un composant optoélectronique complexe est réalisé pour illustrer la faisabilité et les avantages des modèles proposés. Dans cette section, une ou, plusieurs analyses de sensibilité sont menées pour étudier l'impact de différents facteurs sur le modèle proposé. Enfin, les conclusions du chapitre sont données dans la Section 5.7.

5.2 Description d'un composant complexe

Pour l'évaluation de la fiabilité, le composant optoélectronique est généralement considéré comme une fonction simple pour faciliter le développement de modèles mathématiques crédible. L'évaluation de la fiabilité d'un composant unique peut être plus efficace en prenant en compte différents modes de défaillance concurrents. Cependant, du fait des récents progrès liés à leur intégration (hybridation, collage direct, TSV, etc.), les composants optoélectroniques deviennent de plus en plus complexes. Cette complexité peut provenir du nombre d'éléments, mais aussi de la structure des composants (par exemple, un émetteur-récepteur combine la diode laser, la photodiode, le modulateur, etc.) [133, 134, 135, 136, 137]. Donc, un composant complexe peut être défini comme le composant qui se compose d'un certain nombre d'éléments en interaction, considérés dans leur ensemble, pour prendre en charge une fonction prévue (voir le chapitre 1).

Vis-à-vis du calcul de la fiabilité, nous considérons un composant "complexe" comme composé de L éléments interdépendants. Le diagramme de bloc de fiabilité (RBD) est illustré à la Figure 5.1.

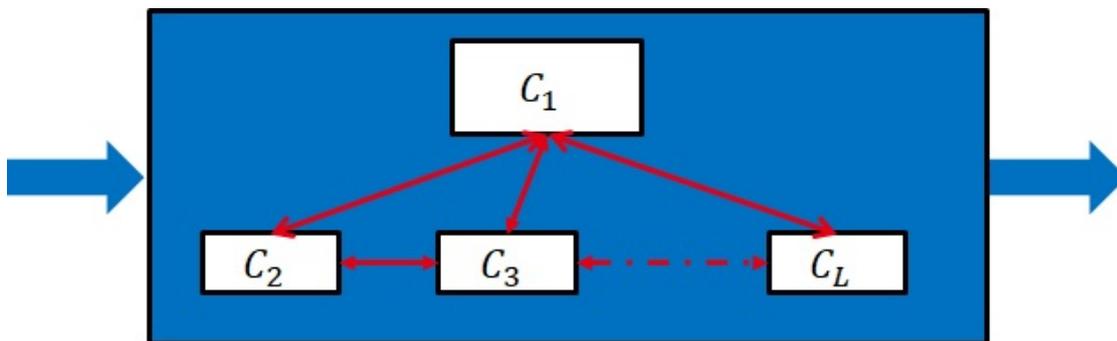


FIGURE 5.1 – Diagramme de blocs d'un composant complexe des L éléments

Compte tenu de cette composition complexe, trois aspects affectent la dégradation des éléments :

- Les facteurs environnementaux comme des contraintes accélérées (facteurs de stress)

- Les effets de la dégradation sur les éléments en eux même et sur d'autres éléments.
- Enfin, une défaillance de n'importe quel élément peut entraîner une défaillance du composant.

Comme mentionné chapitre 1 et chapitre 2, il existe actuellement deux approches pour combiner des éléments afin de créer un composant complexe : intégration monolithique et intégration hybride. Dans notre étude, en regardant l'intégration hybride, les éléments sont intégrés sur substrats en silicium sur isolant (SOI). Ce point d'intégration des éléments s'observe particulièrement dans le domaine de la photonique, au travers de la photonique sur silicium, mais aussi dans les domaines des télécoms, de la détection, de l'affichage... domaines dans lesquels les composants associent dans un même objet différents éléments actifs (puces LED ou laser, photodiodes...) et passifs (lentilles, guides d'onde, éléments de conversion de couleur...). La Figure 2.15 présente le schéma bloc de ce composant destiné à simuler une liaison optique simplifiée, et composé d'une diode laser III-V, une photodiode PIN germanium et un guide d'onde silicium.

Dans ce cas, c'est une diode laser à réflecteur de Bragg distribué (DFB), où le réseau DFB est gravé le long du guide d'ondes en silicium de 500 nm d'épaisseur sous les couches actives III-V. Les réseaux sont construits sous la zone de gain, dans le silicium également. Le guide d'onde en silicium est constitué d'une nervure de 200 nm d'épaisseur sur une plaque de 300 nm d'épaisseur, comme on peut le voir sur la coupe transversale du laser. En fonctionnement, la lumière émise par le laser passe par un guide d'onde en silicium et est collectée hors de la puce à l'aide d'un coupleur guide d'onde réseau de fibres. De plus, la lumière de la diode laser passe par le guide d'onde jusqu'au photodétecteur, dans lequel la photodiode agit comme un capteur qui surveille le système.

5.3 Modélisation des impacts de l'interaction entre éléments

5.3.1 Flux d'énergie dans les composants optoélectroniques complexes

La Figure 5.2 présente le flux d'énergie entre les éléments des composants optoélectroniques. Nous pouvons lister 3 types énergies existants sur les composants optoélectroniques, ce sont l'électrique, la lumière et les thermiques.

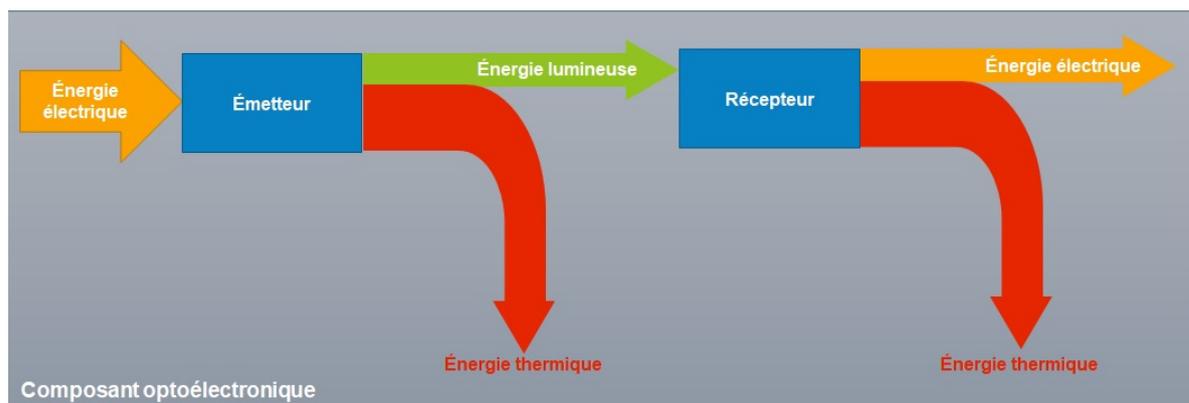


FIGURE 5.2 – Distribution de l'énergie dans un composant optoélectronique

Sur la base du flux d'énergie dans le composant optoélectronique, les interactions et les effets des différentes énergies sont résumés comme suit :

- **Interaction électrique** : Du fait de la séparation entre deux composants par des matériaux isolants, ainsi que par leur éloignement, l'interaction liée au courant électrique entre éléments du composant étudié a été négligée dans notre étude. Cependant, dans un élément, le courant entraîne **une augmentation de la température de jonction de l'élément**.
- **Interactions des rayonnements** : Quand des ondes optiques pénètrent dans un matériau, leur énergie peut être partiellement ou totalement absorbée. L'ampleur et le mécanisme de l'absorption dépendent de l'énergie du photon $h\nu$. Aux faibles énergies photoniques, la lumière est directement absorbée par le réseau cristallin (région de Reststrahlen). Aux énergies photoniques typiques, l'absorption par les porteurs libres domine, ce qui dissipe rapidement l'énergie vers le réseau en raison des temps de diffusion intra-bande très courts. L'absorption de bande à bande donne lieu à de nouvelles paires électron-trou (recyclage des photons), qui peuvent ou non générer de la chaleur par l'un des mécanismes ci-dessus. En fonction du modèle global de l'élément, l'absorption de bande à bande peut être **exclue en tant que source directe de chaleur**. En outre, certains effets de la lumière sur les éléments peuvent engendrer des effets d'ionisation, des dommages par déplacement [138, 139, 140, 141, 142, 143]. Cependant, ces études ont été réalisées sous l'influence de rayons X ou de rayons gamma, de sorte que ces effets n'ont pas été mentionnés dans cette thèse car il n'y a pas ou moins de rayon X dans ce type de composant étudié.
- **Interaction de thermique** : Comme indiqué dans la section 4.2.2 du chapitre 4, l'efficacité de conversion de puissance des optoélectroniques est généralement comprise entre 10% et 20%, et près de 80% de la puissance est transformée en chaleur. En fonction des différences de mécanismes de transfert, les sources de chaleur peuvent être séparées en chaleur Joule, chaleur de recombinaison électron-trou, chaleur de Thomson, et chaleur provenant de l'absorption optique [144, 51]. Un grand nombre de chaleurs s'accumule dans un élément si la chaleur n'est pas dissipée à temps, ce qui augmente la température de la jonction de l'élément, diminue l'efficacité de la conversion de puissance et peuvent engendrer des effets d'ionisation, des dommages par déplacement finalement la fiabilité (comme la durée de vie). Dans le même temps, la température haute et la chaleur produisent une interaction thermique avec un autre élément dans un composant optoélectronique, et peuvent conduire à une série de problèmes de fiabilité.

En général, l'effet du flux d'énergie sur et entre les éléments d'un composant optoélectronique est exprimé en termes d'énergie thermique. En effet, les éléments optoélectroniques sont également sensibles aux effets de la température pendant leur fonctionnement. Nous avons donc mis en évidence dans cette thèse qu'il y a une interaction de nature thermique entre éléments, sur notre composant étudié. Ce constat nous amène pour la suite de la thèse, à étudier la gestion thermique des composants optoélectroniques comme la contrainte majeure d'interaction à maîtriser au niveau composant.

5.3.2 Analyse de l'impact d'interaction entre éléments par la simulation multi-physique

À partir de l'hypothèse donnée dans la section 5.3.1, l'effet du flux d'énergie sur et entre les éléments du composant optoélectronique est exprimé en énergie thermique. Cette section vise à construire un modèle thermique dynamique de certains composants optoélectroniques pour l'environnement de simulation COMSOL. Ensuite, des détails sont donnés sur l'interaction de nature thermique entre éléments de notre composant étudié.

De plus, le modèle thermique dynamique est basé sur une application technique et réelle. Ainsi, le modèle électrique et thermique assemblé du composant optoélectronique a été simulé dans un processus dynamique de charge dans le programme de simulation COMSOL. La première étape consiste à créer un modèle géométrique. La structure du composant est donc présentée à la Figure 5.3 et les dimensions sont données dans la Table 5.1.

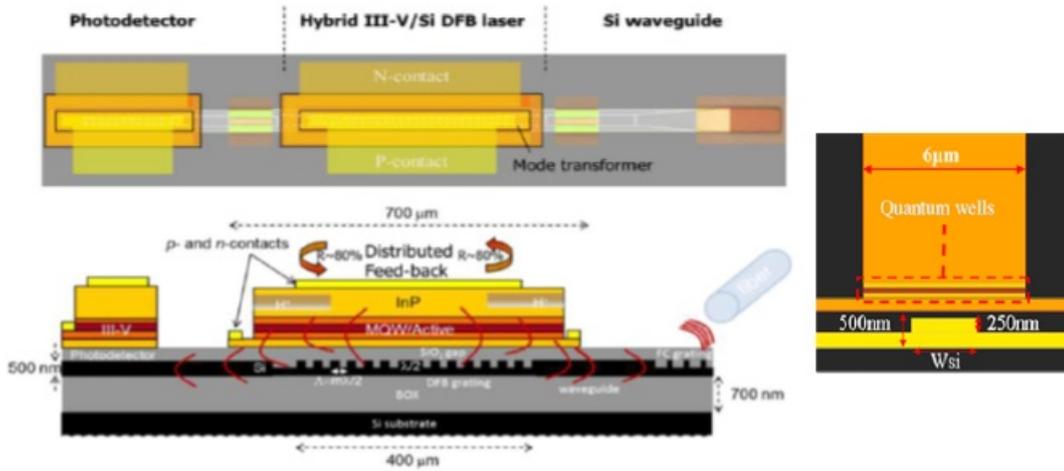


FIGURE 5.3 – Structure du composant complexe

Ce composant simule une liaison optique simplifiée et qui est composé d'une diode laser III-V, une photodiode PIN germanium et un guide d'onde silicium.

TABLE 5.1 – Dimensions de base du composant complexe

Localisation	Facteur d'accélération
Taille de la puce	$3500 \times 1500 \mu m$
Taille du pad laser	$500 \times 250 \mu m$
Taille du pad photodiode	$100 \times 100 \mu m$
Distance "grating coupler"/pad laser	$1800 \mu m$
Distance de la diode laser/photodiode	$150 \mu m$

En outre, la Figure 5.4 présente en détail la structure de la diode laser.



FIGURE 5.4 – Structure de la diode laser dans le composant complexe

a. Simplification de la géométrie

En utilisant le même protocole de simulation par COMSOL que dans la section 4.2.2 du chapitre 4, nous modélisons donc une structure simplifiée du composant présenté ci-dessus afin de faciliter la simulation tout en minimisant les erreurs dans les résultats. Après avoir discuté avec les experts du CEA, nous avons proposé une géométrie de simplification, tel que montré dans la Figure 5.5 :

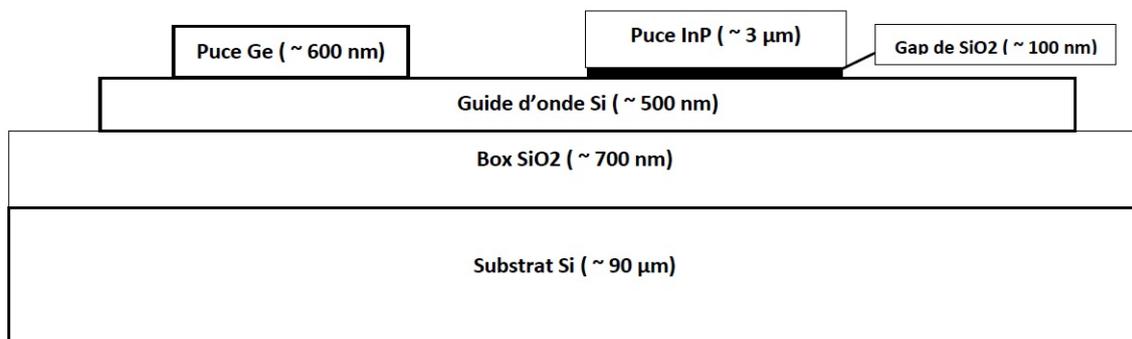


FIGURE 5.5 – Structure du composant complexe simplifiée

Les données de matériaux de conductivités thermiques utilisées sont celles du Tableau 5.2. Les conductivités thermiques sont considérées comme isotropes et indépendantes de la température. Ensuite, 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 0.17 W thermique sur la puce de LD, ce qui présente l'avantage d'obtenir directement la valeur des résistances thermiques par le relevé des températures après simulation. D'autre part, dans un souci de simplicité de calculs, nous avons imposé la température de la face arrière de structure à 0°C. Cela constitue la référence thermique.

TABLE 5.2 – Données matériaux et valeurs de thermique pour le composant complexe

Matériaux	Conductivité thermique($W/(m.K)$)	Capacité thermique($J/(Kg.K)$)
Puce InP	69	310
Puce Ge	60	310
Box SiO_2	1,4	730
Substrat Si	131	700

b. Présentation des résultats

La simulation thermique en mode de solution stationnaire est réalisée de la même manière que dans la section 4.2.2. Le résultat de la simulation est présenté dans la Figure 5.6. La structure interne du composant conduit à une augmentation de la température de 41 degrés dans la diode laser et de 4 degrés dans la photodiode. Donc, il y a un impact de thermique de la diode laser à la photodiode.

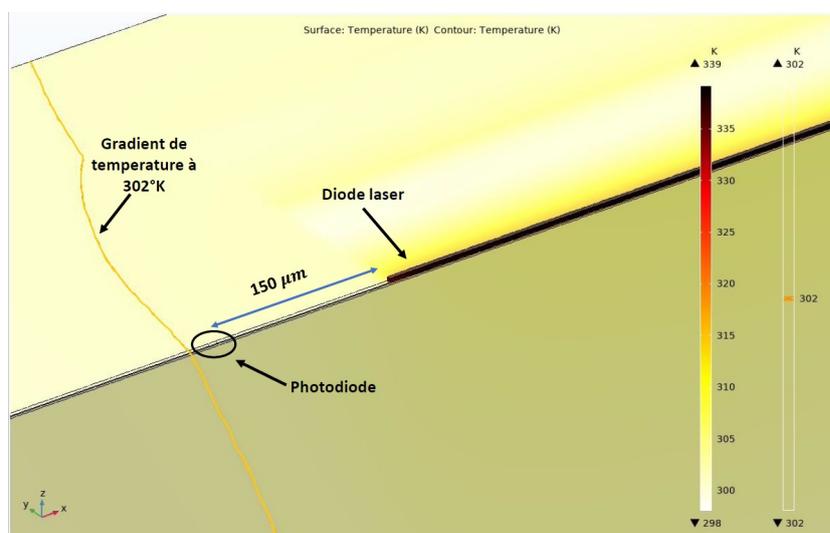


FIGURE 5.6 – Résultat de la simulation du transfert de chaleur avant le test de vieillissement

Ensuite, en supposant que la puissance électrique appliquée à la diode laser est constante et que la puissance lumineuse diminue avec le temps en raison de la dégradation, la puissance dissipée augmente donc avec le temps. Une diode laser est considérée comme défaillante lorsque sa puissance optique atteint un seuil critique, qui est d'environ 70% de la valeur initiale de leur puissance optique [28, 64]. C'est-à-dire que la puissance dissipée augmente d'environ de 30% de la valeur initiale. Le résultat de simulation est présenté à la Figure 5.7.

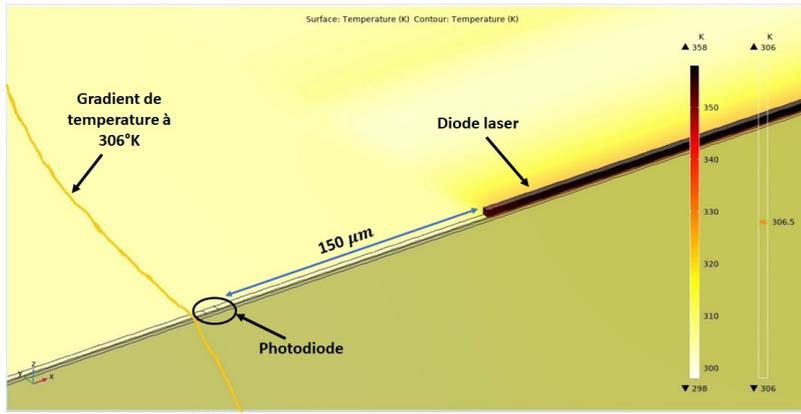


FIGURE 5.7 – Résultat de la simulation du transfert de chaleur après le test de vieillissement

Ce résultat montre que la diode laser, qui est alimentée par un courant d'alimentation, crée toujours de l'énergie thermique. Lorsque la dégradation d'élément se produit, la chaleur dissipée augmente en raison de la détérioration de ses performances. Cette chaleur influence la diode laser elle-même et les autres éléments (la photodiode). En particulier, lorsque nous appliquons un niveau de contrainte supérieur à la condition normale, par réaction chimique ou physique, la dégradation du composant est accélérée et crée davantage d'énergie thermique.

En complément, le Tableau 5.3 présente la température de la photodiode, avant et après le test accéléré, en fonction de la distance entre les deux éléments. Ce résultat présente que l'augmentation de la température de la photodiode est une équation linéaire pour la distance entre la photodiode et la diode laser.

TABLE 5.3 – Impact de température sur la photodiode en fonction de la distance photodiode/diode laser

	Température		
Distance (μm)	200	100	50
Avant le test	301	304	306
Après le test	304	307	309

Au global, ces simulations ont permis de montrer un échange thermique sur un composant étudié. Il faut aussi souligner qu'il y a une possibilité d'interaction de nature thermique entre éléments sur notre composant étudié. Ce constat nous permet d'envisager pour la suite de développer un modèle de calcul de la fiabilité au niveau élément ainsi qu'au niveau composant complexe en considérant l'interaction de nature thermique entre éléments et l'auto-échauffement.

5.4 Extension du modèle de dégradation considérant l'impact de l'interaction

Les études a priori des éléments et du composant complexe (voir la section 5.3) nous ont permis de nous focaliser sur l'auto-échauffement et l'interaction de nature thermique entre éléments du composant étudié. Le but de cette section est dans la continuité de développer le modèle de dégradation d'un composant complexe, qui doit être associé à un modèle d'estimation de la fiabilité du composant.

5.4.1 Modèle de dégradation étendu au niveau élément

Il est évident que chaque composant et ses éléments peuvent se comporter différemment lorsqu'ils sont utilisés. La structure du composant consiste en L éléments. Les éléments sont interdépendants et affichent une interaction au niveau du taux de dégradation (Figure 5.1). Grâce aux études menées dans la section 5.3, il nous est permis de modéliser la dégradation au niveau élément avec une interaction de nature thermique entre éléments du composant.

Ensuite, il est montré que la présence d'auto-échauffement et l'interaction thermique entre éléments du composant étudié résultent d'une augmentation de la température de jonction des éléments. L'augmentation de la température de jonction d'un élément peut alors être divisée en deux parties liées à la puissance dissipée et l'impact de la dégradation. De cette façon, nous supposons que le facteur d'influence à l'élément i est lié à une augmentation de la température, $\Delta T_i(t)$, qui accélère la dégradation de l'élément. En cohérence avec l'explication donnée ci-dessus, $\Delta T_i(t)$ peut être exprimée comme suit :

$$\Delta T_i(t) = a_i + f(X(t)) \quad (5.1)$$

- a_i dépend de la conception et du matériau de l'élément ainsi que du courant appliqué. Dans cette étude, nous supposons que a_i est constant lorsque le courant appliqué est constant ; cette hypothèse peut être validée a posteriori par analyse des caractérisations thermiques.
- $f(X(t))$ indique l'impact de la dégradation de l'élément sur l'augmentation de la température, où $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_L(t)]$ est le vecteur du processus de dégradation des éléments du composant étudié.

Donc, selon la relation d'Ahrrenius, le taux de dégradation de l'élément i peut être exprimé par :

$$\mu_i(T_k, t) = \alpha_i \times \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{k_B[T_k + a_i + f(X(t))]\right) \quad (5.2)$$

où, T_k est la température ambiante.

De plus, le taux de dégradation de l'élément i est présenté comme suit :

$$\mu_i(T_k, t) = \alpha_i \times \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{k_B[T_k + a_i + f(X_i(t)) + \sum_{\forall j \neq i} f(X_j(t))]\right) \quad (5.3)$$

- $(f(X_i(t)))$ représente **l'auto-échauffement** de l'élément.
- $\sum_{\forall j \neq i} f(X_j(t))$ représente **l'interaction d'effet thermique** entre éléments du composant.

Dans le même logique que celle développée dans le chapitre 4, nous appliquons un modèle SDE afin de décrire le processus de dégradation de l'élément sous chaque contrainte de température [42, 128] :

$$dX_i(t) = \mu_i(T_k, t).dt + dB_i(t) \quad (5.4)$$

où $B_i(t)$ est un mouvement brownien standard avec les propriétés suivantes :

- $B_i(0) = 0$, où $B_i(t) \in [0, \infty)$,
- Station et incréments indépendants, à savoir $B_i(t + \Delta t) - B_i(t) \sim N(0, \Delta t. \sigma_i^2)$, où σ_i est le paramètre de diffusion, σ_i est une constante et $\sigma_i > 0$.

Cependant, le déterminant de la formulation analytique de $X(t)$ basé sur les Équations (5.3) avec le taux de dégradation de l'Equation 5.4 est très difficile à obtenir [128]. Donc, nous proposons d'utiliser une approximation par la série de Taylor, et le taux de dégradation de l'élément

peut être exprimé par :

$$\mu_i(T'_k, t) = \alpha_i \cdot e\left(-\frac{\alpha_i \beta_i}{T'_k}\right) + \frac{\beta_i}{T'_k} \cdot e\left(-\frac{\beta_i}{T'_k}\right) \times \sum_{j=1}^L f(X_j(t)) \quad (5.5)$$

où, $T'_k = T_k + a_i$.

Nous supposons que l'effet de l'état de dégradation, $f(X(t))$, à l'élément i peut être décrit par l'Équation (5.6) pour un modèle simplifié.

$$\sum_{j=1}^L f(X_j(t)) = \sum_{j=1}^L b_{ij} X_j(t) \quad (5.6)$$

où $b \in R^{L \times L}$ qualifie l'influence de l'état de dégradation de l'élément sur son taux de dégradation accélérée.

$$b = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1L} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ b_{L1} & b_{L2} & \dots & b_{LL} \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

Donc, le modèle de dégradation pour chacun des éléments du composant étudié peut être écrit comme suit :

$$dX(t) = [\kappa + \lambda \times X(t)] dt + dB(t) \quad (5.8)$$

où, $X(t) = [X_1(t), \dots, X_L(t)]$, λ, κ et sont les vecteurs et la matrice de paramétrage ; $B(t) = (B_1(t), \dots, B_L(t))'$, ici $B_1(t), \dots, B_L(t)$ sont des processus indépendants de mouvement brownien avec des paramètres de diffusion $\sigma_1^2, \dots, \sigma_L^2$, c'est-à-dire $B_i(t) \sim N(0, \sigma_i^2 t)$ pour $i = 1, \dots, L$. En d'autres termes, $B(t) \sim N(0, \Sigma.t)$, où $\sigma = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_L^2)$.

$$\kappa = \begin{bmatrix} \alpha_1 \cdot e\left(-\frac{\beta_1}{T'_k}\right) \\ \alpha_2 \cdot e\left(-\frac{\beta_2}{T'_k}\right) \\ \vdots \\ \alpha_L \cdot e\left(-\frac{\beta_L}{T'_k}\right) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_1 \beta_1}{T'_k} \cdot e\left(-\frac{\beta_1}{T'_k}\right) \cdot b_{11} & \frac{\alpha_1 \beta_1}{T'_k} \cdot e\left(-\frac{\beta_1}{T'_k}\right) \cdot b_{12} & \dots & \frac{\alpha_1 \beta_1}{T'_k} \cdot e\left(-\frac{\beta_1}{T'_k}\right) \cdot b_{1L} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \frac{\alpha_L \beta_L}{T'_k} \cdot e\left(-\frac{\beta_L}{T'_k}\right) \cdot b_{L1} & \frac{\alpha_L \beta_L}{T'_k} \cdot e\left(-\frac{\beta_L}{T'_k}\right) \cdot b_{L2} & \dots & \frac{\alpha_L \beta_L}{T'_k} \cdot e\left(-\frac{\beta_L}{T'_k}\right) \cdot b_{LL} \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

Il nous faut ensuite trouver la solution explicite de l'Équation (5.8). Afin de résoudre l'équation SDE, nous introduisons un facteur d'intégration $\exp(-t\lambda)$, qui est une exponentielle de la matrice. Rappelons que pour toute matrice A , où $A \in R^{n \times n}$, l'exponentielle de la matrice $\exp(A)$ est définie comme $\exp(A) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{l!} A^l$. Ici, $\exp(-t\lambda)$ satisfait l'équation suivante :

$$d(-t\lambda) = -\lambda \times \exp(-t\lambda) dt \quad (5.11)$$

Ensuite, nous considérons la différentiation de $\exp(-t\lambda) \times X(t)$. Par la formule d'Ito en n dimensions, nous avons :

$$d(\exp(-t\lambda) \times X(t)) = d(\exp(-t\lambda)) \times X(t) + \exp(-t\lambda)dX(t) \quad (5.12)$$

Nous considérons ensuite les équations 5.8 et 5.11 pour les expressions $d(\exp(-t\lambda))$ et $dX(t)$, respectivement. Nous avons :

$$\begin{aligned} d(\exp(-t\lambda) \times X(t)) &= -\lambda \times \exp(-t\lambda)X(t)dt + \exp(-t\lambda) \{[\kappa + \lambda \times X(t)] dt + dB(t)\} \\ &= \exp(-t\lambda) \times \kappa dt + \exp(-t\lambda)dB(t) \end{aligned} \quad (5.13)$$

En intégrant les deux côtés de 0 à t, nous avons

$$\exp(-t\lambda) \times X(t) - X_0 = \int_0^t \exp(-s\lambda) \times \kappa ds + \int_0^t \exp(-s\lambda)dB(s) \quad (5.14)$$

Notons que la matrice inverse de $\exp(t\lambda)$ est $\exp(-t\lambda)$. Nous multiplions les deux côtés par $\exp(t\lambda)$ et résolvons $X(t)$. Donc, le modèle de dégradation pour un composant complexe en considérant l'auto-échauffement et l'interaction de nature thermique entre éléments est donné par l'Équation (5.15).

$$X(t) = e^{t\lambda} \times X_0 + \int_0^t \left(e^{(t-s)\lambda} \right) \times \kappa.ds + \int_0^t e^{(t-s)\lambda} dB(s).ds \quad (5.15)$$

5.4.2 Estimation des paramètres du modèle de dégradation

Dans cette section, nous supposons qu'il existe une base de données de dégradation du composant à partir des expérimentations, et nous présentons les procédures d'utilisation de ces données pour estimer les paramètres de notre modèle. En particulier, nous dérivons les estimations de maximum de vraisemblance discrète (DML) pour les paramètres du modèle, $\theta = (\alpha, \beta, a, b, \sigma)$, où $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_L]$, $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_L]$, $a = [a_1, \dots, a_L]$, $b = [b_1, \dots, b_L]$ qui sont les vecteurs de paramétrage. Notons que a peut être directement estimé avec l'étape analytique.

De manière similaire à ce qui est utilisé dans la méthode DML, nous approximations $X(t_j)$ comme suit :

$$X(t_j) = X(t_{j-1}) + [\kappa + \lambda.\Delta x(t_{j-1})] \Delta t + (B(t_j) - B(t_{j-1})) \quad (5.16)$$

où, $\Delta x(t_{j-1}) = X(t_j) - X(t_{j-1})$

Notons que $X(t_j) - X(t_{j-1})$ sont indépendants, chacun d'entre eux suit la distribution $X(t_j) - X(t_{j-1}) \sim MVN([\kappa + \lambda.\Delta x(t_{j-1})] \Delta t, \Delta t^2.\Sigma)$, où $\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_L^2\}/\Delta t$. La fonction de vraisemblance de $(\alpha, \beta, b, \sigma)$ s'exprime comme suit :

$$\begin{aligned} L(\alpha, \beta, b, \sigma | Data) &= \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^{n_k} \prod_{j=1}^{m_k} \left[\frac{1}{2\pi^{L/2} |\Sigma|^{1/2}} \times \right. \\ &\quad \left. \exp \left\{ -\frac{1}{2} [y_j - [\kappa + \lambda.\Delta x_1(t_{j-1})]]^T \Sigma^{-1} [y_j - [\kappa + \lambda.\Delta x_1(t_{j-1})]] \right\} \right] \end{aligned} \quad (5.17)$$

où, $y_j = \frac{1}{\Delta t} [X(t_j) - X(t_{j-1})]$. Ensuite, la fonction de log-vraisemblance des données d'observation s'exprime sous la forme :

$$l(\alpha, \beta, b, \sigma) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{m_k} \log(L(\alpha, \beta, b, \sigma | Data)) \quad (5.18)$$

En utilisant une méthode numérique pour les équations algébriques non linéaires, à l'aide d'une procédure MATLAB, les paramètres $(\alpha, \beta, b, \sigma)$ peuvent être obtenus en résolvant intégralement les équations aux dérivées partielles qui sont fixées à zéro, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned}\frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \alpha} &= 0 \\ \frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \beta} &= 0 \\ \frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial b} &= 0 \\ \frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \sigma} &= 0\end{aligned}\tag{5.19}$$

5.5 Évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique

Le temps à la défaillance t_f du composant est donc défini comme le moment où l'un des L processus de dégradation atteint son seuil de dégradation D_l avec $l = 1, \dots, L$. La fonction de fiabilité du composant est alors donnée comme suit :

$$\begin{aligned}R(t) &= Pr(X_1(t) \leq D_1, \dots, X_L(t) \leq D_L) \\ &= \Phi_L(D_1, \dots, D_L; \mu^*(t), \Sigma^*(t))\end{aligned}\tag{5.20}$$

où $\Phi_L(D_1, \dots, D_L; \mu^*(t), \Sigma^*(t))$ est la fonction de distribution cumulative (CDF) distribution normale multivariée de L dimensionnels avec une moyenne $\mu^*(t)$ et une matrice de covariance $\Sigma^*(t)$. De plus, nous avons :

$$\mu^*(t) = E \left[e^{t\lambda} \times X_0 + \int_0^t (e^{(t-s)\lambda}) \times \kappa \cdot ds + \int_0^t e^{((t-s)\lambda)} dB(s) \cdot ds \right]\tag{5.21}$$

Notons que $e^{t\lambda} \times X_0$ et $\int_0^t (e^{(t-s)\lambda}) \times \kappa \cdot ds$ sont des valeurs déterministes pour toute t donné, tandis que $E \left[\int_0^t e^{((t-s)\lambda)} dB(s) \cdot ds \right] = 0$. Donc,

$$\mu^*(t) = e^{t\lambda} \times X_0 + \int_0^t (e^{(t-s)\lambda}) \times \kappa \cdot ds\tag{5.22}$$

Et,

$$\begin{aligned}\Sigma^*(t) &= Cov \left(\int_0^t e^{((t-s)\lambda)} dB(s) \cdot ds \right) \\ &= E \left[\left(\int_0^t e^{((t-s)\lambda)} dB(s) \cdot ds \right) \times \left(\int_0^t e^{((t-s)\lambda)} dB(s) \cdot ds \right)' \right] \\ &= \int_0^t e^{((t-s)\lambda)} \times \sigma \times e^{((t-s)\lambda^T)} ds\end{aligned}\tag{5.23}$$

5.6 Illustration du modèle de dégradation proposé par un exemple numérique pour un composant complexe

A ce stade, notre objectif est de réaliser des tests accélérés sur un composant complexe afin de valider le modèle de dégradation étendu au niveau élément avec l'auto-échauffement et l'interaction thermique entre éléments du composant étudié.

5.6. Illustration du modèle de dégradation proposé par un exemple numérique pour un composant complexe

Nous prenons comme composant complexe celui est représenté sur la Figure 2.15, avec la diode laser et la photodiode. Donc, le nombre d'élément est $L = 2$, voir la Figure 5.8.

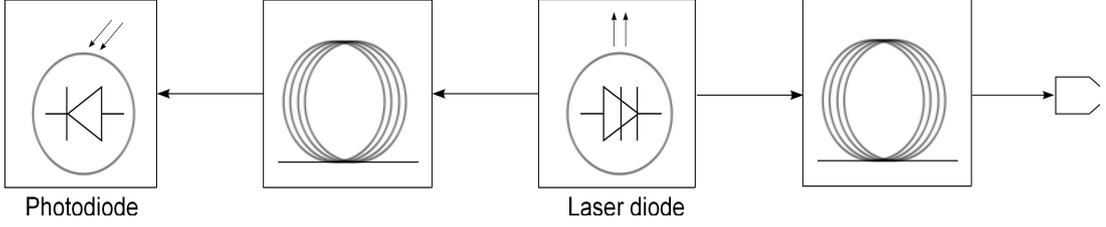


FIGURE 5.8 – Composant optoélectronique complexe

Dans le cas d'un composant optoélectronique tel que celui de la Figure 5.8 qui combine une diode laser et une photodiode, les caractéristiques de performance, qui sont respectivement la puissance optique de sortie et le courant d'obscurité, correspondent à la dégradation de la diode laser et de la photodiode respectivement.

Cela signifie que l'indicateur de dégradation de la diode laser et photodiode s'expriment, respectivement, par :

$$\begin{aligned} X_1(t) &= 1 - \frac{P^{opt}(t)}{P^{opt}(0)} \\ X_2(t) &= \frac{I^{dark}(t)}{I^{dark}(0)} - 1 \end{aligned} \quad (5.24)$$

Dans cet exemple, nous appliquons un niveau de contrainte de température de $T_k = 50^\circ C$ alors que le fonctionnement normal est de $T_0 = 25^\circ C$. Les paramètres du modèle de dégradation sont présentés dans le Tableau 5.4 et les équations (5.25), (5.26) présentent le facteur d'impact entre deux éléments.

TABLE 5.4 – Paramètres du système

Paramètres	Diode laser	Photiode
A_i	3	4.10^{10}
E_i	0.35	0.95
σ_i	0.02	0.05

$$a = \begin{pmatrix} 41 & 0 \\ 3 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.25)$$

$$b = \begin{pmatrix} 50 & 0 \\ 15 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.26)$$

En regardant la valeurs des paramètres du modèle de dégradation, nous avons proposé qu'il n'y ait qu'un impact thermique de la diode laser à la photodiode et à elle-même :

$$\begin{aligned} \Delta T_1(t) &= 41 + 50.X_1(t - 1) \\ \Delta T_2(t) &= 3 + 15.X_1(t - 1) \end{aligned} \quad (5.27)$$

5.6.1 Fiabilité du composant étudié à un niveau de température contrainte donné

Avec ces paramètres définis ci-dessus, en utilisant les Équation (5.20), (5.22) et (5.23), nous supposons que le fonctionnement normal est $T_0 = 25^\circ C$, le seuil de défaillance est $D_1 = 0.3$, $D_2 = 0.3$ de la diode laser et de la photodiode, respectivement. Enfin, la Figure 5.9 représente la dégradation et la fiabilité du système optoélectronique avec et sans interaction.

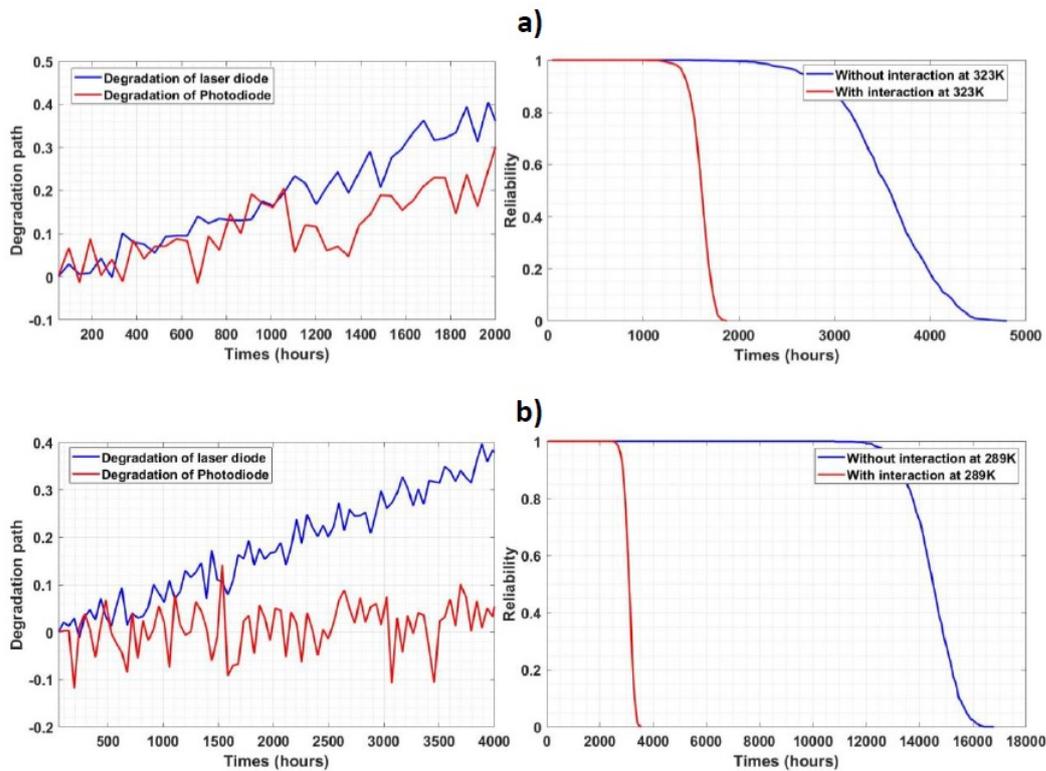


FIGURE 5.9 – Dégradation et fiabilité du composant sous la condition de température : a) $T_k = 50^\circ C$; b) $T_0 = 25^\circ C$

Les résultats numériques montrent que l'interaction entre les composants a un impact important sur la fiabilité du système et devrait être intégrée dans le modèle de test de dégradation accélérée. En outre, la Figure 5.10 présente les évolutions simulées de la température de jonction en fonction du temps en utilisant le modèle proposé sous la contrainte de température de $50^\circ C$. Le résultat correspond aux résultats obtenus par la simulation multi-physique.

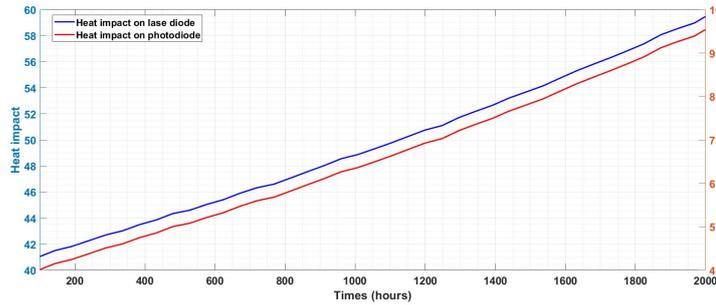


FIGURE 5.10 – Évolution de la température de LD et PD sous la condition de température $T_0 = 25^\circ C$

Une analyse de sensibilité est ensuite réalisée pour évaluer l'impact de la thermique sur la fiabilité du composant étudié.

5.6.2 Impacts des interactions sur la fiabilité du composant étudié

Les Figure 5.11 et Figure 5.12 présentent l'analyse de sensibilité de la fiabilité du composant étudié par rapport aux facteurs d'impact thermique (a_{12}, b_{12}). Le facteur (a_{12}) indique la dépendance à la conception du composant tandis que le facteur (b_{12}) présente la dépendance stochastique.

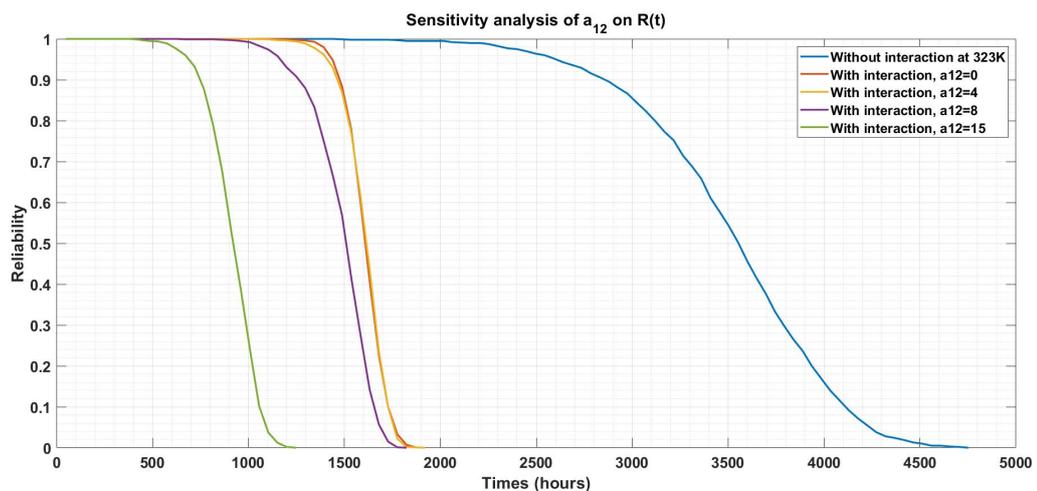
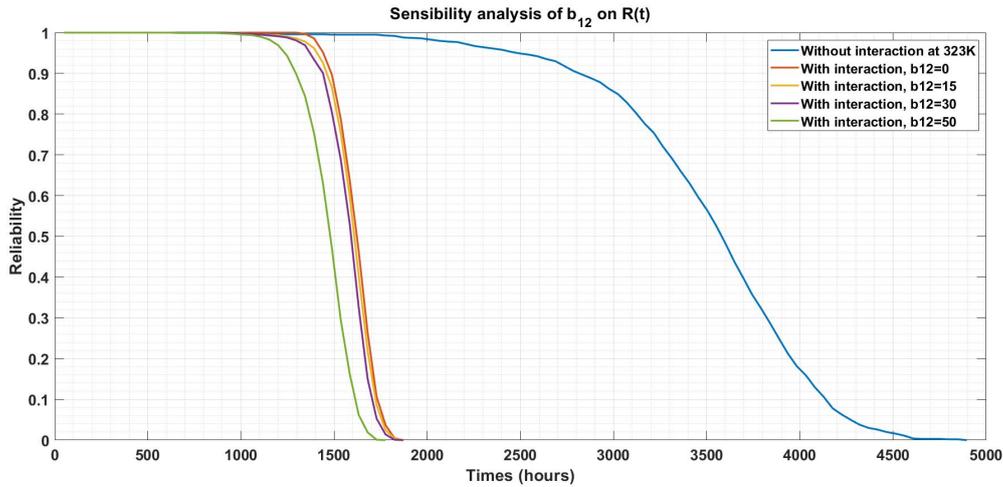


FIGURE 5.11 – Analyse de sensibilité de $R(t)$ sur l'impact de la conception du composant complexe

FIGURE 5.12 – Analyse de sensibilité de $R(t)$ sur l'impact de la dépendance stochastique

Comme le montre les deux figures 5.11 et 5.12, lorsque (a_{12}, b_{12}) sont petits, la dépendance de la dégradation à l'impact de la thermique est moindre, et un facteur élevé de (a_{12}, b_{12}) signifie que la photodiode reçoit plus de chaleur de la diode laser, ce qui entraîne une détérioration plus rapide. La comparaison entre les deux figures indique que la variabilité de (a_{12}) exerce un impact plus important sur la fiabilité du composant que la variabilité de (b_{12}) .

En outre, dans cette étude, les interactions entre les éléments sont modélisées par l'impact thermique. Cependant, il existe également une dépendance entre les paramètres qui amène logiquement une étude sur la co-variance entre paramètres.

5.7 Conclusion

Ce chapitre a montré l'importance de développer un modèle de test de dégradation accélérée pour l'évaluation de la fiabilité d'un composant optoélectronique complexe. Ce modèle tient compte non seulement de l'interaction entre éléments, mais aussi de la caractérisation du composant, des facteurs de stress qui peuvent être générés par un test accéléré.

Pour permettre d'évaluer la fiabilité d'un composant étudié, nous avons présenté la description de ce composant. Ensuite, se focalisant sur le flux d'énergie et l'interaction possible entre éléments (les résultats de la simulation multi-physique), nous avons mis en évidence qu'il y a une possibilité d'interaction de nature thermique entre éléments sur notre composant étudié. Ce constat nous permet de proposer un modèle de calcul de la fiabilité au niveau élément ainsi qu'au niveau composant complexe en considérant l'interaction de nature thermique entre éléments et l'auto-échauffement.

Un exemple numérique pour ce composant a été développé. Les résultats numériques indiquent que l'interaction entre éléments a un impact important sur la fiabilité du composant complexe et devrait être intégrée dans le modèle de test de dégradation accélérée.

Le modèle de dégradation obtenu dans ce chapitre permet de compléter le modèle que nous avons présenté au chapitre 4. Comme mentionné au chapitre 4, la construction d'un modèle de dégradation pour des composants est une étape importante du processus de planification d'un plan de test "optimal". Sur la base des résultats, nous développons par conséquent dans le chapitre suivant la méthode permettant de choisir le plan de test "optimal" et de le réaliser.

Chapitre 6

Plan optimisé de tests accélérés pour des composants optoélectroniques

Sommaire

6.1	Introduction	117
6.2	Problématiques d'optimisation d'un plan de test accéléré	118
6.2.1	Paramètres d'un plan de test	118
6.2.2	Spécification de test au CEA LETI	118
6.2.3	Formulation du problème d'optimisation	118
6.3	Optimisation d'un plan de test par l'approche bayésienne	119
6.3.1	Critère d'optimisation d'un plan de test basé sur l'approche bayésienne	120
6.3.2	Algorithme d'atteinte d'un point optimum	121
6.4	Un plan de test optimal pour la LED Cree EZ1000 : Approche bayésienne	123
6.4.1	Procédure d'optimisation	123
6.4.2	Validation du plan test optimal	124
6.4.3	Analyse de sensibilité	127
6.5	Conclusion	128

6.1 Introduction

Les résultats des chapitres précédents ont montré que le modèle de dégradation proposé est bien adapté pour calculer la fiabilité des éléments et composants optoélectroniques en prenant en compte des facteurs d'influences (l'auto-échauffement au niveau élément et l'interaction d'états au niveau composant). En reprenant ces modèles de dégradation, ce chapitre s'attaque à la contribution C4 relative à l'optimisation d'un plan de test accéléré permettant de prendre en compte les impacts de la dépendance entre éléments de composant optoélectronique. Un rappel sur le plan de test accéléré et des constats du contexte CEA sont présentés dans la section 6.2. Ceci a pour objet de formuler mathématiquement le problème d'optimisation. Puis, la section 6.3 propose une approche permettant d'obtenir un plan de test optimal en référence aux limitations des méthodes actuelles qui ont été présentées dans le chapitre 3. Ensuite, une validation de la méthode proposée par des expérimentations est également réalisée dans la section 6.4. Enfin, les conclusions sont données dans la section 6.5.

6.2 Problématiques d'optimisation d'un plan de test accéléré

L'objectif d'un plan de test est de juger des performances d'un composant vis-à-vis d'un cahier des charges et d'une exigence de fiabilité souhaitée. Ainsi, à l'issue de l'essai, il est possible de statuer sur la tenue de l'objectif de fiabilité avec un certain niveau de confiance. En effet, les essais étant réalisés sur un nombre limité de composants, il est nécessaire de définir un critère d'acceptation intégrant les intervalles de confiance.

6.2.1 Paramètres d'un plan de test

Un plan de test (en anglais, design of experimentes ou DOE) est la suite ordonnée d'essais/tests d'une expérimentation. Plus spécifiquement un plan de test accéléré est caractérisé par les paramètres suivants :

- Nombre total d'échantillons à tester (N_{total}),
- Durée de test (t_{total});
- Nombre d'échantillons (n_k) soumis au niveau de contrainte k (uniquement pour le constant);
- La durée de test (t_k) pour le niveau de contrainte k (uniquement pour « step stress »);
- Proportion relative (π_k) : $\pi_k = \frac{n_k}{N_{total}}$ pour le constant et $\pi_k = \frac{t_k}{t_{total}}$ pour le « step ».

6.2.2 Spécification de test au CEA LETI

En regard des travaux académiques sur ce sujet, le plan de test accéléré est souvent conçu par une fonction de coût total qui est inférieur à une contrainte de budget donné (l'équation (3.31) du chapitre 3). Cependant, dans le contexte du composant optoélectronique en recherche et développement au CEA, plusieurs constats sont à mettre en évidence qui peuvent impacter la difficulté d'établir le plan de test accéléré :

- Les composants testés sont des composants en R&D, il n'y a pas donc de REX relatif par exemple à l'exploitation d'une flotte de ces composants (les résultats d'expérimentation sont peu nombreux);
- Les composants étant de type R&D, un composant complexe (ou un élément) par rapport à un autre composant de même type n'a pas un comportement strictement identique (maturité dans le développement) et peut donc présenter une variabilité importante;
- Il n'existe qu'un nombre limité des composants à tester.

A partir de ces constats au CEA, le plan de test accéléré est donc établi à partir du nombre des composants à tester, ainsi que de la durée de test donnée.

6.2.3 Formulation du problème d'optimisation

Un plan de test accéléré dit optimal, est un plan de test permettant d'évaluer la fiabilité du composant étudié avec un intervalle de confiance donné selon un ou plusieurs critères d'optimisation tout en respectant les contraintes des ressources disponibles (nombre total d'échantillons; durée de test). Par rapport aux constats soulevés dans le cadre CEA, le premier d'objectif en support du problème d'optimisation est de développer des modèles de dégradation les plus adaptés pour chacun des éléments du composant étudié et des paramètres de ces modèles les plus précis possibles tout en considérant la contrainte de limitation des ressources disponibles. Donc, le critère D-optimal a été choisi comme celui à mettre en œuvre dans cette thèse.

De plus, parmi des profils de tests accélérés (contrainte constante, contrainte échelonnée, etc.), le profil de la contrainte constante est celui le plus couramment appliqué dans les ADTs [31, 32, 33]. Donc, nous retenons pour cette thèse ce profil car la facilité d'application de la

contrainte et la disponibilité des modèles théoriques sont les principaux facteurs qui rendent l'utilisation d'une charge à contrainte constante favorable pour cette thèse.

Un plan de test accéléré dans cette thèse est donc défini comme suit :

$$\eta = \{N_{total}, t_{total}, n_1, n_2, \dots, n_k, \dots, n_K, T_1, T_2, \dots, T_k, \dots, T_K\} \quad (6.1)$$

où, T_k est la valeur de stress au niveau de contrainte k .

Selon le critère d'optimalité, le problème d'optimisation peut s'exprimer comme suit :

$$\begin{aligned} & \text{maximize} && \det(I(\eta, \theta)) \\ & \text{subject to} && T_{min} < T_1 < T_2 < \dots < T_K < S_{max}, \\ & && 0 \leq \pi_k \leq 1, k = 1, 2, \dots, K, \\ & && \sum_{k=1}^K \pi_k = 1 \end{aligned} \quad (6.2)$$

D'où, $\pi_k = \frac{n_i}{N_{total}}$, N_{total} et t_{total} sont censés être donnés en fonction du budget et de la situation pratique et rester fixes tout au long du test.

6.3 Optimisation d'un plan de test par l'approche bayésienne

Vis-à-vis des travaux existants sur l'optimisation d'un plan de test accéléré, la formule du critère d'optimisation est facile à obtenir, car le modèle de dégradation ne prend pas en compte généralement des facteurs d'influence (l'auto-échauffement au niveau élément, l'interaction de stochastique entre éléments au niveau composant) [105]. En ce sens, ce critère d'optimisation ne dépend que de la valeur donnée des paramètres du modèle de dégradation et les paramètres d'un plan de test (références dans la Table 3.3 du chapitre 3).

D'autre part, en utilisant les modèles de dégradation proposés dans les chapitres 4 et 5, le critère d'optimisation est généralement difficile à obtenir, car il ne dépend pas seulement de la valeur des paramètres du modèle de dégradation, les paramètres d'un plan de test, mais aussi de l'état de dégradation des éléments. Cependant, certaines informations a priori, par exemple les résultats de test pour des éléments individuels/ composants similaires tels que des informations sur le processus de dégradation et les paramètres du modèle, sont potentiellement disponibles. Donc, l'approche bayésienne a été introduite pour résoudre le problème du manque de données de dégradation [108].

En outre, selon Chaloner et Verdinelli [145], les différences entre le plan de test avec l'approche bayésienne et celle non-bayésienne sont moins importantes si la taille de l'échantillon n_{total} est grand (plus de 60 composants). Lorsque n_{total} est grand, la distribution a posteriori est déterminée par les données et n'est pas sensible à la distribution a priori. Au contraire, lorsque n_{total} est petit, la distribution a priori a plus d'influence sur la distribution a posteriori et le plan de test. Par conséquent, en lien avec les contraintes de R&D des composants CEA utilisés, l'élaboration d'un plan de test à base d'une approche bayésienne paraît l'approche la plus logique et la plus efficace.

Par l'approche bayésienne, nous proposons un processus d'optimisation d'un plan de test accéléré, Figure 6.1, qui peut être appliqué de manière flexible à une grande classe de modèles de dégradation, afin qu'un cadre systématique puisse être utilisable.

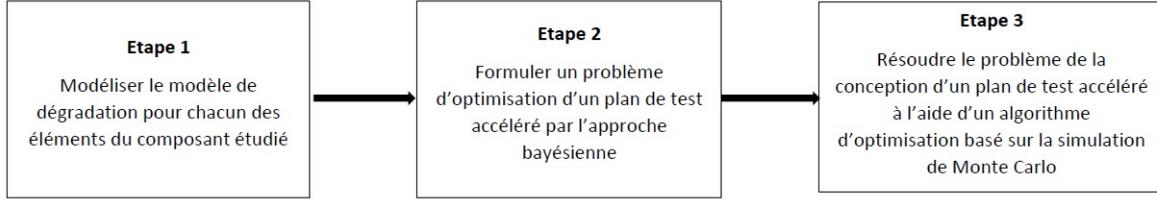


FIGURE 6.1 – Conception d'un plan de ADT optimal avec la méthode bayésienne

Nous notons qu'une conception efficace de l'ADT doit toujours commencer par une bonne compréhension des propriétés physiques du composant avant qu'une modélisation du modèle de dégradation (étape 1) soit réalisée. Ensuite, le problème d'optimisation d'un plan de test est reformulé en regardant l'approche bayésienne (étape 2). Cela implique non seulement le choix de distributions préalables pour les paramètres du modèle, mais aussi l'utilisation d'un algorithme d'optimisation basé sur la simulation de Monte-Carlo pour résoudre efficacement le problème d'optimisation (étape 3).

Par conséquent, l'élément de base du processus d'optimisation d'un plan de test par l'approche bayésienne est le modèle de dégradation des éléments constituant de composant étudié. Ensuite, il traite les paramètres du modèle de dégradation comme des variables aléatoires, et attribue des distributions a priori à ces paramètres du modèle en fonction des connaissances de l'expert.

6.3.1 Critère d'optimisation d'un plan de test basé sur l'approche bayésienne

Dans l'approche bayésienne, un plan de test optimal peut être obtenu en maximisant la fonction d'utilité attendue de l'expérience. Si un plan de conception η est choisi dans l'ensemble de plans possibles P , une règle de décision h dans l'ensemble de règles de décision H est sélectionnée avec les données x observées. Or, la fonction d'utilité peut être désignée par $U(h; \eta; x; \theta)$. Un plan de test optimal avec l'approche bayésienne est obtenu en maximisant :

$$U(\eta^*) = \max_{\eta \in P} \int_{\Omega} \max_{h \in H} \int_{\Theta} U(h; \eta; x; \theta) p(\theta|x, \eta) p(x|\eta) d\eta dx \quad (6.3)$$

où $p(x|\eta)$ représente la fonction de vraisemblance sous l'hypothèse donnée par η et $p(\theta|x, \eta)$ représente la distribution a posteriori de θ sous l'hypothèse donnée de η et observée x . L'utilité attendue a posteriori $U(\eta)$ de la meilleure règle de décision est prise comme l'espérance dans l'espace des paramètres Θ pour tenir compte de l'incertitude de l'inconnue θ et dans l'espace des échantillons Ω .

Comme D-optimal est choisi comme critère d'optimisation, selon des études de Chaloner and Larnts [145], le critère D-optimal d'un plan de test par l'approche bayésienne peut être écrit comme suit :

$$\phi(\eta) = E_{\theta} E_x [\log (I(\eta, \theta))] = \int \log [\det (I(\eta, \theta))] \pi(\theta) d\theta \quad (6.4)$$

où, $I(\eta, \theta)$ est la matrice d'information de Fisher et le symbole "det" désigne le déterminant de la matrice. L'élément de $I(\eta, \theta)$ doit être écrit comme suit :

$$[I(\eta, \theta)]_{ij} = E \left[\left(\frac{\partial}{\partial \theta_i} \log f(X, \theta) \right) \left(\frac{\partial}{\partial \theta_j} \log f(X, \theta) \right) | \theta \right] \quad (6.5)$$

Par exemple, rappelons le modèle de dégradation qui tient compte de l'auto-échauffement pour notre cas d'étude de la LED :

$$X(t) = X(0).e^{\lambda.t} + \kappa \left(e^{\lambda.t} - 1 \right) + \int_0^t \sigma.e^{\lambda(t-s)} dB(s).ds \quad (6.6)$$

où,

$$\kappa = \frac{T'_k{}^2}{b\beta} \quad (6.7)$$

$$\lambda = b \times \frac{\alpha\beta}{T'_k{}^2}.exp\left(-\frac{\beta}{T'_k}\right) \quad (6.8)$$

et, $T'_k = T_k + a$.

Donc, ce modèle proposé est caractérisé par un ensemble de paramètres $\theta = \{\alpha, \beta, a, b, \sigma\}$. la densité de probabilité conditionnelle d'une observation $X(t_j)$ étant donné l'observation précédente $X(t_{j-1})$, avec Δt étant le pas de temps, est donnée par

$$f(X(t_j)|X(t_{j-1}), \kappa, \lambda, \sigma^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma^*)^2}} * exp\left(-\frac{[X(t_j) - \kappa(e^{\lambda.\Delta t} - 1) - e^{\lambda.\Delta t}.X(t_{j-1})]^2}{2(\sigma^*)^2}\right) \quad (6.9)$$

Ensuite, la fonction de log-vraisemblance d'une donnée d'observation peut être la suivante :

$$l(\alpha, \beta, b, \sigma) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{m_k} \ln(f(X(t_j)|X(t_{j-1}), \alpha, \beta, b, \sigma) \quad (6.10)$$

La matrice d'information de Fisher pour la LED est exprimée comme suit :

$$I(\theta) = \begin{pmatrix} E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \alpha^2}\right] & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \alpha \partial \beta}\right] & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \alpha \partial b}\right] & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \alpha \partial \sigma}\right] \\ & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \beta^2}\right] & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \beta \partial b}\right] & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \beta \partial \sigma}\right] \\ & & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial b^2}\right] & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial b \partial \sigma}\right] \\ \text{symétrique} & & & E\left[-\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial (\sigma)^2}\right] \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

6.3.2 Algorithme d'atteinte d'un point optimum

En raison de la complexité des formules de l'Equation (6.5) et (6.11), il est difficile d'obtenir un posteriori dans une forme analytique. Ainsi, le calcul numérique et la simulation sont les principes connus de la théorie bayésienne. Lorsque des simulations de Monte-Carlo directes sont utilisées, les échantillons doivent être tirés de chaque plan et, par conséquent, nécessitent un grand nombre d'itérations. Enfin, nous allons calculer numériquement la fonction objectif dans l'Equation (6.4) afin de trouver une valeur maximum qui détermine le plan de test optimal. La Figure 6.2 illustre les étapes de l'algorithme.

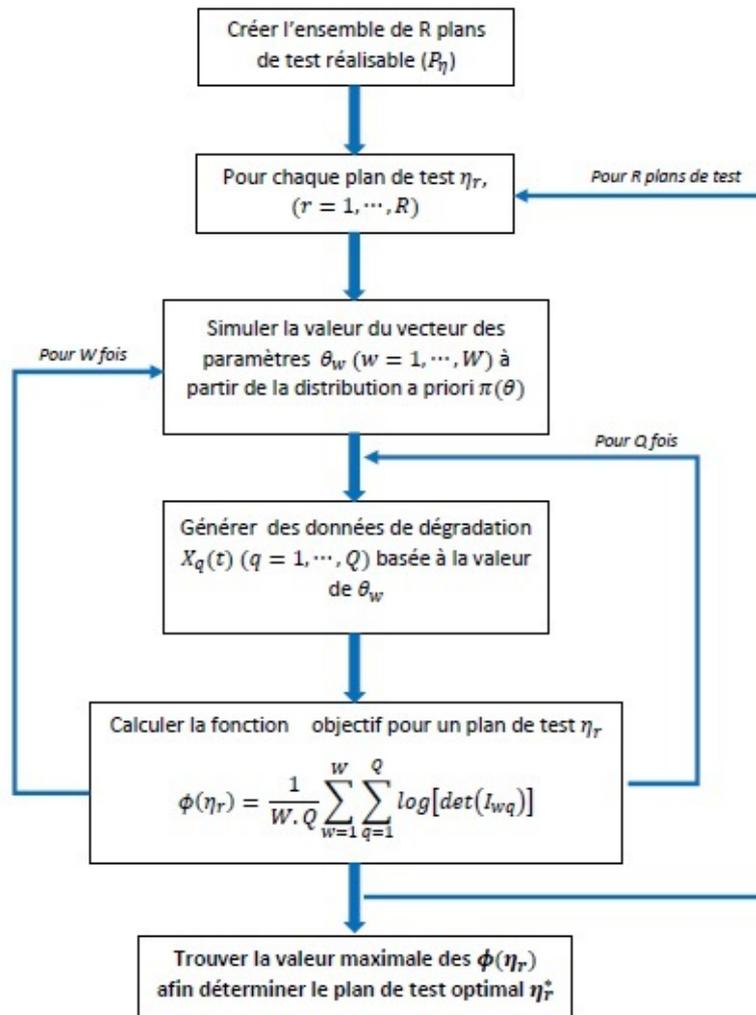


FIGURE 6.2 – Organigramme des étapes de base pour l'algorithme d'optimisation d'un plan de test accéléré avec la méthode bayésienne

Les étapes détaillées sont les suivantes :

- Créer un espace d'ensemble de plans P_η de test qui contient R plans test réalisables grâce aux contraintes des niveaux de stress, des échantillons de test et des temps de mesure.
- Étant donné un plan de test η_r , $r = 1, 2, \dots, R$, simuler θ_w à partir de la distribution a priori $\pi(\theta)$ pour W fois, $w = 1, 2, \dots, W$ (par exemple, $W = 100000$).
- Sur la base de θ_{rw} simulé, générer des données de dégradation x_{rwq} en fonction du modèle de dégradation développé dans les chapitres 4 et 5 pour Q fois, $q = 1, 2, \dots, Q$ ($Q = 100000$).
- Calculer les éléments de l'Equation (6.5) sur la base des valeurs tirées de θ_{rw} et x_{rwq} . Ensuite, calculer numériquement la valeur de l'Equation (6.4) sur la base de $\phi(\eta_r) = \frac{1}{W \cdot Q} \sum_{p=1}^W \sum_{q=1}^Q \log [\det (I_{rwq}(\eta_r, \theta_{rw}))]$
- Enfin, trouver la valeur maximale de $\phi(\eta_r)$ afin de déterminer le plan de test optimal η_r^*

6.4 Un plan de test optimal pour la LED Cree EZ1000 : Approche bayésienne

Pour illustrer la méthode proposée dans ce chapitre, nous avons utilisé des LED Cree EZ1000 déjà présentées dans le chapitre 3.

De plus, les ressources disponibles et les hypothèses de base pour cette étude sont les suivantes :

- 12 LED sont disponibles pour les tests, $n_{total} = 12$,
- Durée de test est de 1500h, $t_{total} = 1500$,
- Intervalle de mesure est fixé à 48h, $f = 48$,
- La plage de température d'essai est de 40°C à 115°C avec un incrément de 15°C sur cette plage, donc l'espace du niveau de stress en température, est :

$$T = \{40^{\circ}C, 55^{\circ}C, 70^{\circ}C, 85^{\circ}C, 100^{\circ}C, 115^{\circ}C\} \quad (6.12)$$

D'après les études faites dans le chapitre 4, les paramètres estimés obtenus par le maximum de vraisemblance (MLE) sont considérés comme relativement précis ; ainsi, nous définissons ces distributions préalables comme indépendantes les unes des autres et leurs hyperparamètres sont définis comme suit :

TABLE 6.1 – Distributions a priori $\pi(\theta)$

Paramètres	α	E_a	a	b	σ
$\pi(\theta)$	N(4,5 ; 0,1)	N(0,31 ; 0,01)	N(10 ; 2)	N(16,78 ; 2,72)	N(0,002 ; 0,0001)

6.4.1 Procédure d'optimisation

A partir de données d'entrées recensées dans les sections précédentes, l'algorithme d'optimisation d'un plan de test accéléré est mis en oeuvre par :

- Création d'un ensemble des plans de test réalisables :
 - En général, nous proposons que ce plan de test ait 2 niveaux de stress en température, $K = 2$. Grâce à la fonction *nchoosek* de *Matlab*, il existe 15 combinaisons des deux niveaux de stress :

TABLE 6.2 – Les combinaisons possibles de deux niveaux de stress en température

T_1 (°C)	T_2 (°C)
40	55
40	70
40	85
...	...
55	100
55	115
70	85
...	...
85	115
100	115

- L'association du nombre de LED pour chaque niveau de stress en regardant la contrainte $\sum_{k=1}^2 \pi_k = 1$, ou $n_1 + n_2 = n_{total}$;
- Un ensemble de 165, $R = 165$, plans de test, $\eta_r = \{T_1, T_2, n_1, n_2\}$, réalisables sont obtenus :

TABLE 6.3 – Ensemble des plans de test réalisables

Id	T_1	T_2	n_1	n_2
1	40	55	1	11
2	40	55	2	10
...
47	40	115	3	9
...
165	100	115	11	1

- Pour chaque plan de test, la valeur des paramètres du modèle de dégradation est obtenue à partir de la distribution a priori issue de la Table 6.1, puis des données de dégradation sont simulées grâce à l'Equation (6.6).
- La fonction objectif pour chaque plan de test est calculée en utilisant les données simulées. La Figure 6.3 présente la valeur de la fonction objectif en fonction du plan de test.

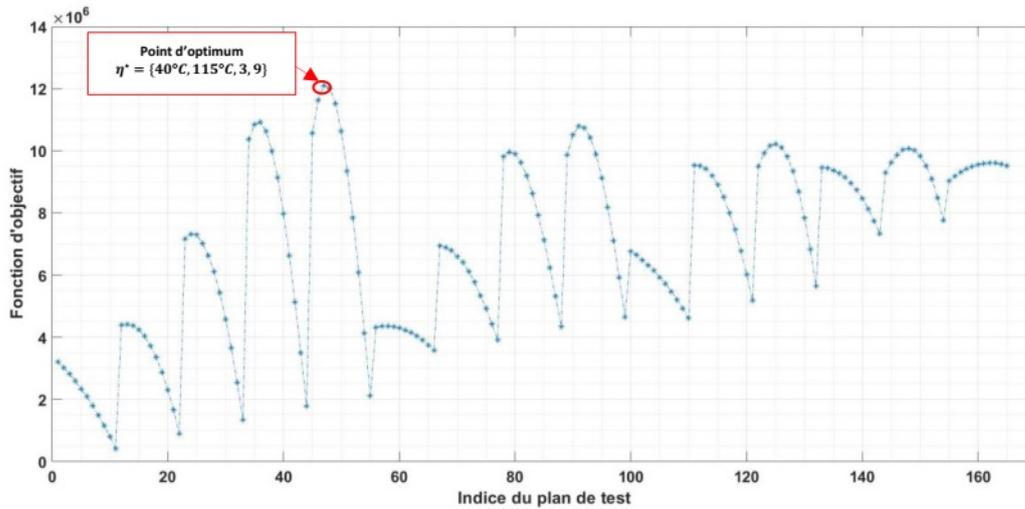


FIGURE 6.3 – Valeur de la fonction objectif en fonction du plan de test

Cette figure montre que le plan de test $\eta_r = \{40^\circ C, 115^\circ C, 3, 9\}$ donne la valeur maximale $\phi(\eta) = 12,1 \cdot 10^6$ sur la fonction d'objectif. Ce plan de test est dit le plan de test optimal. Nous allons réaliser ce plan de test en réel afin de valider la méthode proposée.

6.4.2 Validation du plan test optimal

Suite au résultat de la section 6.4.1, notre expérience a été réalisée pour 12 LEDs pendant 1500 heures avec deux niveaux de stress de test (3 LEDs avec $T_1 = 40^\circ C$ et 9 LEDs avec $T_2 = 115^\circ C$). Les conditions des tests desquelles sont issues les données sont indiquées dans le Tableau 6.4. Dans ce cas, le courant d'alimentation est fixé à 350 mA pour tous les tests.

TABLE 6.4 – Plan de tests optimaux pour les LED Cree EZ1000

Termes	Conditions du test
Durée du test	1500 h
Intervalle de collecte des données	Minimum de 48h
Courant d'entrée	350mA
Température d'étuves	
T_1	$85^{\circ}C(358^{\circ}K)$
T_2	$115^{\circ}C(388^{\circ}K)$
Taille de l'échantillon	3 LED sous T_1 et 9 LED sous T_2

La puissance optique, notée $P_{opt}(t)$, a été mesurée toutes les 48 heures. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 6.4.

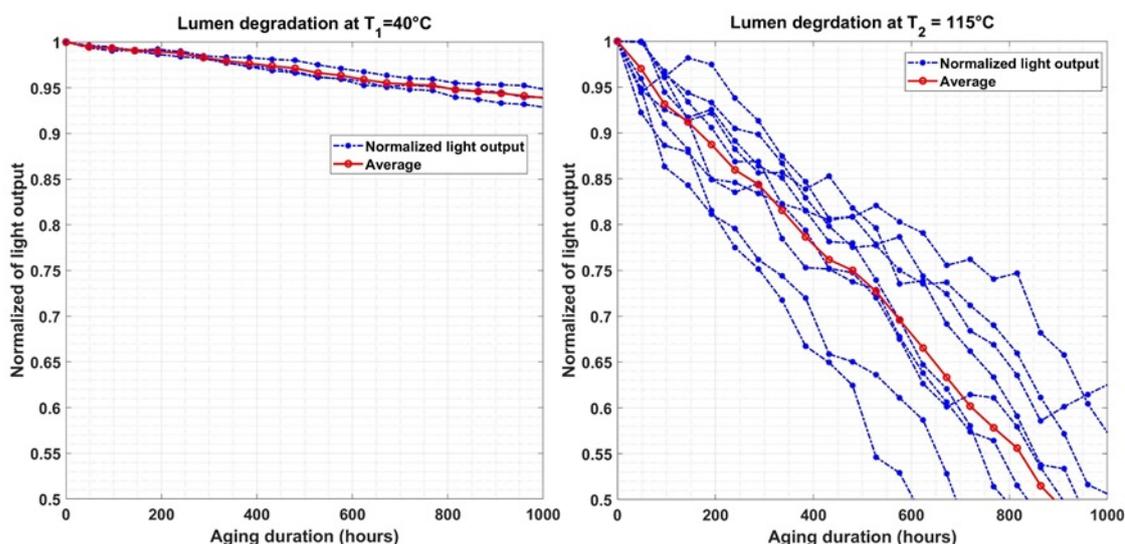


FIGURE 6.4 – Dégradation de la puissance optique sous deux conditions de température ; a) $T_1 = 40^{\circ}C$; b) $T_2 = 115^{\circ}C$

Considérant que sous une contrainte de température, la puissance optique diminue avec le temps, il est donc important de modéliser cette évolution afin de calculer la fiabilité de la LED sous une température de contrainte donnée.

Ensuite, une évaluation sur la température de jonction est réalisée à partir du protocole donné dans la section 2.3.4 du chapitre 2. Les résultats obtenus montrent une augmentation de la température de jonction de la LED.

- Une augmentation en moyenne de 9,1 degrés de la température de jonction avec un courant d'alimentation de 350 mA. C'est à dire $\mathbf{a} = \mathbf{9,1}$.
- Une augmentation de température en regardant la dégradation de puissance optique d'après le test accéléré.

Ces résultats sont compatibles avec le problème mentionné dans le chapitre 4 concernant l'augmentation de la température de jonction due à la dégradation de la LED. Il est à noter que l'augmentation de la température de jonction affecte la dégradation de la LED. Donc, en

raison de l'impact de la dégradation, il existe une boucle de stress thermique, soumise à un auto-échauffement sur la LED, qui affecte le processus de dégradation de la LED dans le temps.

Estimation du paramètre :

Le paramètre a , donc, peut être facilement estimé par le fait que le courant d'alimentation à 350mA conduit à une augmentation de 9,1 degrés de la température de jonction, c'est-à-dire, $\hat{a} = 9.1$. Les autres paramètres α, β, b, σ sont estimés par l'approche d'estimation présentée dans la section 4.3.4 du chapitre 4. Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 6.5.

TABLE 6.5 – Paramètres d'estimation avec le plan de test optimal η^*

Terms	Paramètres
$\hat{\alpha}$	4.732
$\hat{\beta}(\times 10^3)$	3.6
\hat{a}	9,1
\hat{b}	15,37
$\hat{\sigma}$	0.0023

Analyse comparative :

Afin d'avoir un point de comparaison, tout d'abord, nous prenons une partie des données expérimentales mises en évidence dans le chapitre 4 sous la forme d'un plan de test $\eta' = \{85^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}, 6, 6\}$. A partir des données d'expérimentation du plan de test η' , les paramètres du modèle de dégradation sont obtenus dans la Tableau 6.6.

TABLE 6.6 – Paramètres d'estimation avec le plan de test non optimal η'

Terms	Paramètres
$\hat{\alpha}$	7,96
$\hat{\beta}(\times 10^3)$	3.78
\hat{a}	10
\hat{b}	22.87
$\hat{\sigma}$	0.0017

Ensuite, selon l'Equation (4.21) du chapitre 4, la fonction de distribution cumulative (CDF) basée sur le modèle de dégradation proposé pour la LED est calculée en utilisant les paramètres estimés indiqués dans les Tableau 6.5 et Tableau 6.6. Les résultats obtenus sont ensuite comparés aux données expérimentales dans les Tableaux 4.8 et 4.9 du chapitre 4, voir la Figures 6.5. Nous avons constaté que la CDF basée sur le plan de test optimal, η^* , est bien adéquate avec les données expérimentales. En revanche, le CDF tracé à partir du plan de test η' conduit à une erreur en comparant au résultat obtenu du η^* .

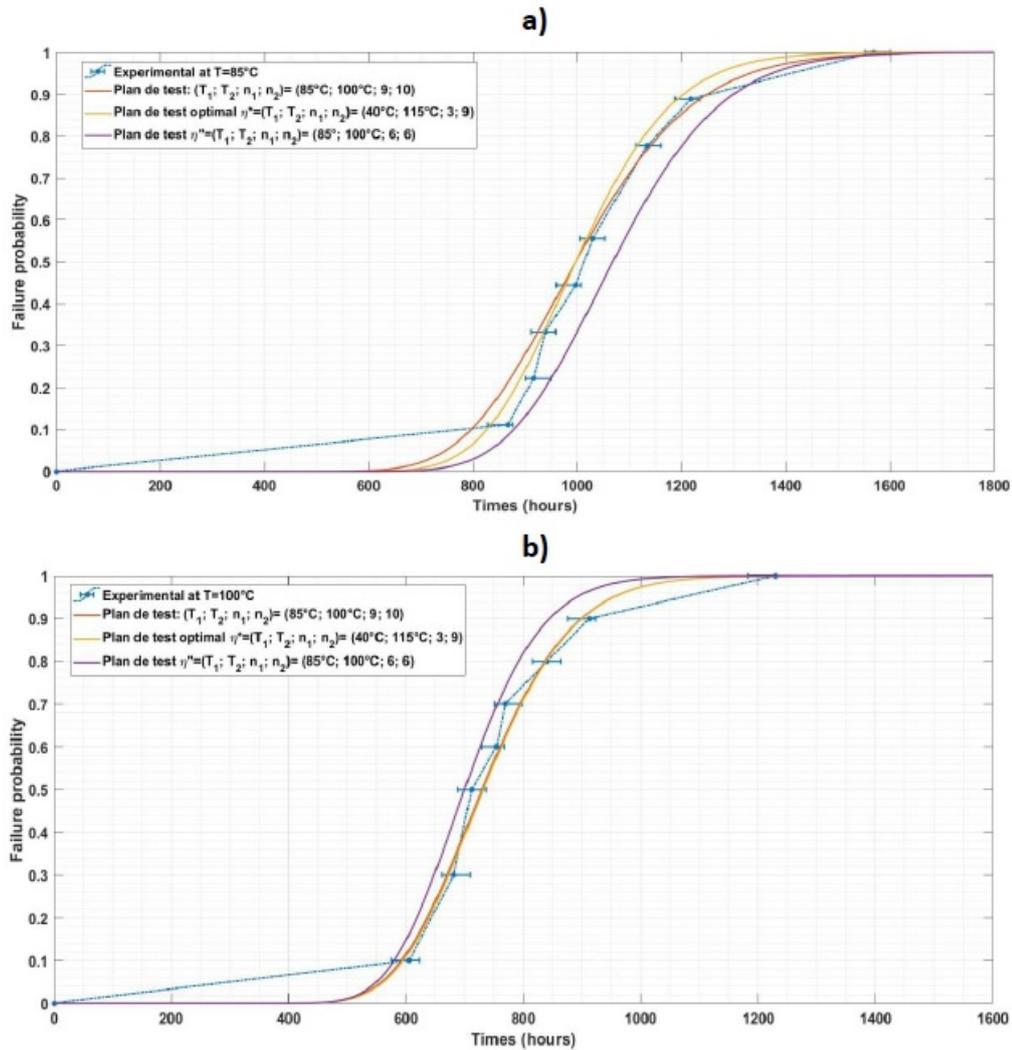


FIGURE 6.5 – Fonction cumulative de la LED à partir du plan de test optimal η^* comparée aux valeurs expérimentales du chapitre 4 ; a) $T = 85^\circ\text{C}$; b) $T = 100^\circ\text{C}$

6.4.3 Analyse de sensibilité

En pratique, il peut être différent de sélectionner les distributions a priori des paramètres. Par conséquent, une analyse de sensibilité a été effectuée pour étudier la robustesse à différentes formes de distribution des paramètres.

Afin d’obtenir des modèles plus précis pour le modèle proposé, en plus des priors symétriques, nous avons étudié également ces situations avec des priors asymétriques. Il a donc été choisi les distributions normales et uniformes avec les différents paramètres pour $(E_a(\text{ou}\beta), a, b)$, voir la Tableau 6.7.

- La première sélection de distributions a priori (Distribution I) est présentée dans le Tableau 6.1 et ses résultats optimaux correspondants sont considérés comme la base de référence des comparaisons suivantes ;
- La deuxième sélection (Distribution II) prend des distributions normales pour E_a , puisque la moyenne et la variance de la distribution a priori suivent la norme GR-468-CORE ; les

- autres distributions a priori pour a et b sont les mêmes ;
- La troisième sélection considère des a priori non informatifs pour les quatre paramètres ; ainsi, la distribution uniforme est utilisée.

TABLE 6.7 – Différentes distributions a priori des paramètres du modèle

Paramètres	E_a	a	b
Distribution I	N(0,31 ; 0,01)	N(10 ; 2)	N(16,78 ; 2,72)
Distribution II	N(0,5 ; 0,2)	N(10 ; 2)	N(16,78 ; 2,72)
Distribution III	U(0,2 ; 0,9)	U(8 ; 15)	U(15 ; 30)

Les plans optimaux et les valeurs correspondantes des objectifs obtenus avec les différentes distributions a priori (présentés dans le Tableau 6.7) sont reportés dans le Tableau 6.8.

TABLE 6.8 – Résultat d'un plan de test optimal par différentes distribution a priori

Distribution a priori	Plan de test	$\phi(\eta)$
Distribution I	(40°C, 115°C, 3, 9)	12,1.10 ⁶
Distribution II	(40°C, 115°C, 3, 9)	4,13.10 ⁶
Distribution III	(40°C, 115°C, 3, 9)	3,48.10 ⁶

Sur les résultats obtenus, les distributions a priori exercent également un effet indispensable sur la conception optimale. Les plans de test avec des a priori informatifs peuvent aboutir à des résultats plus précis que ceux obtenus avec des a priori non informatifs. Des distributions a priori bien dérivées et correctement incorporées peuvent augmenter considérablement la précision de l'estimation de la fiabilité. De plus, les valeurs du D-optimal changent légèrement avec différentes distributions a priori, et le plan de test optimal ne change pas. En d'autres termes, le D-optimal obtenu par approche bayésienne, n'est pas si sensible à la sélection de la distribution a priori.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthodologie pour l'optimisation d'un plan de test accéléré. En ce sens, le critère d'optimisation est établi sur la base du modèle de dégradation développé dans les chapitres 4 et 5. La durée totale de test et le nombre total d'échantillons sont considérés comme la contrainte du problème d'optimisation afin d'établir l'ensemble des plans de test réalisables par la méthode exacte. Ensuite, la méthode d'optimisation bayésienne de l'ADT est proposée pour résoudre le problème des incertitudes liées aux paramètres du modèle de dégradation, de la limitation de REX relatif aux composants en recherche et développement. Dans l'approche bayésienne, la simulation Monte-Carlo est utilisée afin de créer les données de dégradation des éléments constituants et trouver un plan de test optimal.

Enfin, nous nous sommes intéressés au suivi d'une réalisation de test sur la LED Cree EZ1000 afin de valider la méthode proposée. Les résultats obtenus, données réelles de 12 LEDs Cree EZ1000, montrent que la méthode d'optimisation proposée nous permet d'estimer avec plus de précision les paramètres du modèle de dégradation, puis de calculer la fiabilité du composant.

Conclusion générale et Perspectives

La thèse s'inscrit globalement dans le contexte d'étude de la fiabilité de composants électroniques complexes. Elle s'intéresse plus spécifiquement aux composants optoélectroniques fabriqués au sein du CEA LETI de Grenoble (objet de recherche).

L'objectif global de la thèse est donc de développer une méthodologie (générique) d'optimisation de plan de test pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques complexes. La notion de complexe est à rapprocher de la notion de système, à savoir un ensemble d'éléments en interaction pour délivrer le service global attendu. Cette notion d'interaction se construit sur différents types de dépendances qui sont, soit maîtrisées dès la conception (ex. topologique, fonctionnel, physique) ou soit émergentes dans le fonctionnement (ex. propagation de dégradations, rayonnement). Sur la base de cette vision système, une des originalités de cette méthodologie en regard des procédures actuelles de test est de combiner différents types de connaissances/analyses pour optimiser la procédure de test à mettre en œuvre et non plus de travailler uniquement par tests de fiabilité empiriques. Dans la même logique, une deuxième originalité est le développement de modèles de fiabilité de niveau système, à partir de ces connaissances, pour offrir un autre moyen de calculer/vérifier une fiabilité avec un certain degré de confiance. De cette façon, la thèse a abordé 3 questions scientifiques en relation avec la modélisation de dégradation de l'élément ou composant complexe ; le calcul de leur fiabilité en prenant en compte l'interaction entre éléments, et l'optimisation d'un plan de test accéléré. Ces trois questions sont : "*Comment modéliser le processus de dégradation d'éléments en prenant en compte des facteurs d'influence ?*", "*Comment calculer la fiabilité d'un composant en prenant en compte l'interaction entre éléments ?*" et "*Comment optimiser les plans de test accéléré tout en assurant la bonne précision sur le calcul de fiabilité ?*".

À partir de ces questions et des verrous scientifiques qui s'y réfèrent, quatre contributions sont développées :

- La première contribution est liée à la modélisation et formalisation des impacts de dépendance entre les différents éléments du composant optoélectronique étudié (LED, diode laser DFB, photodiode). À cette fin, nous nous sommes focalisés sur le flux d'énergie et l'interaction possible entre éléments à partir de la simulation multi-physique. Un phénomène d'auto-échauffement sur des éléments isolés et une interaction de nature thermique entre éléments sur notre composant étudié a été mis en évidence. Ces premiers résultats nous ont servis de base pour fonder les autres contributions.

- La deuxième contribution est donc liée au développement d'un modèle de test de dégradation accélérée (ADT) tenant compte de l'impact de l'auto-échauffement dans le processus de dégradation du composant isolé. De cette façon, lorsque l'impact de l'auto-échauffement est quantifié, il nous permet de le formuler sur le taux de dégradation modifié. Un modèle intégrant l'impact de dépendance sur le processus de dégradation de l'élément est ensuite développé. La formulation de la fiabilité de l'élément est finalement dérivée. Une approche d'estimation du maximum de vraisemblance est également proposée pour estimer les paramètres du modèle proposé. Les résul-

tats obtenus, données réelles des 19 LED Cree EZ1000 (exemple des émetteurs isolés), montrent que le modèle de dégradation proposé s'adapte bien aux données expérimentales. Il est également démontré que le fait de ne pas prendre en compte l'auto-échauffement peut conduire à une erreur significative dans l'évaluation de la fiabilité des composants.

- En regardant le phénomène d'auto-échauffement et une interaction de nature thermique entre éléments, la troisième contribution concerne donc l'extension du modèle de dégradation dans la deuxième contribution pour calculer la fiabilité d'un composant complexe. Dans ce cas, l'incrément du niveau de dégradation d'un élément peut être affecté par lui-même et par un autre élément. Pour clarifier l'existence de l'influence d'un élément sur un autre, nous avons décrit en détail un composant optoélectronique "complexe". La compréhension des propriétés du composant étudié nous a aidé à modéliser et à quantifier l'effet des éléments sur la dégradation d'autres éléments. Puis, un modèle de dégradation prenant en compte les interactions stochastiques entre éléments a été développé. Enfin, le modèle de calcul de la fiabilité pour les deux niveaux d'élément et de composant complexe est étudié.

- La quatrième contribution se focalise sur l'optimisation d'un plan de test accéléré où le modèle de dégradation des éléments/composants est un des points importants. En ce sens, le critère d'optimisation est établi sur la base du modèle de dégradation développé dans les chapitres 4 et 5. La durée totale de test et le nombre total d'échantillons sont considérés comme la contrainte du problème d'optimisation afin d'établir l'ensemble des plans de test réalisable par la méthode exacte. Ensuite, la méthode d'optimisation bayésienne de l'ADT est proposée pour résoudre le problème des incertitudes liées aux paramètres du modèle de dégradation, de la limitation de REX relatif aux composants en recherche et développement. Dans la méthode d'optimisation bayésienne, la simulation de Monte-Carlo est adoptée afin de créer les données de dégradation des éléments constitutifs et trouver un plan de test optimal. Enfin, les résultats obtenus, sur un plan de test de 12 LED, ont montré que la méthode optimale proposée permet d'estimer plus précisément les paramètres du modèle de dégradation, puis de calculer la fiabilité du composant.

Selon ces contributions, les principaux apports scientifiques revendiqués dans cette thèse sont la modélisation, formalisation des interactions entre éléments du composant complexe sur le processus de dégradation pour chaque élément, et la proposition d'une méthode d'optimisation d'un plan de test accéléré en prenant compte les impacts d'interaction. Les contributions sont génériques et peuvent donc être appliquées à différents types de composant complexe.

Par rapport aux hypothèses posées pour développer ces contributions, les perspectives à ces travaux sont en autres :

- **Des expérimentations supplémentaires à mener.** La phase de validation n'a pas été faite sur le véhicule de test prévu initialement (ex. Situation COVID, délai de fabrication de certains éléments). Ainsi, les diodes laser utilisées, caractérisées dans Chapitre 2, sont les premières diodes assemblées au CEA. Les résultats obtenus dans les tests accélérés ne peuvent pas être utilisés pour conclure totalement sur le niveau de validation de nos propositions. Donc, les expérimentations pour ces types de composants ou d'autres sont nécessaires. Cette phase de validation est cruciale vis-à-vis du sujet de thèse puisque le résultat majeur attendu par le CEA est bien l'obtention de modèles (a priori) à même d'évaluer la fiabilité des composants. Sans validation approfondie par passage à l'échelle, la qualité des modèles proposés ne peut être totalement crédibilisée. Cependant, avec la méthode générale proposée dans cette étude, nous espérons que l'approche optimale sera utilisée lorsque le composant complexe sera fourni.
- **Analyse de défaillance.** Les informations obtenues à partir des performances et les mécanismes de défaillance impliqués constituent une partie importante d'évaluation de la fiabilité du composant. Dans nos travaux, nous nous sommes concentrés sur le modèle

de dégradation sur la base des performances du composant pour prédire leur fiabilité. Cependant, il est important de mettre en relation les mécanismes de défaillance avec ceux générés par les évaluations de fiabilité et donc d'établir la valeur de ces évaluations. Sans de bonnes techniques d'analyse des défaillances, le composant n'est qu'une boîte noire, et il est difficile, voire impossible, de savoir ce qui se passe à l'intérieur. Ensuite, les composants électroniques, et les composants optoélectroniques en particulier, sont très simples à un certain niveau, la plupart n'ayant que deux contacts, mais la détermination de la cause primaire est souvent complexe, car la cause primaire est souvent un élément miniature et nécessite une résolution quasi atomique pour être résolue. Afin de valider et améliorer le modèle de dégradation, la prise en compte de l'étape d'analyse de défaillance est nécessaire.

- **Modèles de dégradation plus généraux.** Dans certains cas, des défaillances soudaines peuvent se produire lorsque les composants sont soumis à un test. On peut utiliser un modèle mixte pour modéliser les défaillances soudaines et les défaillances causées par des dégradations graduelles. Le nombre de composants testés peut être considéré comme ayant deux parties, une partie pour la dégradation soudaine, une autre pour la dégradation graduelle.
- **Plan de test.** Ce travail futur considère un facteur de stress, en température, avec ses effets. Plus de deux facteurs de contrainte seraient plus intéressants, car l'effet d'interaction entre les contraintes devient plus compliqué. De même, ce travail a considéré un processus de Wiener modifié avec des conditions de contraintes accélérées constantes. Différents types de contraintes, par exemple des contraintes de type échelonné ou progressif, pourraient également être mis en œuvre pour approfondir les méthodes.

Sur une orientation perspective plus globale, il est aussi possible, à partir des résultants obtenus, de proposer à terme une méthodologie, **une première démarche scientifique** applicables pour le test accéléré de tous types de composants. Cette démarche se composerait de 4 étapes : Analyse a priori du composant et de ses éléments, Modélisation mathématique - Taux de dégradation et Modèle de dégradation, Pré-détermination d'un plan de test accéléré optimal, Expérimentations et Évaluation de la fiabilité.

1) Analyse a priori du composant et de ses éléments

L'objectif de cette étape est de connaître les caractérisations de performances du composant complexe étudié et de ses éléments, mais aussi des dépendances possibles entre éléments du composant. Pour ce faire, il faut pouvoir faire :

- a) Une étude du « nominal » (fonctionnement, organisation . . .) : Analyse fonctionnelle pour comprendre comment chaque élément intervient dans la réalisation des fonctions du composant ; Analyse de flux / d'énergies (pour comprendre comment chaque élément/fonction consomme, produit des énergies, d'autres flux, etc.) ; Analyse topologique (pour comprendre l'association de certains composants par rapport à de la série, du parallélisme, de la proximité . . .).
- b) Une étude du « non nominal » (dysfonction . . .) se construisant à partir du « nominal » : Analyse des défaillances de niveau fonctionnel, composant (technique) ; Analyse des causalités directes et indirectes en regard de chacune des défaillances (par exemple en exploitant la topologie, la transmission des flux/énergies) ; Analyse des champs perturbateurs (stress) affectant des défaillances, ou générés à partir des défaillances (ex. une montée en température d'un composant vient modifier les propriétés physiques d'un composant « proche » ; considération de la topologie) ; Analyse de dépendances (sur la base des analyses précédentes mises en évidence et/ou synthèse de dépendances fonctionnelles, stochastiques . . .) ; Analyse des connaissances fournies par le constructeur de chacun des

composants (exploitation des taux de défaillance fournis) ; Analyse de connaissances par analogie avec un système « proche » du système cible (se servir du REX de campagnes de tests a priori) ; Mise en évidence des éléments dits critiques pour le composant : La notion de critique est à considérer en regard de propriétés intrinsèques au composant, mais aussi extrinsèques dans la vision système.

Les étapes (a) et (b) vont bien évidemment s'appuyer sur des études bibliographiques, en sachant que les premiers éléments de l'étape (b) vont guider la bibliographie en lien avec « mécanismes de défaillance connus », stress influençant la durée de vie d'élément/composant. Les résultats de cette étape sont : Une première caractérisation des éléments dans une logique de leur test de fiabilité à la fois en regard de leurs propriétés propres (ex. fonctionnel, matériau . . .) ; mais aussi des interactions possibles vis-à-vis de leur implication au sein du composant.

2) Modélisation mathématique - Taux de dégradation et Modèle de dégradation

La caractérisation a priori des éléments et du composant complexe résultant de l'étape précédente nous permet à ce stade :

- De sélectionner les types de tests (de niveau élément et/ou composant complexe) les plus pertinents à mettre en œuvre en lien avec les composants identifiés comme critiques. L'objectif est ainsi de « réduire », par exploitation des connaissances a priori, l'espace des tests prescrits initialement et qui auraient été menés dans une démarche purement expérimentale,
- De sélectionner les stress les plus pertinents (crédibilité du stress vis-à-vis de son influence sur la durée de vie du composant et/ou du système) à mettre en œuvre au niveau des tests,
- De modéliser et formuler les impacts des interactions entre éléments sur des modèles de dégradation pour chacun des éléments du composant étudié.

Chaque type de modèle nécessitera ensuite une étape de définition/estimation de ces paramètres.

3) Pré-détermination d'un plan de test accéléré optimal

Sur la base des modèles de dégradation obtenus pour chacun des éléments en prenant en compte des facteurs d'influences (résultats de l'étape 2), l'objectif des travaux à ce stade a été de pré-déterminer un plan de test accéléré optimal. En général, le problème se pose sur le calcul de la fonction objectif (le déterminant de la matrice de Fisher). Mais, grâce aux études des étapes précédentes, nous pouvons connaître la valeur a priori des paramètres des modèles de dégradation proposés pour chacun des éléments du composant étudié. Donc, il est possible de proposer un algorithme qui permet de chercher un plan de test accéléré optimal en utilisant l'approche bayésienne. L'intérêt de cet algorithme est de s'appliquer pas seulement au niveau élément, mais aussi au niveau composant complexe. Pour travailler sur chacun de ces niveaux, il suffit simplement de changer la matrice de Fisher d'un niveau d'élément à un niveau composant.

4) Expérimentations et Évaluation de la fiabilité

Sur la base des éléments sélectionnés dans l'étape précédente, l'objectif de cette étape est de réaliser le plan de test accéléré optimal et d'évaluer la fiabilité du composant.

Les résultats d'expérimentations sont ensuite traités dans une phase d'analyse des données. Vis-à-vis des modèles, les données d'expérimentation (en lien avec les caractérisations définies) vont permettre au départ d'estimer /d'apprendre les différents paramètres des modèles au plus précis, puis si besoin de recalculer ces paramètres pour que le modèle soit toujours le plus proche de la réalité. La fiabilité du composant sera également calculée.

La phase d'analyse des données doit aussi permettre de valider, de raffiner, de remettre en cause . . . la caractérisation définie après les phases (a) et (b) de l'étape 1. Cela peut donc impacter cette caractérisation et amener une nouvelle itération à partir de l'étape 2.

Annexe

Annexe A. Augmentation de la température de jonction due à l'impact de l'auto-échauffement

En tant que dispositif semi-conducteur qui émet de la lumière, l'énergie électrique consommée par la LED se transforme principalement en lumière et en dissipation de chaleur.

$$P_e = P_{opt} + P_{heat} \quad (1)$$

Ensuite, [146, 147] montre la relation entre la température de jonction de la LED et l'intensité lumineuse, la tension directe suivant l'équation ((2)).

$$\begin{aligned} T_j &= T_k + R_{th} \cdot (I \cdot V_f - P) \\ V_f &= A + B \cdot T_j \end{aligned} \quad (2)$$

où, T_k est la température ambiante, R_{th} est la résistance thermique, $I \cdot V_f$ est la puissance électrique d'entrée, et P est l'intensité lumineuse ; A et B représentent le coefficient constant.

- Lorsque $t = 0$, en raison de la dissipation de chaleur, la température de la jonction augmente d'environ a .
- Ensuite, la relation entre l'intensité lumineuse et la température de la jonction dans le temps selon l'équation suivante :

$$\begin{aligned} P_{out}(t) &= \frac{P(t)}{P(0)} = c + d \cdot T_j(t) \\ X(t) &= 1 - P_{out}(t) = \frac{d \cdot \Delta T_j(t)}{c + d \cdot T_j(0)} \\ \Delta T_j(t) &= \frac{c + d \cdot T_j(0)}{d} \cdot X(t) = b \cdot X(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Ainsi, l'augmentation de la température de jonction affectant la dégradation de la LED peut être modélisée comme l'Equation. 4.7.

Annexe B. Déviation première ordre de la fonction de log-vraisemblance

$$\begin{aligned}
\frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \alpha} = & \frac{\left(2\alpha\beta^2 e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b^2 e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - \frac{\beta}{T_k} X(t_j) - e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1 \right)}{\beta b} \right)^2}{T_k'^4 \sigma^2 \left(e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1 \right)^2} \\
& - \frac{\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} b \left(X(t_j) - e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1 \right)}{\beta b} \right)^2}{T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1 \right)} \\
& - \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{S}} b \left(\frac{2e^{\frac{\beta}{S}} \sigma^2 f e^{-\frac{\beta}{S}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{S}} f b}{S^2} - \frac{\beta}{S} \pi}{\alpha} - \frac{S^2 e^{\frac{\beta}{S}} \sigma^2 \left(e^{-\frac{\beta}{S}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{S}} f b}{S^2} - 1 \right) \pi}{\alpha^2 \beta b} \right)}{2S^2 \sigma^2 \left(e^{-\frac{\beta}{S}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{S}} f b}{S^2} - 1 \right) \pi} \\
& - \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} b \left(-\frac{\beta f b e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - \frac{\beta}{T_k} X(t_{j-1}) - f e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - \frac{\beta}{T_k} X(t_j) - e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1 \right)}{\beta b} \right)}{T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1 \right)}
\end{aligned}
\tag{4}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k} b} \left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} - \frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right) e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} X(t_j) - e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right)}{\beta b} \right)^2 \\
\frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \beta} = & \frac{\left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right)^2}{T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right)} \\
& + \frac{\left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right)^2}{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k} b} X(t_j) - e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right)}{\beta b}} \right)^2 - \frac{\left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right)^2}{\alpha e^{-\frac{\beta}{T_k} b} X(t_j) - e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right)}{\beta b}} \right)^2 \\
& + \frac{T_k'^3 \sigma^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right)}{T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right)} \\
& - \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k} b} \left(- \left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} - \frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right) e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} - \frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right) e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} + \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right)}{\beta^2 b} \right)}{T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right)} \\
& \times \left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right)^2 \left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right)^2 \\
& - \frac{\left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right)^2}{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k} b} \frac{T_k'^2 \sigma^2 \left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} - \frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right) e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} + \frac{\beta}{T_k} \pi}{\alpha\beta b} + \frac{T_k' e^{\frac{\beta}{T_k} \sigma^2} \left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right)^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right) \pi}{\alpha\beta b} - \frac{T_k'^2 e^{\frac{\beta}{T_k} \sigma^2} \left(\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k} \right)^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right) \pi}{\alpha\beta^2 b}} \\
& - \frac{2T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right) \pi}{T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{\frac{-\frac{\beta}{T_k} fb}{T_k}} - 1 \right) \pi}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial b} = \frac{\left(2\alpha^2 \beta^2 e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b - \frac{\beta}{T_k}}{T_k'^2} X(t_j) - e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right)}{\beta b} \right)^2}{T_k'^4 \sigma^2 \left(e^{\frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right)^2} - \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} \left(X(t_j) - e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right)}{\beta b} \right)^2}{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} b \left(\frac{\beta}{2e^{\frac{\beta}{T_k}} \sigma^2 f e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b - \frac{\beta}{T_k}}{T_k'^2} \pi} - \frac{T_k'^2 e^{\frac{\beta}{T_k}} \sigma^2 \left(e^{\frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right) \pi}{\alpha\beta h^2} \right)} - \frac{T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{\frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{S^2} - 1} \right)}{2T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{\frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right) \pi} - \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} b \left(-\frac{\alpha\beta f e^{-\frac{\beta}{T_k}}}{T_k'^2} - \frac{\beta}{T_k} x - \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - \frac{\beta}{T_k} + \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right)}{\beta T_k'^2} \right) \left(X(t_j) - e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right)}{\beta b} \right)^2}{T_k'^2 \sigma^2 \left(e^{\frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right)}$$

(6)

$$\frac{\partial l(\alpha, \beta, b, \sigma)}{\partial \sigma} = \frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} b \left(X(t_j) - e^{-\frac{\beta}{T_k}} \frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} X(t_{j-1}) - \frac{T_k'^2 \left(e^{\frac{\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right)}{\beta b} \right)^2}{T_k'^2 \sigma^3 \left(e^{\frac{2\alpha\beta e^{-\frac{\beta}{T_k}} f b}{T_k'^2} - 1} \right)} - \frac{1}{\sigma}$$

(7)

Production scientifique personnelle

Revue JCR

[R1] Truong, M. T., Do, P., Mendizabal, L., & Iung, B. (2022). An improved accelerated degradation model for LED reliability assessment with self-heating impacts. *Microelectronics Reliability*, 128, 114428.

Congrès internationaux

[C1] Minh-Tuan Truong, Phuc Do, Laurent Mendizabal, Benoit Iung. Reliability assessment of optoelectronic systems with stochastic interactions under accelerated degradation testing. IEEE 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS2019), Rome 25-26 October 2019.

[C2] Minh-Tuan Truong, Laurent Mendizabal, Phuc Do Benoit Iung. A novel degradation model for LED reliability assessment with accelerated stress and self-heating consideration. IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2021), Digital Event June – July 2021.

Bibliographie

- [1] R. A. Soref, “Silicon-based optoelectronics,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 12, pp. 1687–1706, 1993.
- [2] S. Fathpour, “Emerging heterogeneous integrated photonic platforms on silicon,” *Nanophotonics*, vol. 4, no. 2, pp. 143–164, 2015.
- [3] O. Wada, “Optoelectronic integration-overview,” *Optoelectronic Integration : Physics, Technology and Applications*, pp. 1–16, 1994.
- [4] D. Inness and R. Rubenstein, *Silicon Photonics : Fueling the next information revolution*. Morgan Kaufmann, 2016.
- [5] M. Du Plessis, H. Aharoni, and L. W. Snyman, “Silicon leds fabricated in standard vlsi technology as components for all silicon monolithic integrated optoelectronic systems,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, no. 6, pp. 1412–1419, 2002.
- [6] T. Ferrotti, *Design, fabrication and characterization of a hybrid III-V on silicon transmitter for high-speed communications*. PhD thesis, Université de Lyon, 2016.
- [7] S. Z. Fatemi, *Planification des essais accélérés : optimisation, robustesse et analyse*. PhD thesis, Université d’Angers, 2012.
- [8] A. Birolini, *Reliability engineering : theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [9] B. Hamon, *Fiabilité des LED : mécanismes et modélisation*. PhD thesis, Grenoble, 2014.
- [10] M.-H. Chang, D. Das, P. Varde, and M. Pecht, “Light emitting diodes reliability review,” *Microelectronics Reliability*, vol. 52, no. 5, pp. 762–782, 2012.
- [11] H. Duprez, *From design to characterization of III-V on silicon lasers for photonic integrated circuits*. PhD thesis, Lyon, 2016.
- [12] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mashanovitch, *Diode lasers and photonic integrated circuits*. John Wiley & Sons, 2012.
- [13] P. W. Epperlein, *Semiconductor laser engineering, reliability and diagnostics : a practical approach to high power and single mode devices*. John Wiley & Sons, 2013.
- [14] J. Stokoe, P. Putland, and R. Sutherland, “A review of reliability evaluation techniques applied to ingaas pin photodiodes, germanium apds and ingaas apds,” *Quality and reliability engineering international*, vol. 5, no. 4, pp. 319–329, 1989.
- [15] S. Rauch, D. Lee, A. Vert, L. Jiang, and B. Min, “Reliability failure modes of an integrated ge photodiode for si photonics,” in *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pp. 1–3, IEEE, 2020.

- [16] M. Fukuda and T. Ikegami, "Reliability and degradation mechanism of ingaasp/lnp semiconductor lasers," in *Annales des télécommunications*, vol. 45, pp. 625–629, Springer, 1990.
- [17] R. Baillet and Y. Deshayes, *Reliability Investigation of LED Devices for Public Light Applications*. Elsevier, 2017.
- [18] N. Trivellin, M. Meneghini, E. Zanoni, K. Orita, M. Yuri, T. Tanaka, D. Ueda, and G. Meneghesso, "A review on the reliability of gan-based laser diodes," in *2010 IEEE International Reliability Physics Symposium*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [19] O. WADA, "Advances in optoelectronic integration," *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 1, no. 01, pp. 47–71, 1990.
- [20] M. Rausand and A. Hoyland, *System reliability theory : models, statistical methods, and applications*, vol. 396. John Wiley & Sons, 2003.
- [21] B. Sun, X. Jiang, K.-C. Yung, J. Fan, and M. G. Pecht, "A review of prognostic techniques for high-power white leds," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 8, pp. 6338–6362, 2016.
- [22] W. Nelson, *Accelerated testing : statistical models, test plans, and data analysis*, vol. 257. Wiley-Interscience, 1990.
- [23] J. A. McLinn, "Understanding accelerated degradation," in *2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, pp. 1–8, IEEE, 2016.
- [24] S. Limon, O. P. Yadav, and H. Liao, "A literature review on planning and analysis of accelerated testing for reliability assessment," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 33, no. 8, pp. 2361–2383, 2017.
- [25] A. Christou and B. Unger, *Semiconductor device reliability*, vol. 175. Springer Science & Business Media, 2012.
- [26] I. Mackintosh, "The reliability of integrated circuits," *Microelectronics Reliability*, vol. 5, no. 1, pp. 27–37, 1966.
- [27] L. Negre, *Caractérisation et modélisation de la fiabilité des transistors MOS en Radio Fréquence*. PhD thesis, Grenoble, 2011.
- [28] "Generic reliability assurance requirements for optoelectronic devices used in telecommunications equipment (GR-468-CORE)."
- [29] E. A. Elsayed, "Overview of reliability testing," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, no. 2, pp. 282–291, 2012.
- [30] G. Yang, "Accelerated life tests at higher usage rates," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 54, no. 1, pp. 53–57, 2005.
- [31] W. Nelson, "Analysis of performance-degradation data from accelerated tests," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 30, no. 2, pp. 149–155, 1981.
- [32] G.-B. Yang, "Optimum constant-stress accelerated life-test plans," *IEEE transactions on reliability*, vol. 43, no. 4, pp. 575–581, 1994.
- [33] Y. Zhu and E. A. Elsayed, "Design of accelerated life testing plans under multiple stresses," *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 60, no. 6, pp. 468–478, 2013.
- [34] R. Miller and W. Nelson, "Optimum simple step-stress plans for accelerated life testing," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 32, no. 1, pp. 59–65, 1983.

-
- [35] H.-Y. Xu and H.-L. Fei, "Planning step-stress accelerated life tests with two experimental variables," *IEEE transactions on reliability*, vol. 56, no. 3, pp. 569–579, 2007.
- [36] W. B. Nelson, *Accelerated testing : statistical models, test plans, and data analysis*. John Wiley & Sons, 2009.
- [37] D.-G. Chen, Y. Lio, H. K. T. Ng, and T.-R. Tsai, *Statistical modeling for degradation data*. Springer, 2017.
- [38] J. M. van Noortwijk, "A survey of the application of gamma processes in maintenance," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 94, no. 1, pp. 2–21, 2009.
- [39] X.-S. Si, W. Wang, C.-H. Hu, D.-H. Zhou, and M. G. Pecht, "Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation process," *IEEE Transactions on reliability*, vol. 61, no. 1, pp. 50–67, 2012.
- [40] N. Rasmekomen and A. K. Parlikad, "Condition-based maintenance of multi-component systems with degradation state-rate interactions," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 148, pp. 1–10, 2016.
- [41] P. Do, P. Scarf, and B. Iung, "Condition-based maintenance for a two-component system with dependencies," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 21, pp. 946–951, 2015.
- [42] L. Bian and N. Gebraeel, "Stochastic framework for partially degradation systems with continuous component degradation-rate-interactions," *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 61, no. 4, pp. 286–303, 2014.
- [43] B. Chambion, *Etude de la fiabilité de modules à base de LEDs blanches pour applications automobile*. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2014.
- [44] R. Tuttle, K. Haraguchi, M. Hodapp, J. Jiao, C. Miller, Y. Ohno, T. Pulsipher, E. Radkov, E. Richman, and D. Szombatfalvy, "Projecting long term lumen maintenance of led light source," *Illuminating Engineering Society*, 2012.
- [45] L. Mendizabal, *Fiabilité de diodes laser DFB 1, 55 μm pour des applications de télécommunication : Approche statistique et interaction composant-système*. PhD thesis, Ph. D, Université Bordeaux 1, Bordeaux, 2006.
- [46] G. Pedroza, *Evaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques pour des applications spatiales : Apport des caractérisations et des modélisations électro-optiques*. PhD thesis, Bordeaux 1, 2011.
- [47] M. Fukuda, "Reliability testing of semiconductor optical devices," in *Materials and Reliability Handbook for Semiconductor Optical and Electron Devices*, pp. 3–17, Springer, 2013.
- [48] A. K. Mallik, "Photodiode," *Himalayan Physics*, vol. 4, pp. 95–98, 2013.
- [49] "FLIR Systems | Imagerie thermique, vision nocturne et systèmes de caméras infrarouges | FLIR Systems."
- [50] A. Lannoy and H. Procaccia, *Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel*. Éditions Tec & doc, 2005.
- [51] C. J. Lasance, A. Poppe, *et al.*, *Thermal management for LED applications*. Springer, 2014.
- [52] H.-L. Ke, L. Jing, J. Hao, Q. Gao, Y. Wang, X.-x. Wang, Q. Sun, and Z.-J. Xu, "Analysis of junction temperature and modification of luminous flux degradation for white leds in a thermal accelerated reliability test," *Applied optics*, vol. 55, no. 22, pp. 5909–5916, 2016.
- [53] C. J. Lu and W. O. Meeker, "Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution," *Technometrics*, vol. 35, no. 2, pp. 161–174, 1993.

- [54] A. J. Lemoine and M. L. Wenocur, "A note on shot-noise and reliability modeling," *Operations Research*, vol. 34, no. 2, pp. 320–323, 1986.
- [55] M. Nikulin, L. Gerville-Réache, and V. Couallier, «*Statistique des essais accélérés*» by M. Nikulin, L. Gerville-Reache, V. Couallier. HERMES : London, 2007.
- [56] S.-T. Tseng, N. Balakrishnan, and C.-C. Tsai, "Optimal step-stress accelerated degradation test plan for gamma degradation processes," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 58, no. 4, pp. 611–618, 2009.
- [57] F. Guérin, M. Barreau, F. Coadou, and R. Idrissi, "Estimation de la fiabilité par des essais de dégradation," *Proc. QUALITA*, 2009.
- [58] A. J. Lemoine and M. L. Wenocur, "On failure modeling," *Naval research logistics quarterly*, vol. 32, no. 3, pp. 497–508, 1985.
- [59] G. Whitmore, "Estimating degradation by a wiener diffusion process subject to measurement error," *Lifetime data analysis*, vol. 1, no. 3, pp. 307–319, 1995.
- [60] L. Trevisanello, M. Meneghini, G. Mura, M. Vanzi, M. Pavesi, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Accelerated life test of high brightness light emitting diodes," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 8, no. 2, pp. 304–311, 2008.
- [61] T.-R. Tsai, C.-W. Lin, Y.-L. Sung, P.-T. Chou, C.-L. Chen, and Y. Lio, "Inference from lumen degradation data under wiener diffusion process," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, no. 3, pp. 710–718, 2012.
- [62] J. Huang, D. S. Golubović, S. Koh, D. Yang, X. Li, X. Fan, and G. Zhang, "Degradation modeling of mid-power white-light leds by using wiener process," *Optics express*, vol. 23, no. 15, pp. A966–A978, 2015.
- [63] X. Fu and J. Yang, "Reliability assessment of solid state lasers based on step stress accelerated degradation test," in *2017 2nd Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference (JIMEC 2017)*, pp. 621–624, Atlantis Press, 2017.
- [64] W. Wu, Y. Wang, D. Yu, H. Fu, K. Wang, and M. Wang, "Reliability prediction of high power laser diodes for space application considering the effect of temperature drift," in *2018 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)*, pp. 517–521, IEEE, 2018.
- [65] Y. Wang, Z.-S. Ye, and K.-L. Tsui, "Stochastic evaluation of magnetic head wears in hard disk drives," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 50, no. 5, pp. 1–7, 2013.
- [66] J. Zhou, J. Yao, Y. Song, and H. Hu, "The step-down-stress accelerated storage testing evaluation methods of small sample electronic products based on arrhenius model," in *2014 10th international conference on reliability, maintainability and safety (ICRMS)*, pp. 908–912, IEEE, 2014.
- [67] L. Wang, H. Zhang, and H. Xue, "Life prediction based on degradation amount distribution using composite time series analysis," *Ieri Procedia*, vol. 1, pp. 217–224, 2012.
- [68] S. H. Park and J. H. Kim, "Lifetime estimation of led lamp using gamma process model," *Microelectronics Reliability*, vol. 57, pp. 71–78, 2016.
- [69] M. S. Ibrahim, J. Fan, W. K. Yung, Z. Wu, and B. Sun, "Lumen degradation lifetime prediction for high-power white leds based on the gamma process model," *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1–16, 2019.
- [70] Z.-S. Ye and M. Xie, "Stochastic modelling and analysis of degradation for highly reliable products," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, vol. 31, no. 1, pp. 16–32, 2015.

-
- [71] L.-C. Tang, G. Yang, and M. Xie, "Planning of step-stress accelerated degradation test," in *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004-RAMS*, pp. 287–292, IEEE, 2004.
- [72] S.-T. Tseng and Z.-C. Wen, "Step-stress accelerated degradation analysis for highly reliable products," *Journal of Quality Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 209–216, 2000.
- [73] T.-R. Tsai, Y. Lio, and N. Jiang, "Optimal decisions on the accelerated degradation test plan under the wiener process," *Quality Technology & Quantitative Management*, vol. 11, no. 4, pp. 461–470, 2014.
- [74] C.-M. Liao and S.-T. Tseng, "Optimal design for step-stress accelerated degradation tests," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 55, no. 1, pp. 59–66, 2006.
- [75] X. Wang, N. Balakrishnan, and B. Guo, "Residual life estimation based on a generalized wiener degradation process," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 124, pp. 13–23, 2014.
- [76] X. Wang, B. Guo, and Z. Cheng, "Residual life estimation based on bivariate wiener degradation process with time-scale transformations," *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 84, no. 3, pp. 545–563, 2014.
- [77] A. Molini, P. Talkner, G. G. Katul, and A. Porporato, "First passage time statistics of brownian motion with purely time dependent drift and diffusion," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 390, no. 11, pp. 1841–1852, 2011.
- [78] R. Harman and F. Štulajter, "Optimality of equidistant sampling designs for the brownian motion with a quadratic drift," *Journal of Statistical Planning and Inference*, vol. 141, no. 8, pp. 2750–2758, 2011.
- [79] X.-S. Si, W. Wang, C.-H. Hu, M.-Y. Chen, and D.-H. Zhou, "A wiener-process-based degradation model with a recursive filter algorithm for remaining useful life estimation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 35, no. 1-2, pp. 219–237, 2013.
- [80] Z.-Q. Wang, C.-H. Hu, W. Wang, and X.-S. Si, "An additive wiener process-based prognostic model for hybrid deteriorating systems," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 63, no. 1, pp. 208–222, 2014.
- [81] Z. Huang, Z. Xu, W. Wang, and Y. Sun, "Remaining useful life prediction for a nonlinear heterogeneous wiener process model with an adaptive drift," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 64, no. 2, pp. 687–700, 2015.
- [82] X. Yang, B. Sun, Z. Wang, C. Qian, Y. Ren, D. Yang, and Q. Feng, "An alternative lifetime model for white light emitting diodes under thermal–electrical stresses," *Materials*, vol. 11, no. 5, p. 817, 2018.
- [83] Z. Tu, Z. Zhou, and X. Wang, "Reliability characterization of silicon-based germanium waveguide photodetectors," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 5, p. 057103, 2014.
- [84] J. J.-S. Huang, Y.-H. Jan, H. Chang, C.-J. Ni, E. Chou, S.-K. Lee, H.-S. Chen, and J.-W. Shi, "Nanoscale iii-v semiconductor photodetectors for high-speed optical communications," *Chapter*, vol. 3, pp. 49–73, 2018.
- [85] M. C. O. Keizer, S. D. P. Flapper, and R. H. Teunter, "Condition-based maintenance policies for systems with multiple dependent components : A review," *European Journal of Operational Research*, vol. 261, no. 2, pp. 405–420, 2017.
- [86] R. P. Nicolai and R. Dekker, "Optimal maintenance of multi-component systems : a review," *Complex system maintenance handbook*, pp. 263–286, 2008.

- [87] R. Assaf, P. Do, P. Scarf, and S. Nefti-Meziani, “Wear rate-state interaction modelling for a multi-component system : Models and an experimental platform,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 28, pp. 232–237, 2016.
- [88] R. B. Nelsen, *An introduction to copulas*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [89] P. Wang and D. W. Coit, “Reliability prediction based on degradation modeling for systems with multiple degradation measures,” in *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004-RAMS*, pp. 302–307, IEEE, 2004.
- [90] P. Jaworski, F. Durante, W. K. Hardle, and T. Rychlik, *Copula theory and its applications*, vol. 198. Springer, 2010.
- [91] Z. Pan, N. Balakrishnan, Q. Sun, and J. Zhou, “Bivariate degradation analysis of products based on wiener processes and copulas,” *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 83, no. 7, pp. 1316–1329, 2013.
- [92] Z. Yang, J. Zhao, C. Guo, and L. Li, “Degradation and reliability modeling of two-component system with degradation rate interaction,” *International Journal of Performance Engineering*, vol. 14, no. 11, p. 2711, 2018.
- [93] H. Wang, Y. Zhao, and X. Ma, “Mechanism equivalence in designing optimum step-stress accelerated degradation test plan under wiener process,” *Ieee Access*, vol. 6, pp. 4440–4451, 2018.
- [94] A. Heavens, “Generalisations of fisher matrices,” *Entropy*, vol. 18, no. 6, p. 236, 2016.
- [95] H. Guo and R. Pan, “D-optimal reliability test design for two-stress accelerated life tests,” in *2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 1236–1240, IEEE, 2007.
- [96] Y. Yu, C. Hu, X. Si, and J. Zhang, “Modified bayesian d-optimality for accelerated degradation test design with model uncertainty,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 42181–42189, 2019.
- [97] H. Lim and B.-J. Yum, “Optimal design of accelerated degradation tests based on wiener process models,” *Journal of Applied Statistics*, vol. 38, no. 2, pp. 309–325, 2011.
- [98] M. Boulanger and L. A. Escobar, “Experimental design for a class of accelerated degradation tests,” *Technometrics*, vol. 36, no. 3, pp. 260–272, 1994.
- [99] H.-F. Yu and S.-T. Tseng, “Designing a degradation experiment,” *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 46, no. 6, pp. 689–706, 1999.
- [100] S.-J. Wu and C.-T. Chang, “Optimal design of degradation tests in presence of cost constraint,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 76, no. 2, pp. 109–115, 2002.
- [101] H.-F. Yu and C.-H. Chiao, “An optimal designed degradation experiment for reliability improvement,” *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 51, no. 4, pp. 427–433, 2002.
- [102] H.-F. Yu, “Designing an accelerated degradation experiment by optimizing the estimation of the percentile,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 19, no. 3, pp. 197–214, 2003.
- [103] H. Wang, Y. Zhao, X. Ma, and Z. Wang, “A novel pseudo-maximum likelihood estimation method for accelerated degradation tests under wiener process,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 35, no. 1, pp. 304–317, 2019.
- [104] G. Jin and D. Matthews, “Measurement plan optimization for degradation test design based on the bivariate wiener process,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 30, no. 8, pp. 1215–1231, 2014.

-
- [105] Z.-q. PAN, J.-l. ZHOU, and B.-h. PENG, "Optimal design for accelerated degradation tests with several stresses based on wiener process," *Systems Engineering-Theory & Practice*, vol. 29, no. 8, pp. 64–71, 2009.
- [106] R. Assaf, P. Do, S. Nefti-Meziani, and P. Scarf, "Wear rate–state interactions within a multi-component system : a study of a gearbox-accelerated life testing platform," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability*, vol. 232, no. 4, pp. 425–434, 2018.
- [107] C.-C. Tsai, C.-T. Lin, and N. Balakrishnan, "Optimal design for accelerated-stress acceptance test based on wiener process," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 64, no. 2, pp. 603–612, 2015.
- [108] X. Li, M. Rezvanizani, Z. Ge, M. Abuali, and J. Lee, "Bayesian optimal design of step stress accelerated degradation testing," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 502–513, 2015.
- [109] X. Li, Y. Hu, J. Zhou, X. Li, and R. Kang, "Bayesian step stress accelerated degradation testing design : A multi-objective pareto-optimal approach," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 171, pp. 9–17, 2018.
- [110] H. Zhang, Y. Chen, and R. Kang, "Optimal design of step stress accelerated degradation test and reliability assessment for quartz flexible accelerometers," in *2010 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [111] S.-I. Sung and B.-J. Yum, "Optimal design of step-stress accelerated degradation tests based on the wiener degradation process," *Quality Technology & Quantitative Management*, vol. 13, no. 4, pp. 367–393, 2016.
- [112] J.-R. Zhang, T.-M. Jiang, X.-Y. Li, and L.-Z. Wang, "Optimization of step stress accelerated degradation test plans," in *2010 IEEE 17Th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 947–951, IEEE, 2010.
- [113] C.-H. Hu, M.-Y. Lee, and J. Tang, "Optimum step-stress accelerated degradation test for wiener degradation process under constraints," *European Journal of Operational Research*, vol. 241, no. 2, pp. 412–421, 2015.
- [114] Z. Pan and N. Balakrishnan, "Multiple-steps step-stress accelerated degradation modeling based on wiener and gamma processes," *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, vol. 39, no. 7, pp. 1384–1402, 2010.
- [115] C.-C. Tsai, S.-T. Tseng, and N. Balakrishnan, "Optimal design for degradation tests based on gamma processes with random effects," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, no. 2, pp. 604–613, 2012.
- [116] M. Amini, S. Shemehsavar, and Z. Pan, "Optimal design for step-stress accelerated test with random discrete stress elevating times based on gamma degradation process," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 32, no. 7, pp. 2391–2402, 2016.
- [117] F. Duan and G. Wang, "Optimal step-stress accelerated degradation test plans for inverse gaussian process based on proportional degradation rate model," *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 88, no. 2, pp. 305–328, 2018.
- [118] H. Wang, G.-j. Wang, and F.-j. Duan, "Planning of step-stress accelerated degradation test based on the inverse gaussian process," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 154, pp. 97–105, 2016.
- [119] S. Sung, "Optimal design of ramp-stress accelerated degradation tests based on the wiener process," *Microelectronics Reliability*, vol. 100, p. 113393, 2019.

- [120] Q. Li, *Accelerated degradation test planning and optimization*. PhD thesis, The University of Arizona, 2002.
- [121] M. Fukuda, “Reliability and degradation of semiconductor lasers and leds,” *Artech House*, pp. 325–333, 1991.
- [122] M. Meneghini, A. Tazzoli, G. Mura, G. Meneghesso, and E. Zanoni, “A review on the physical mechanisms that limit the reliability of gan-based leds,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 57, no. 1, pp. 108–118, 2009.
- [123] L.-R. Trevisanello, M. Meneghini, G. Mura, C. Sanna, S. Buso, G. Spiazzi, M. Vanzi, G. Meneghesso, and E. Zanoni, “Thermal stability analysis of high brightness led during high temperature and electrical aging,” in *Seventh International Conference on Solid State Lighting*, vol. 6669, p. 666913, International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [124] F. G. Della Corte, G. Pangallo, R. Carotenuto, D. Iero, G. Marra, M. Merenda, and S. Rao, “Temperature sensing characteristics and long term stability of power leds used for voltage vs. junction temperature measurements and related procedure,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 43057–43066, 2020.
- [125] M. Buffolo, C. De Santi, M. Meneghini, D. Rigon, G. Meneghesso, and E. Zanoni, “Long-term degradation mechanisms of mid-power leds for lighting applications,” *Microelectronics Reliability*, vol. 55, no. 9-10, pp. 1754–1758, 2015.
- [126] C. E. L. D. Sheet, “Cree’s ezbright leds,” 2007.
- [127] M. S. Ibrahim, J. Fan, W. K. Yung, A. Prisacaru, W. van Driel, X. Fan, and G. Zhang, “Machine learning and digital twin driven diagnostics and prognostics of light-emitting diodes,” *Laser & Photonics Reviews*, vol. 14, no. 12, p. 2000254, 2020.
- [128] P. E. Protter, “Stochastic differential equations,” in *Stochastic integration and differential equations*, pp. 249–361, Springer, 2005.
- [129] B. Oksendal, *Stochastic differential equations : an introduction with applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [130] M. Meneghini, N. Trivellin, K. Orita, M. Yuri, D. Ueda, E. Zanoni, and G. Meneghesso, “Analysis of the role of current, temperature, and optical power in the degradation of ingan-based laser diodes,” *IEEE transactions on electron devices*, vol. 56, no. 2, pp. 222–228, 2009.
- [131] D. Florens-Zmirou, “Approximate discrete-time schemes for statistics of diffusion processes,” *Statistics : A Journal of Theoretical and Applied Statistics*, vol. 20, no. 4, pp. 547–557, 1989.
- [132] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, “Convergence properties of the nelder–mead simplex method in low dimensions,” *SIAM Journal on optimization*, vol. 9, no. 1, pp. 112–147, 1998.
- [133] H. Duprez, A. Descos, T. Ferrotti, C. Sciancalepore, C. Jany, K. Hassan, C. Seassal, S. Menezo, and B. B. Bakir, “1310 nm hybrid inp/ingaasp on silicon distributed feedback laser with high side-mode suppression ratio,” *Optics express*, vol. 23, no. 7, pp. 8489–8497, 2015.
- [134] T. Ferrotti, B. Blampey, C. Jany, H. Duprez, A. Chantre, F. Boeuf, C. Seassal, and B. B. Bakir, “Co-integrated 1.3 μm hybrid iii-v/silicon tunable laser and silicon mach-zehnder modulator operating at 25gb/s,” *Optics express*, vol. 24, no. 26, pp. 30379–30401, 2016.
- [135] S. Forrest, “Monolithic optoelectronic integration : A new component technology for light-wave communications,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 32, no. 12, pp. 2640–2655, 1985.

-
- [136] B. Huang, X. Zhang, W. Wang, Z. Dong, N. Guan, Y. Gui, and H. Chen, "A monolithic integration optoelectronic integrated circuit in standard cmos technology," in *7th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, pp. 117–119, IEEE, 2010.
- [137] M. Hamacher, R. Kaiser, H. Heidrich, P. Albrecht, B. Borchert, K. Janiak, R. Löffler, S. Malchow, W. Rehbein, and H. Schroeter-Janssen, "Monolithic integration of lasers, photodiodes, waveguides and spot size converters on gainasp/inp for photonic ic applications," in *Conference Proceedings. 2000 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (Cat. No. 00CH37107)*, pp. 21–24, IEEE, 2000.
- [138] T.-P. Ma and P. V. Dressendorfer, "Ionizing radiation effects in mos devices and circuits," 1989.
- [139] M. B. El_Mashade, M. Ashry, S. M. Eladl, and M. Rageh, "Experimental measurements of some optoelectronic devices before and after gamma irradiation," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, vol. 3, no. 6, pp. 1–12, 2004.
- [140] P. Yannakopoulos, A. Skountzos, and M. Vesely, "Influence of ionizing radiation in electronic and optoelectronic properties of iii–v semiconductor compounds," *Microelectronics journal*, vol. 39, no. 5, pp. 732–736, 2008.
- [141] V. T. Tsakiri, A. Skountzos, P. Yannakopoulos, and E. Verrelli, "Effects of ionizing radiation on optoelectronic devices," *Optoelectronic Devices and Properties*, p. 103, 2011.
- [142] A. H. Johnston, "Radiation effects in optoelectronic devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60, no. 3, pp. 2054–2073, 2013.
- [143] A. Lay-Ekuakille, A. Massaro, S. P. Singh, I. Jabłoński, M. Z. U. Rahman, and F. Spano, "Optoelectronic and nanosensors detection systems : A review," *IEEE Sensors Journal*, 2021.
- [144] J. Piprek, *Semiconductor optoelectronic devices : introduction to physics and simulation*. Elsevier, 2013.
- [145] K. Chaloner and I. Verdinelli, "Bayesian experimental design : A review," *Statistical Science*, pp. 273–304, 1995.
- [146] L. Jayasinghe, T. Dong, and N. Narendran, "Is the thermal resistance coefficient of high-power leds constant?," in *Seventh international conference on solid state lighting*, vol. 6669, p. 666911, International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [147] D. Chu, M. Touzelbaev, K. E. Goodson, S. Babin, and R. F. Pease, "Thermal conductivity measurements of thin-film resist," *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 19, no. 6, pp. 2874–2877, 2001.