

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



N°D'ORDRE : M .../2015

MEMOIRE

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MAGISTER

SPECIALITE : GENIE ÉLECTRIQUE

OPTION : Modélisation des signaux aléatoires et applications

Par

Hamdi Achtar

Etude de Fiabilité et Sureté de Fonctionnement des Composants Electroniques

Soutenu le : 23 /04 / 2015 devant le jury composé de

Président

Mr YAGOUBI Benabdellah PROFESSEUR U. Mostaganem

Examineurs

Mr BOUKORTT Abdelkader PROFESSEUR U. Mostaganem

Mr HADRI Baghdad PROFESSEUR U. Mostaganem

Encadreur

Mme HOCINE Rachida MAITRE DE CONFERENCE U. USTO Oran

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier notre DIEU le tout puissant et toutes les personnes qui ont aidés a l'élaboration de cette modeste étude.

Mon honorable encadreur et professeur Madame Hocine Rachida pour laquelle j'ai beaucoup de respect et d'admiration et qui m'a consacré une grande partie de son précieux temps, je la remercie pour ses bons conseils et ses très bonnes orientations

J'adresse mes remerciements les plus respectueux aux membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Je remercie en premier lieu le Professeur Yakoubi en tant que président de jury et infiniment Messieurs les Professeurs A. Boukortt et A.Hadri comme examinateurs de ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce travail méthodologique à :

*Mon père et ma mère, pour m'avoir encouragé et soutenu durant tout le
long de mon parcours.*

Mes très chères sœurs, Aida, Afifa, Abla et mon frère Adel .

Mes chères amis Hanane et Hanaa

Mon très cher.....Abdellah

Achtar

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Test de quantification.

Tableau II.1: Mécanismes de vieillissement des composants soumis au cyclage thermique.

Tableau III.1 : Les valeurs de j , j' , u , v , et w utilisées dans les équations (III.10) et (III.11).

Tableau III.2 : Propriétés thermiques des matériaux utilisés.

Tableau III.3 : Variation du taux de défaillance du l'IGBT en fonction de la température

Tableau III.4 : Illustration des résultats de comparaison.

Liste des Figures

- Figure I.1 : Attributs de la sûreté de fonctionnement (SdF).
- Figure I.2 : Concepts de sûreté de fonctionnement.
- Figure I.3 : Représentation du MTTF, du MUT, du MDT et du MTBF.
- Figure I.4 : Etapes de l'élaboration de l'AMDE.
- Figure I.5 : Taux de défaillances $\chi(t)$ en fonction du temps.
- Figure II.1 : Assemblage classique de puissance monté sur son radiateur.
- Figure II.2 : (a) Levée du fil de câblage, (b) fracture du pied du fil de câblage.
- Figure II.3 : Composant IGBT : (a) Structure (b) Schéma équivalent.
- Figure II.4 : Conduction de deux cellules IGBT adjacentes.
- Figure II.5 : Blocage de deux cellules IGBT adjacentes.
- Figure II.6 : Caractéristiques et modèle statique :
- (a) Diode,
 - (b) Modèle MOS/IGBT,
 - (c) Transistor IGBT
- Figure II.7 : Modèle dynamique de la diode et de l'IGBT .
- Figure II.8 : Représentation des différentes structures Planar :
- (a) NPT ;
 - (b) PT ;
 - (c) SPT.
- Figure II.9 : Représentation :
- (a) d'une structure Trench avec couche tampon ;
 - (b) des flux de courant dans une structure Planar et Trench.
- Figure II.10: Coupe du Trench CSTBT Light Punch Through
- Figure II.11 : Application de l'IGBT pour les véhicules électriques
- Figure II.12 : Fissure au pied d'un fil de bonding
- Figure II.13 : Déformation de la surface d'une métallisation
- Figure II.14 : Rupture du substrat d'un module
- Figure II.15 : Délamination d'une puce IGBT
- Figure II.16 : Rupture d'un bonding d'émetteur due à la corrosion
- Figure II.17 : Fusion locale du silicium d'une puce (vue en coupe) due au rayonnement cosmique
- Figure II.18 : Causes principales de la défaillance électronique
- Figure II.19 : Evolution de la puissance thermique dissipée pour un transistor (FETS et IGBTs) et un conducteur Smart
- Figure III.1 : Circuit équivalent du model d'un nœud.
- Figure III.2 : Représentation d'un nœud TLM-3D.
- Figure III.3 : Conditions aux limites.

Figure III.4 : Le modèle du module de puissance.

(a) les matériaux physiques constituaient l'IGBT.

(b) la structure schématique d'un module IGBT.

(c) montage physique du module IGBT sur la plaque du moteur.

Figure III.5 : Evolution de la température suivant l'axe Z.

Figure III.6 : Evolution de la diffusion de la température du module IGBT .

(a) suivant l'axe YZ.

(b) Suivant l'axe XY.

Figure III.7 Niveaux d'impulsions pris en Modulation par Largeur d'Impulsions

Figure III.8 : Réponse dynamique du module IGBT en mode impulsif MLI.

Figure III.9 : Profil de diffusion de chaleur générée pour des impulsions successives appliquées au module de puissance IGBT.

Figure III.10 : Système à structure simple.

Figure III.11 : Système à structure complexe.

Figure III.12 : Système avec n composants en séries.

Figure III.13 : Système avec n composants en parallèles.

Figure III.14 : Evolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage en série.

Figure III.15 : Evolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage parallèle.

Figure III.16: Evolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage en parallèle+série (mixte).

Figure III.17 : Comparaison de différentes configurations.

Figure III.18 : Evolution du facteur accélératif en fonction de la température.

Figure III.19 : Evolution du nombre de cycle en fonction de ΔT_j .

Nomenclature

SDF : Sûreté de fonctionnement

MTBF: Mean operating time between failures

MTTF : Mean time to failure

MTTR : Mean time to repair or restoration

MUT : Mean up time

SADT : System analysis and design technique

BDF : Blocs diagrammes fonctionnels

APR : Analyse préliminaire des risques

AMDEC : Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité

L'AEEL : Analyse des effets des erreurs logicielles

DFR : Design For Reliability

FDTD : La méthode de différence finie dans le domaine temporel

PEEC : Circuit équivalent de l'élément partiel

MoM : La méthode des moments

TLM : La méthode de ligne de transmissions

DGA : Délégation Générale pour l'Armement française

CTE : Coefficient de dilatation thermique

MLI : Modulation de largeur d'impulsion (PWM)

CEM : Comptabilité Electromagnétique

CFD : Computational Fluid Dynamics

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

Sommaire

Résumé	1
Introduction générale.....	3
CHAPITRE I :	
I.1 Introduction.....	5
I.2 La Sûreté de fonctionnement.....	5
I.2.1 Introduction.....	5
I.2.2 Historique.....	6
I.2.3 Notions fondamentales de sûreté de fonctionnement.....	6
I.2.3.1. La fiabilité.....	7
a. <i>La fiabilité opérationnelle</i>	7
b. La fiabilité extrapolée	8
c. La fiabilité prévisionnelle.....	8
d. La fiabilité intrinsèque	8
I.2.3.2. La Maintenabilité.....	8
I.2.3.3. la Disponibilité.....	9
I.2.3.4. La sécurité.....	9
I.2.4 Les temps caractéristiques de la Sûreté de Fonctionnement.....	10
I.3 Méthode d'analyse de sûreté de fonctionnement.....	11
I.3.1 Les outils utilisés pour l'analyse fonctionnelle.....	12
I.3.2 Les outils utilisés pour l'analyse dysfonctionnelle	12
I.3.3. Autres méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement.....	14
I.4 Aptitudes des systèmes et composants et mode de défaillance	16
I.4.1. Défaillances des systèmes	17
I.4.1.1 Expressions usuels en défaillance.....	18
I.4.1.2 Le taux de défaillance	18
I.4.1.3 Courbe représentative du taux de défaillance.....	19
I.4.2 Classification des défaillances en systèmes électroniques.....	21

I.4.2.1 La classification des défaillances en fonction du degr-----	21
I.4.2.2 Classification des défaillances en fonction de la vitesse d'apparition-----	21
I.4.2.3 Classification des défaillances en fonction de la vitesse et du degré -----	21
I.5. Causes et mécanismes de défaillance des composants électroniques-----	21
I.5.1 Température élevée-----	22
I.5.2 Température basse -----	22
I.5.3 Contamination atmosphérique -----	23
I.5.4 Humidité-----	23
I.5.5 Facteurs climatiques et géographiques -----	23
I.5.6 Vibrations et chocs -----	24
I.5.7 Micro-organismes -----	24
I.5.8 Les rayonnements nucléaires -----	24
I.6 Etude préventive des défaillances-----	25
I.6.1 Tests de qualification-----	25
I.6.2 Principaux tests de qualification et leur planification-----	26
I.6.3 Prototypage virtuel et évaluation de la fiabilité-----	27
I.7 Conclusion-----	28
CHAPITRE II :	
II.1. Introduction-----	29
II.2 Fiabilité des modules de puissance -----	29
II.2.1 Principaux modes de défaillances des modules de puissance-----	29
II.2.1.1 Fatigue thermique des joints de brasures-----	30
II.2.1.2 Défaillance du fil de câblage-----	32
II.2.1.3 Défaillance au niveau de la puce de puissance-----	32
II.2.2 Evaluation de la fiabilité-----	33
II.2.3 Durée de vie des modules de puissance-----	34
II.3 Exemple de défaillance des composants de puissance IGBTs-----	34
II.3.1 L'IGBT : Principe physique et technologie-----	34
II.3.2 Comportement électrique du module IGBT au sein d'une cellule de commutation-----	37
II.3.2.1 Caractéristiques statiques de l'IGBT et de la diode-----	38
II.3.2.2 Caractéristiques dynamiques de l'IGBT -----	39

II.3.3 Les différentes structures d'IGBT-----	40
II.3.3.1 La structure Planar-----	40
II.3.3.2 La structure Trench -----	41
II.3.3.3 Les structures les plus récentes-----	42
II.3.4 L'utilisation de l'IGBT -----	42
II.3.5 Mécanismes de dégradation et modes de défaillance des modules IGBT-----	43
II.3.5.1 Les effets du cyclage thermique-----	44
a. Déconnexion des faisceaux de bonding-----	44
b. Craquelures au niveau des faisceaux de bonding-----	44
c. Déformation des métallisations en surface des puces -----	45
d. Cassure au niveau du substrat et des puces-----	46
e. Fatigue des brasures et délamination des puces et du substrat-----	46
f. La corrosion-----	49
II.3.5.2 L'électromigration-----	50
II.3.5.3 Le phénomène de décharges partielles-----	50
II.3.5.4 Les effets du rayonnement cosmique-----	50
II.3.5.5 Le vieillissement des oxydes de grille et leurs défaillances -----	51
II.4 L'effet de la température sur les composants électroniques-----	52
II.5 Conclusion-----	55
CHAPITRE III :	
III.1 Introduction -----	56
III.2 Equation de la chaleur -----	57
III.2.1 Principe et Equation de chaleur-----	57
III.2.2.1 Solutions Analytiques -----	58
➤ Méthode utilisant les séries de Fourier-----	58
➤ Méthode de transformation-----	58
➤ Méthode du Modèle Compact-----	58
➤ Méthode de séparation des variables-----	58
III.2.2.2 Solutions numériques-----	59
a. Les modèles numériques -----	59
➤ Méthodes des différences finies-----	59
➤ Méthodes des éléments finis-----	59
➤ Eléments de frontières-----	59
b. Méthodes dynamique des fluides -----	59
III.2.2.3 Solutions électrothermiques -----	60
a. Méthode directe (Fully Coupled Method) -----	60

b.Méthode de relaxation	60
II.2.2.4 Méthodes de mesures de température pratiques	60
III.3 Modélisation numérique de l'équation de chaleur.....	61
III.3.1 Introduction.....	61
➤La méthode de différence finie dans le domaine temporel (FDTD)	61
➤Circuit équivalent de l'élément partiel (PEEC)	61
➤La méthode des moments (MoM)	61
➤La méthode de ligne de transmissions (TLM)	61
III.3.2. La Méthode TLM	62
III.3.2.1 Principe de la méthode TLM	62
III.3.2.2 Procédure Numérique de la méthode TLM	64
➤Les températures a nodales.....	64
➤Les impulsions réfléchies.....	64
➤Les impulsions incidentes.....	65
➤Conditions aux limites	65
III.4 Modélisation de l'effet thermique dans un IGBT.....	67
III.4.1 Introduction.....	67
III.4.2. Comportant thermique de l'IGBT comme unité module--	67
III.4.2.1. Comportant thermique du module IGBT en mode MLI	72
III.5 Etude de Fiabilité du Module IGBT	76
III.5.1 Introduction	76
III.5.2 Généralités d'évaluation de la fiabilité des systèmes	76
a.Composants en série	77
➤La fiabilité du système	78
➤Le taux de défaillance du système.....	78
➤Le temps moyen de non défaillance.....	78
b.Composants en parallèle	78
➤La fiabilité du système.....	78
➤Le temps moyen de non défaillance	79
III.5.3 Variations de taux de défaillance.....	79
a. Variation du taux de défaillance pour assemblage en série du système.....	79
b. Variation du taux de défaillance pour assemblage en parallèle du système	80

c. Variation du taux de défaillance pour assemblage en série/ parallèle du système	80
d. Comparaison de différentes configurations	81
III.5.4 Calcul de taux de défaillance pour le module IGBT.....	82
III.5.4.1 Les recueils utilisés pour le calcul de fiabilité	82
a.MIL-HDBK-217F	82
b.UTE-C 80-810 (RDF2000)	83
c.FIDES	83
III.5.4.2 Variation du facteur d'accélération en fonction de la température de jonction	84
III.5.4.3 Variation du Nombre de cycles thermique en fonction de la variation de la température	85
III.5.4.4 Calcul du taux de défaillance de l'IGBT à partir du recueil MIL-HDBK-217F	86
III.5.4.5 Calcul du taux de défaillance de l'IGBT à partir du recueil FIDES.....	87
III.5.4.6 Comparaisons des méthodes pour $T_j=100^{\circ}\text{C}$	88
III.6. Le Management thermique du composant actif	89
Conclusion	90
CONCLUSION GENERALE.....	91
ANNEXE.....	93
BIBLIOGRAPHIE.....	94

Résumé

La fiabilité des composants électroniques destinés au trafic automobile est un point sensible au développement et donc de l'essor technologique des véhicules. Du fait de leur mode de fonctionnement et de leur environnement, ces composants subissent des contraintes plus importantes que dans les applications industrielles conventionnelles. Il est donc important de connaître ces contraintes si l'on désire estimer leur durée de vie et ainsi fiabiliser le système dans son intégralité. Dans le cas d'une étude de fiabilité, basée sur les problèmes de fatigue thermique, il est important de pouvoir estimer la température dans les zones dites fragiles du composant.

Une analyse unidimensionnelle et tridimensionnelle de TLM a été présentée pour étudier l'effet d'auto échauffement des dispositifs IGBT. Les résultats confirment clairement que les modules IGBT sont capables de générer une quantité considérable de chaleur, qui doit être dissipée efficacement pour éviter l'influence sur le fonctionnement du composant et même sa durée de vie. L'évaluation de la fiabilité d'un module de puissance est déterminée à partir des fiabilités de ses composants interconnectés en série et/ou en parallèle, mais on a eu besoin aussi des recueils de base pour avoir tous les paramètres spécifiques des composants insérés (Diodes et Transistors) pour déterminer le taux de défaillances probable et estimer leur durée de vie. Les résultats montrent que le taux de défaillance du l'IGBT augmente pour une augmentation ou élévation de la température de jonction, indiquant ainsi que le composant sous contraintes thermiques continues et à longues durées (quelques années) peut faire une défaillance du aux claquages par exemple de la jonction, et n' y aura pas de fonctionnement normal du module de puissance et ainsi une anomalie des systèmes d'application.

Abstract

The reliability of electronic components for automobile traction is a sensitive point of their development and therefore the technological growth of electric vehicles. Due to their mode operate and their environment, these components are subjected to higher stress especially in conventional industrial applications. It is therefore important to know these constraints if we want to estimate their life and thus the reliability of the entire system.

In the case of a reliability study, based on the thermal fatigue problems, it is important to estimate the temperature called "fragile zones" of the component. A one-dimensional and three-dimensional analysis of TLM was made to study the self heating effect in the IGBT devices. The results clearly confirm that the IGBT modules are capable of generating a considerable amount of heat which must be dissipated effectively to avoid the influence on the component's operation and even its lifetime.

The evaluation of the reliability of a power module is determined from the reliabilities of its components interconnected in series and in parallel, but we needed basic collections of all the specific parameters of the inserted components (Diodes and Transistors) to determine the rate of probable failure and estimate their lifetime.

The results show that the IGBT failure rate increases for an increase or rise in junction temperature, thus indicating that the components in continuous thermal stresses and along periods (several years) failure due to the semiconductor junction strains , so the power module will be no in normal operation and we will have an anomaly of the application system.

ملخص

اعتمادية المكونات الإلكترونية المستعملة في السيارات مهمة لتطور التكنولوجي. بسبب الطريقة التي تعمل بها وبيئتها، وتتعرض هذه المكونات للضغوط أعلى من في التطبيقات الصناعية التقليدية. ولذلك فمن المهم أن تعرف هذه العراقيل إذا كنا نريد لتقدير الحياة، وبالتالي موثوقية النظام بأكمله. في حالة وجود دراسة موثوقية، استنادا إلى مشاكل التأثيرات الحرارية، من المهم لتقدير درجة الحرارة في المناطق الحساسة. في هذه الأطروحة نقدم تحليل أحادي البعد وثلاثي الأبعاد بطريقة TLM لدراسة تأثير التسخين الذاتي في أجهزة IGBT. النتائج تؤكد بوضوح أن وحدات IGBT قادرة على توليد كمية كبيرة من الحرارة التي يجب أن تبدد بشكل فعال لتجنب التأثير على العملية المكون بل وحتى مدى الحياة. يتم تحديد تقييم اعتمادية وحدة الطاقة من المصادقية مكوناته مترابطة في سلسلة وبالتوازي، ولكن نحن بحاجة المجموعات الأساسية لجميع المعلمات محددة من مكونات إدراج (الثنائيات والترانزستورات) لتحديد معدل الإخفاقات المحتمل وتقدير حياتهم. وتظهر النتائج أن زيادة نسبة الإخفاقات IGBT لزيادة أو ارتفاع في درجة الحرارة تقاطع، مما يدل على أن مكونات في الضغوط الحرارية المستمرة وفترات طويلة (عدة سنوات) قد يكون إخفاقات، ولا يكون هناك تشغيل عادي من وحدة الطاقة وتعطيل في تطبيق النظام.

introduction générale

Introduction Générale

La mesure de la qualité des composants s'appuie principalement sur les analyses de construction et de défaillance. La première consiste à une étude de la technologie employée avec décomposition des phases successives de fabrication du composant, la deuxième analyse teste la fiabilité et cherche les causes de défaillance qui peut être souvent thermique et essayer de cerner le mode de destruction, cet aspect d'analyse est appelé l'AMDEC (Analyse des Modes de défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité).

La tendance actuelle consiste à mettre de plus en plus d'équipements électroniques dans des applications embarquées (aéronautique, spatiale etc.) pour lesquelles la fiabilité constitue un enjeu majeur pour les concepteurs. Ceci implique l'apparition de nouveaux modes de défaillance des modules de puissance classiques à simple face et il faudrait aussi clarifier les effets d'évacuation thermique et d'auto échauffement des modules au sein des systèmes conçus. Le besoin des industriels est d'accroître la fiabilité des systèmes électroniques de puissance embarqués, ce qui est nécessaire pour pouvoir répondre à la forte demande du marché.

Les équipements électroniques ont des géométries irrégulières, ils contiennent de nombreuses sources de chaleur. L'importance de la diffusion de ces sources est reliée directement à la fiabilité du composant, car l'augmentation de la température à l'intérieur de ce dernier peut être représenté par simulation thermique et dépend de la modification des conditions aux limites, des paramètres physiques et géométriques des matériaux et la nature du milieu.

L'étude du comportement thermique des composants électroniques et des assemblages de puissance tient aujourd'hui une place capitale dans la conception des fonctions électroniques soumises à environnement sévère. Un échauffement excessif dégrade les performances du composant, réduit sa durée de vie et peut provoquer la défaillance. L'étude du comportement thermique du composant aidera donc à prévoir sa fiabilité, sa durée de vie et l'évolution de ses performances dans le temps. Bien que ce problème soit étudié depuis fort longtemps, trouver une technique ou un outil d'aide à la conception simple et efficace, est toujours d'actualité, c'est le but de notre travail, qui sera structuré comme suit:

Le premier Chapitre présentera les définitions et les méthodes de sûreté de fonctionnement en appelant quelques concepts de la sûreté de fonctionnement et les méthodes d'analyse les plus utilisées. On citera les causes et mécanismes de défaillance des composants électroniques et les différentes méthodes pour faire les études de ce qu'on appelle « la fiabilité prédictive ».

Dans le deuxième chapitre, on mentionnera les principes de fonctionnements des composants IGBT pris comme modèle, ainsi que quelques aspects de défaillance de ce

Introduction Générale

composant au sein d'une cellule de commutation. Cependant, connaître le principe physique et technologie de ces composants est très important pour prédire le comportement en circuits et détecter les régions défaillantes de ce module de puissance.

En Chapitre trois, une simulation du comportement thermique d'un composant électronique prise comme modèle de module de puissance IGBT mais en passant d'abord par résolution de l'équation de diffusion thermique et la citation de ses différents solutions ainsi que la présentation de la méthode TLM (Transmission Line Matrix).

L'étude de fiabilité et sûreté de fonctionnement des composants IGBT comme module permet non seulement de comprendre l'influence de la contrainte température sur leur bon fonctionnement, mais aussi la prévision et le calcul de taux de défaillance et sa durée de vie.

Pour terminer, il nous a semblé important de présenter les différents résultats en Conclusion.

CHAPITRE I

Généralités sur la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des systèmes électroniques

I.1 Introduction

La gestion de l'énergie électrique est une des principales problématiques actuelles. Les pertes observées dans les zones de stockage ainsi qu'au cours de l'acheminement de l'énergie électrique sont des points décisifs dans de nombreux domaines et, afin d'augmenter le rendement énergétique, les développements actuels font état d'une vitesse d'exécution induisant des intensités de courants et des tensions élevées. Dans les domaines tels que le ferroviaire et l'automobile, cette énergie transite par des modules de puissance qui présentent d'excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques. Depuis la découverte et l'exploitation des technologies à semi-conducteurs qui est considérée comme le début réel de l'électronique de puissance dans les années 1950, la miniaturisation des systèmes électroniques à hautes performances n'a eu de cesse de régir l'évolution des modules et systèmes électroniques.

Actuellement, les industriels cherchent à obtenir de leurs systèmes qu'ils remplissent les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus, avec le meilleur taux de service possible et au, meilleur coût. Cela se traduit par de fortes exigences en termes de disponibilité opérationnelle. Pour accroître leurs performances, il est alors essentiel d'améliorer leur sûreté et leur fiabilité.

Les assemblages de différents composants de tout système ont une bonne maturité technologique qui n'empêche cependant pas leurs défaillances dues à la manière d'assembler les différents matériaux (technique de brasure, report de puce) et aux propriétés des matériaux eux-mêmes (température de fonctionnement de la puce en silicium, substrat céramique isolant, dissipateur). Ces défaillances sont principalement liées aux contraintes thermomécaniques générées par les comportements différents des matériaux composant le module électronique au cours des cycles de fonctionnement. Lors de cycles thermiques actifs, les variations de température brutales notamment en régimes extrêmes de fonctionnement provoquent des cycles de dilatation-contraction des matériaux qui réagissent de manière différente en fonction de leur composition.

I.2 La Sûreté de fonctionnement

I.2.1 Introduction

Les techniques de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité) ou noté en terme anglo-saxon RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, and security) se sont développées tardivement par rapport aux techniques, maintenant classiques, des diverses disciplines de l'art de l'ingénieur.

Dans ce chapitre, nous présenterons un état de l'art sur les méthodes de sûreté de fonctionnement. Nous commençons par l'historique de la sûreté de fonctionnement pour donner les notions fondamentales. Nous exposerons ensuite les deux méthodes d'analyse que nous adapterons pour notre travail.

I.2.2 Historique

L'historique de la sûreté de fonctionnement est bien relaté dans [1], [2], nous rappelons ici les étapes les plus impressionnantes.

Selon A. Leroy et J.P. Signoret [3], étudièrent les concepts de fiabilité et le taux de défaillance dans l'aéronautique suite à la comparaison des fréquences des pannes des avions bimoteurs et quadrimoteurs et le nombre de pannes par rapport au nombre d'heures de vol. À partir de la deuxième guerre mondiale, une discipline se développe sous le nom de « théorie de la fiabilité ». Les décennies 1940 et 1950 sont caractérisées par la découverte de l'efficacité d'une approche probabiliste appliquée à l'électronique dans l'aéronautique, la défense et le nucléaire. La formulation de ce qui nous paraît évident aujourd'hui, la probabilité de succès d'une chaîne de composants est le produit des probabilités de succès de chacun des composants. Ainsi, sur un lot de composants homogène, on sait prédire avec une bonne confiance le nombre de défaillances par unité de temps qui vont se produire alors qu'on reste totalement incapable de prédire quel composant va tomber en panne et quand.

Les décennies 1960 et 1970 sont marquées par les tentatives de généralisation de cette approche probabiliste si réussie à d'autres « composants » : mécaniques, hydrauliques, électriques, puis aux hommes, aux logiciels... et l'extension de l'approche au retour à la normale (à la fiabilité vient s'ajouter la maintenabilité). En même temps se développent des méthodes permettant de maîtriser les risques de systèmes complexes (centrale nucléaire, supersonique...) et non plus simplement de chaînes de composants (même complexes). Ces démarches sont conduites par les équipes constituées autour de la « théorie de la fiabilité ». Ces activités, dès leur prime jeunesse, ont dû maîtriser les risques d'accidents. Elles ont développé des approches déterministes très poussées et se sont essentiellement appuyées sur le surdimensionnement, la redondance et l'analyse logique pour assurer la sécurité.

L'apport des approches probabilistes permet de chercher à ajuster les mesures de prévention des événements aléatoires au lieu de rester abrité derrière des normes de dimensionnement larges et coûteuses.

À partir de la décennie 1980, les efforts entrepris dans tant de directions s'approfondissent, mais aussi tendent à se rejoindre pour constituer cette discipline d'application très étendue qu'est aujourd'hui la sûreté de fonctionnement.

Aujourd'hui, le terme « sûreté de fonctionnement » recouvre l'ensemble des moyens qui permettent de se donner et de transmettre une confiance justifiée dans le succès d'un projet, d'une activité et son innocuité.

I.2.3 Notions fondamentales de sûreté de fonctionnement

La démarche, le raisonnement « Sûreté de Fonctionnement » ou la SdF s'appuient sur quelques notions de base qui se sont précisées au cours de l'évolution et qui continuent à s'affiner. Parcourir ce vocabulaire de base est donc une introduction

classique à la sûreté de fonctionnement. Au sens large, la sûreté de fonctionnement. Elle peut être définie comme "la science des défaillances". Elle inclut tous les aspects liés au dysfonctionnement des composants, dispositifs et systèmes, à savoir la connaissance de ces défaillances, leurs évolutions, leurs prévisions et le cas échéant leurs maîtrises [4]. Au sens strict, la sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle peut être caractérisée par les concepts suivants (figure I.1).

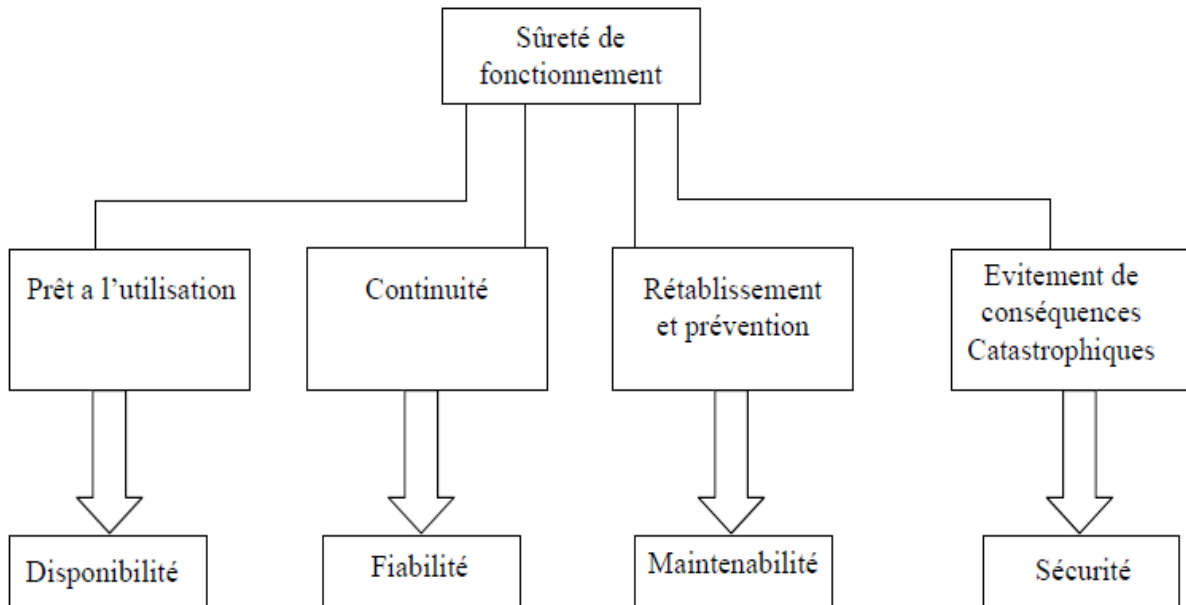


Figure I.1 : Attributs de la sûreté de fonctionnement (SdF)

I.2.3.1. La fiabilité

La fiabilité est définie comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions et pour une durée donnée. Cette définition peut être formulée différemment : la fiabilité d'une entité est la probabilité moyenne de non défaillance de cette entité sur un intervalle de temps donné. Les paramètres importants de la fiabilité sont donc les conditions d'utilisation du système, le temps ou le nombre de cycles en fonctionnement.

La fiabilité d'un dispositif dépend aussi de la fonction remplie par ce dispositif. De manière globale, la fiabilité d'un système est liée à ses caractéristiques intrinsèques, au mode d'utilisation et à son environnement. De cet aspect global, il est possible de définir deux types de fiabilité :

a. **La fiabilité opérationnelle** qui résulte de l'observation et de l'analyse du comportement d'un certain nombre de dispositifs identiques, en conditions de fonctionnement réelles. En d'autres termes, il s'agit d'un traitement statistique de

retours d'expérience sur une gamme de produits, par exemple. La probabilité moyenne issue de ce retour d'expérience n'a de sens qu'en considérant un nombre important de dispositifs. La fiabilité opérationnelle est donc définie par [5]: $R [0, t]$ nombre moyen d'entités non défectueuses à un instant t sur le nombre total d'entités. Le système est supposé être sans défaillance à $t = 0$.

b. **La fiabilité extrapolée** déduite de la fiabilité opérationnelle par extrapolation ou interpolation pour des conditions ou des durées différentes,

c. **La fiabilité prévisionnelle** estime la fiabilité future d'un système à partir de considérations sur la conception du système et la fiabilité opérationnelle (supposée connue) de ses composants. Cette estimation repose très souvent sur l'évaluation du "taux de défaillance" probable et du "temps moyen de non défaillance". Il faut bien sûr être vigilant à ne pas réduire trop rapidement un problème de fiabilité à des calculs bruts de probabilité et de statistique ... et se rappeler en permanence que ces nombres en question traduisent une réalité physique et technologique vaste et complexe [6].

d. **La fiabilité intrinsèque** est la fiabilité maximale que l'on peut attendre d'un matériel quand il fait l'objet d'une maintenance préventive efficace : c'est une valeur inhérente à sa conception. L'obtention de niveaux supérieurs de fiabilité nécessite donc soit des modifications, soit de nouvelles conceptions [5].

D'après la définition donnée dans le paragraphe précédent il est possible d'écrire l'expression de la fiabilité d'une entité E , à l'instant (t) :

$$R(t) = P[E \text{ non défaillant sur } [0, t]] \quad (I.1)$$

D'après les règles de définition des probabilités, on peut écrire :

$$P[E \text{ non défaillant sur } [0, t]] + P[E \text{ défaillant sur } [0, t]] = 1 \quad (I.2)$$

On peut obtenir la probabilité de défaillance de l'entité E par l'expression suivante :

$$P[E \text{ défaillant sur } [0, t]] = 1 - R(t) \quad (I.3)$$

I.2.3.2. La Maintenabilité

La maintenabilité est l'aptitude d'une entité (E) à être remise en état, par une maintenance donnée, d'accomplir des fonctions requises dans les conditions données. Elle se caractérise par la probabilité $M(t)$ d'être en état, à l'instant t , d'accomplir ces fonctions sachant qu'elle était en panne à l'instant 0 [6].

La maintenabilité ne se différencie de la fiabilité que sur ce dernier point : elle caractérise la promptitude de reprise du service attendu après interruption. La

maintenabilité, c'est la brièveté des pannes (état dû à une défaillance). On ne peut s'entendre sur la maintenabilité qu'après avoir explicité les moyens (procédures, outils, organisations...) mis en œuvre pour remettre l'entité en état de service. L'expression de la maintenabilité est :

$$M(t) = p \text{ [la maintenance de E est achevée au temps } t] \quad (I.4)$$

Dans un souci de simplification, on peut écrire :

$$M(t) = p \text{ [E est réparée sur } [0, t]] \quad (I.5)$$

L'aptitude contraire sera dénommée "immaintenabilité" ; sa mesure est notée $M(t)$:

$$M(t) = 1 - M(t) \quad (I.6)$$

I.2.3.3. la Disponibilité

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données. Elle se caractérise par la probabilité $A(t)$ d'être en état, à l'instant t , d'accomplir les fonctions requises.

$$A(t) = p \text{ [E non défaillante à l'instant } t] \quad (I.7)$$

L'aptitude contraire sera dénommée "indisponibilité" ; sa mesure est notée $A(t)$:

$$A(t) = 1 - A(t) \quad (I.8)$$

I.2.3.4. La sécurité

La sécurité c'est l'aptitude d'une entité à ne pas causer de dommages dans des conditions données ou à ne pas faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. L'aptitude contraire sera dénommée « insécurité ». D'une manière générale, d'autres concepts ont été introduits ces dernières années ; ils peuvent être également inclus dans celui de sûreté de fonctionnement. Parmi eux on cite : la durabilité, la continuabilité, la serviabilité.

En sûreté de fonctionnement, on trouvera aussi l'acronyme FMDS pour désigner la sûreté de fonctionnement (comme Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité) présentée en figure I.2. Les Anglo-Saxons utilisent le terme dependability, qui recouvre la fiabilité (reliability), la disponibilité (availability) et la maintenabilité (maintainability). La sécurité est traitée à part. Abusivement, on assimile le mot "dependability" à "sûreté de fonctionnement". On préférera le terme anglais de RAMS (pour reliability, availability, maintainability and safety), [7].

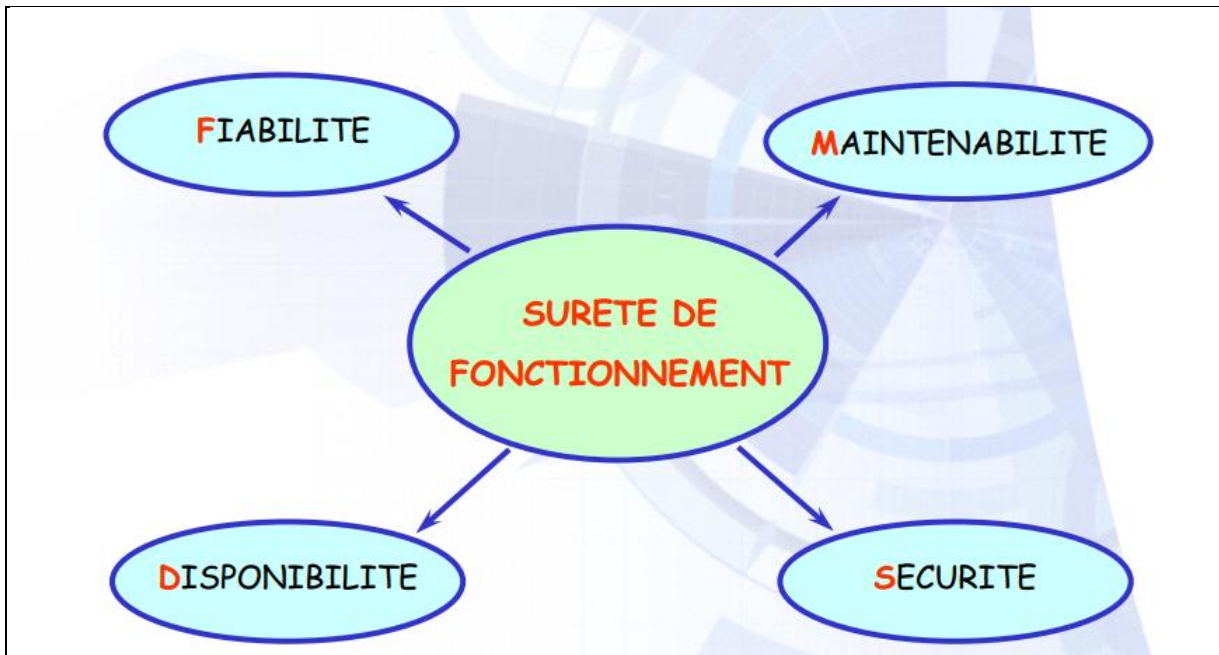


Figure I.2 Concepts de sûreté de fonctionnement

I.2.4 Les temps caractéristiques de la Sûreté de Fonctionnement

Les différents temps caractérisant la SdF se définissent en fonction de leur état de fonctionnement : avant défaillance, entre défaillance, entre défaillance et réparation, etc. Ces temps dépendent des probabilités d'occurrences des divers événements comme les défaillances et les réparations des composants. Ce sont des variables aléatoires que l'on cherche à caractériser par leurs espérances mathématiques. De même, ils présentent aussi, au moyen d'un graphique, la relation existant entre eux (figure 1.3). Cependant, la norme [8] présente les définitions d'une façon plus fines par rapport aux autres auteurs:

- a. **MTTF** (mean time to failure) : durée moyenne de fonctionnement avant défaillance, espérance mathématique de la durée de fonctionnement avant défaillance. La définition du MTTF est :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (I.9)$$

- b. **MTBF** (mean time between failures) durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.
- c. **MRT** (mean repair time) durée moyenne de réparation, espérance mathématique de la durée du temps de réparation.

- d. **MTTR** (mean time to repair or restoration) durée moyenne de panne ou moyenne des temps pour la remise en état de fonctionnement, espérance mathématique de la durée de panne. MTT_{Rep} est associé à la réparation du composant et MTT_{Res} à sa restauration. La différence entre les deux est liée au fait que l'on considère ou non le temps mis pour remettre en service l'équipement, le MTT_{Res} l'incluant.
- e. **MUT** (mean up time) ou TMD temps moyen de disponibilité, espérance mathématique de la durée de disponibilité.
- f. **MDT** (mean down time) ou TMI temps moyen d'indisponibilité, espérance mathématique de la durée d'indisponibilité. Le MDT est décomposé en plusieurs phases lesquelles sont montrées par la figure 1.3.

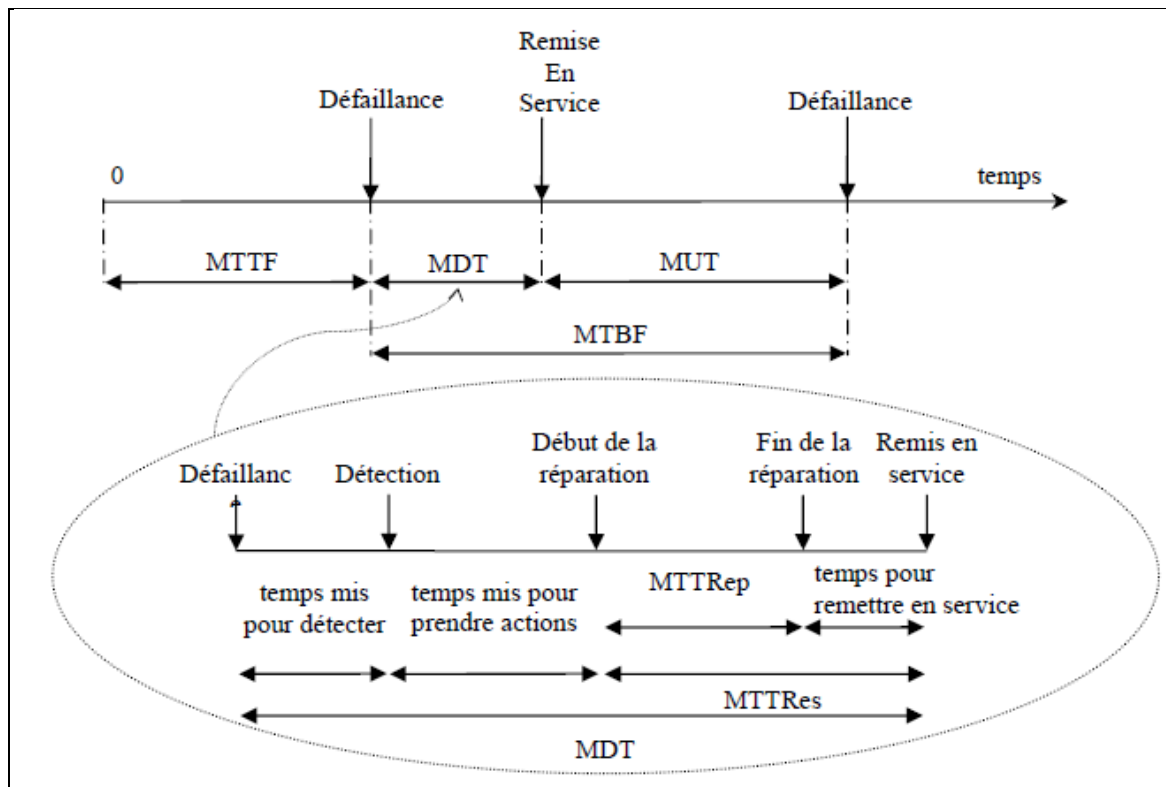


Figure 1.3 Représentation du MTTF, du MUT, du MDT et du MTBF [7].

I.3 Méthode d'analyse de sûreté de fonctionnement

L'étude de sûreté de fonctionnement comporte deux volets [9]:

- ⇒ **Une analyse fonctionnelle**, qui va détailler la manière dont le système va opérer dans toutes ses phases de vie ainsi que les autres systèmes avec lesquels il va

pouvoir interagir ;

- ⇒ **Une analyse dysfonctionnelle**, qui vise à imaginer l'ensemble des défaillances pouvant survenir n'importe où dans le système, seules ou combinées entre elles, et à analyser l'impact de ces pannes

Les résultats de ces deux études sont mis en commun dans une modélisation du système qui va représenter virtuellement celui-ci avant sa réalisation, tant dans son fonctionnement attendu que dans les pannes susceptibles de lui arrivé. En étudiant cette modélisation, il devient alors possible de valider ou invalider une solution technique, optimiser des choix architecturaux, remplacer des composants critiques, ceci dans le but de :

- Réduire au maximum les risques ;
- Réduire au maximum les coûts d'exploitation ;
- Tolérer, dans la mesure du possible, certaines fautes en autorisant un fonctionnement en mode dégradé sous certaines conditions.

I.3.1 Les outils utilisés pour l'analyse fonctionnelle

Les outils utilisés pour l'analyse fonctionnelle sont principalement :

- **SADT** (system analysis and design technique) : c'est une méthode d'analyse par niveaux successifs d'approche descriptive d'un ensemble, quel qu'il soit. On peut l'appliquer aussi bien à la gestion d'une entreprise qu'à un système automatisé.
- **BDF** (blocs diagrammes fonctionnels) : méthode de découpage fonctionnel du système.
- **Méthode MISME** : cette méthode considère l'ensemble des composants du système avec leurs interactions, ainsi que les milieux environnants

I.3.2 Les outils utilisés pour l'analyse dysfonctionnelle

Les outils utilisés pour l'analyse dysfonctionnelle sont principalement [10] :

- **L'analyse préliminaire des risques (APR)**, qui fournit l'ensemble des événements redoutés prévisionnels dans toutes les phases de vie du système (de la conception au rebut, en passant par la mise en service, l'exploitation et la maintenance) ;
- **L'AMDEC** (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) : cette méthode examine les potentialités de dysfonctionnements de chacun des

éléments composant le système, à un niveau de détail choisi à l'avance. Elle permet de quantifier la probabilité d'apparition de la dite défaillance et de classer ses effets par ordre de gravité ; la combinaison de ces deux estimations fournissant la criticité de l'élément retenu. A l'issue de cette phase, et pour les éléments les plus critiques, il sera procédé à une fiabilisation, ou bien à l'adjonction d'un dispositif de réduction du risque

- **L'AEEL** (analyse des effets des erreurs logicielles) : cette méthode est l'adaptation au logiciel de la méthode AMDEC décrite ci-dessus, le programme étant lui-même décomposé en parties élémentaires de taille prédéfinie.
- **Les arbres de défaillance** : en partant d'un événement redouté bien identifié (dit "de tête"), on détermine les sous-événements qui peuvent conduire à l'événement de tête : Chacun des sous-événements est lui-même décomposé ensuite de la même manière, jusqu'à obtenir des éléments suffisamment simples pour estimer directement leur probabilité d'apparition (on parle d'événements de base). En recombinaison des probabilités d'apparition de tous les événements de base grâce au schéma logique de l'arbre de décomposition (algèbre booléenne/théorème de Poincaré), on en déduit la probabilité d'apparition de l'événement de tête. Ce formalisme utilise les propriétés de la décomposition de Shannon pour simplifier fortement la structure de l'arbre avant de réaliser les calculs eux-mêmes. Un formalisme qui peut s'avérer utile lorsque le modèle en arbre de défaillances d'un système devient très important [11].
- **Les graphes de Markov** : Les différents états du système sont représentés. On suppose que le passage d'un état du système à l'autre survient aléatoirement, ou classiquement par la défaillance d'un élément, ou à la fin de la réparation d'un autre élément. Connaissant l'état initial du système, on peut en déduire soit la probabilité d'être dans un état donné après une durée déterminée, soit la probabilité moyenne d'être dans un état donné tout au long de sa durée de vie utile.
- **Les réseaux de Petri stochastiques** : cette technique s'apparente à celle des graphes de Markov décrite ci-dessus, à la différence que les transitions entre les différents états peuvent suivre des lois de probabilité autres que la loi exponentielle classique. D'autres caractéristiques permettent de synchroniser différentes transitions. Le prix à payer étant la nécessité de simuler le fonctionnement du système par des méthodes de Monte Carlo puisque le calcul analytique n'est quasiment jamais possible. Par ailleurs, pour les systèmes très fiables, les temps de simulation peuvent devenir rédhibitoires lorsqu'on cherche à quantifier leurs différentes probabilités de défaillances. Il existe une abondante littérature sur les diverses techniques actuelles d'accélération des simulations pour ce type de systèmes.

I.3.3. Autres méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement

On distingue deux types de démarches dans l'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un système, l'inductive et la déductive. Dans la démarche inductive, on raisonne du plus particulier au plus général. Face à un système et une défaillance (ou une combinaison de défaillances), on étudiera de façon détaillée les effets ou conséquences de cette défaillance (ou de la combinaison de défaillance) sur le système lui-même et /ou son environnement. Les principales méthodes inductives sont les suivantes [12]:

- L'Analyse de Modes de Défaillances et leur Effets et de leur criticité (AMDEC),
- L'Analyse de Modes de Défaillances et leur Effets (AMDE),
- La Méthode de la Table de Vérité (MTV),
- La Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR),
- La Méthode de l'Arbre des Conséquences (MDCC).

Dans la démarche déductive, on raisonne du plus général au plus particulier : supposant que le système est défaillant, on recherchera les causes de cette défaillance. L'analyse et l'enquête à la suite de catastrophes, pour en trouver les causes, sont de nature déductive.

Les principales méthodes déductives sont les suivantes :

- La Méthode de l'Espace des Etats (MEE),
- La Méthode de l'Arbre des Défaillances (AdF),
- L'analyse Préliminaire des Dangers (APD),
- La méthode du l'Espace des Etats (MEE).

La méthode de L'Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) est une méthode d'analyse prévisionnelle de la fiabilité qui permet de recenser systématiquement les défaillances potentielles d'un dispositif puis d'estimer les risques liés à l'apparition de ces défaillances, afin d'engager les actions correctives à apporter au dispositif. L'AMDE est introduite dans l'industrie manufacturière de série depuis les années 1980, son application y reste, encore aujourd'hui, très répandue [7]. L'AMDE permet :

- D'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur ses différentes fonctions.
- D'identifier les modes de défaillance ayant d'importants effets sur la disponibilité, la fiabilité, la maintenabilité ou la sécurité....de ce système.

On distingue quatre principales étapes pour réaliser une AMDE (figure. I.4) [12].

- ❖ Définitions du système, de ses fonctions et de ses composants : Les divers états de fonctionnement du système doivent être établis. Il est également indispensable de définir ses limites de fonctionnement dans son ensemble ainsi que celles de ses composants. Il faut aussi définir les spécifications relatives au fonctionnement du système et ses composants ainsi que celles relatives à l'environnement dans lequel le système et ses composants sont installés.

- ❖ Etablissement des modes de défaillances des composants et de leurs causes : on recense les modes de défaillance de chaque composant du système dans l'état de fonctionnement étudié pour le système. Le recensement doit être aussi complet que possible, l'analyse qui suit étant essentiellement fondé sur cette liste ; ainsi, en première analyse, des modes de défaillance plausibles ou potentiels seront identifiés. Il est nécessaire en même temps d'établir les causes possibles de chaque mode de défaillance. Certes, il n'est pas toujours facile de distinguer entre «modes de défaillance» d'un composant et « causes de défaillance» : c'est souvent un des premiers obstacles rencontrés dans l'analyse. Pour aider à cette distinction, on peut dire que les modes de défaillance sont les effets de cause de défaillance sur les fonctions du composant ; les modes se définissent donc relativement aux effets sur le composant ou aux fonctions de celui-ci.

- ❖ Etudes des effets des modes de défaillance des composants : les effets de chaque mode de défaillance sur les fonctions du système ainsi que sur chacun de ses composants sont systématiquement étudiés et évalués. Ces effets sont décrits de façon aussi complète que possible, en supposant l'existence d'un seul mode de défaillance, tous les autres composants étant en fonctionnement ou en état de fonctionner.

- ❖ Conclusions et Recommandations : les étapes précédentes ayant été achevées, l'analyste est alors en mesure d'en tirer les conclusions en relation avec les objectifs de l'étude et d'émettre toutes les recommandations utiles. La démarche que cette méthode et aboutit à des résultats intéressantes. Citons notamment :
 - ⇒ L'assurance que tous les modes de défaillance concevables et leurs effets sur le fonctionnement du système ont été pris en compte au niveau de la conception ;
 - ⇒ Le recensement des modes de défaillance suivant l'ampleur de leurs effets sur les fonctions du système.
 - ⇒ Identification des défaillances seconde, des besoins de redondance ;
 - ⇒ L'établissement des modes de défaillance, de procédures de détections (alarmes, tests périodiques...) ; on peut ainsi juger si ces procédures sont bien adaptées ;
 - ⇒ L'établissement pour chaque mode de défaillance, des procédures de maintenance, la maintenabilité des systèmes est donc étudiée [12].

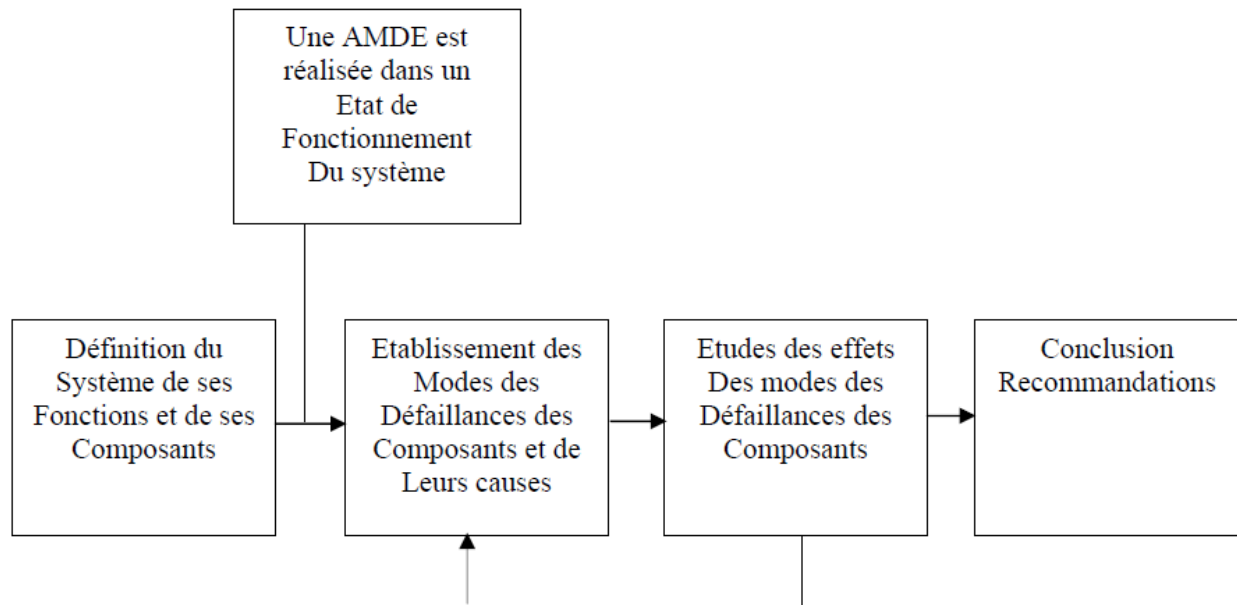


Figure I.4 Etapes de l'élaboration de l'AMDE

L'AMDE est un outil méthodologique permettant l'analyse systématique des dysfonctionnements potentiels d'un produit, d'un procédé ou d'une installation. L'AMDE fournit une autre vision du système, des supports de réflexion, de décision et d'amélioration, des informations à gérer au niveau des études de sûreté de fonctionnement et des actions à entreprendre.

I.4 Aptitudes des systèmes et composants et mode de défaillance

Un système est défini comme un ensemble d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interaction. Il faut noter que la définition indique que le système est fait de composants en interaction ; ce que veut dire que si la nature physique d'un sous système ou d'un composant se modifie à la suite d'une défaillance, le système est lui même modifié. Les systèmes peuvent être de diverses natures technologiques [13] :

- Systèmes électriques ou électroniques, logiques ou analogiques, de contrôle commande ;
- Systèmes mécaniques ;
- Systèmes programmés, systèmes de traitement de l'information.

Tout système se définit généralement par une ou plusieurs fonctions (ou missions) à accomplir dans des conditions et dans un environnement donné (performances requises). Les caractéristiques les plus importantes d'un système qui méritent d'être précisées avant l'analyse sont :

- Les fonctions du système : les fonctions principales, les fonctions secondaires et les degrés d'importance de ces fonctions.
- La structure du système : les différents composants, leurs rôles, leurs caractéristiques et leurs performances.
- Les conditions de fonctionnement d'un système : les états de fonctionnement, les conditions de fonctionnement des composants et du système, les changements de configuration. D'une manière générale, il est essentiel de connaître ou de définir les différentes procédures de conduite du système, les consignes données aux opérateurs en cas d'incident ou d'accident.
- Les conditions d'exploitations du système : les conditions d'interventions sur le système (alarmes, inspections, vérifications, test périodiques...), les conditions d'interventions sur le système (maintenance préventive, corrective ...), pour exploiter le système.
- L'environnement du système : les autres systèmes élémentaires de l'installation ou du processus global dans lequel se situe le système étudié (les systèmes auxiliaires par exemple), l'ensembles des opérateurs intervenant sur le système, l'environnement proprement dit que peut se manifester par des conditions ambiantes défavorables (poussière , humidité) des conditions météorologiques particulières (gel, neige) ou agressions externes d'origine naturelle (séisme) ou industrielle (chute d'avion...).

Au cours des différentes applications d'un système, toutes ces données ne sont pas connues et par conséquent des approximations et hypothèses sont nécessaires. Au fur et à mesure que la conception du système progresse et que ces différentes informations peuvent être précisées, les analyses de sûreté de fonctionnement devront être corrigées, modifiées, c'est -à-dire réactualisées.

I.4.1. Défaillances des systèmes

Par défaillance ou panne, on entend la cessation de l'aptitude d'une entité ou d'un système à accomplir une fonction requise. Une défaillance résulte d'une ou plusieurs fautes (écart anormal avec la caractéristique désirée), ou encore anomalie de fonctionnement. Une défaillance peut être complète, partielle, fugitive, intermittente ou permanente. La défaillance peut conduire à la panne du système.

Le mode de défaillance est le cheminement d'un défaut initial vers une défaillance "visible" du système. Les modes de défaillance sont générés par les causes de défaillance, un mode de défaillance représentant l'effet (ou les effets) par lequel se manifeste la cause de défaillance. Les défaillances d'un composant ont des effets sur les fonctions de celui-ci [14].

I.4.1.1 Expressions usuels en défaillance

On notera $R(t)$ la probabilité de fonctionnement à l'instant t . Le symbole R provient de l'anglais Reliability. On notera $F(t)$ la probabilité de défaillance à l'instant t exprimée par [13] :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (I.10)$$

La fonction $F(t)$ représente aussi la probabilité (p) qu'un évènement (défaillance) survienne à l'instant T dans l'intervalle $[0,t]$.

$$F(t) = p(T < t) \quad (I.11)$$

Comme $F(t) dt = p(t < T < t + dt)$ donc

$$F(t) = \int_{-\infty}^{t_i} f(t)dt = p(T < t) \quad (I.12)$$

I.4.1.2 Le taux de défaillance

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est une probabilité conditionnelle de défaillance très utilisée en électronique. Il donne une mesure des risques pour qu'un dispositif tombe en panne pendant l'intervalle de temps $[t, t+\Delta t]$ sachant que ce dispositif a survécu jusqu'au temps t . Son unité est le FIT (Failure In Time) qui définit 1 défaillance/10⁹heures ; le taux de défaillance est aussi souvent exprimé dans la littérature en 10⁻⁶/heure ou 10⁻⁹/heure. Le taux de défaillance s'écrit [15]:

$$\lambda(t) = \frac{\text{nombre de défaillant sur interval du temp}}{\text{nombre d'entités non défaillantes au debut d'interval du temp}} \quad (I.13)$$

On en vient à l'expression du taux de défaillance en fonction de la loi de fiabilité et la densité de probabilité :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (I.14)$$

On suppose que $F(u)$ est la probabilité de défaillance pour une unité d'entité :

$$F(u) = \frac{dF(u)}{du} \quad (I.15)$$

D'où le taux de défaillance est exprimé comme suit :

$$\lambda_u = \frac{F(u)}{R(u)} = \frac{dF(u)}{R(u) \cdot du} = \frac{dF(u)}{(1-F(u)) \cdot du} \quad (I.16)$$

Donc

$$\lambda_u \cdot du = \frac{dF(u)}{1-F(u)} \quad (I.17)$$

Intégrons les deux membres entre 0 et t :

$$\int_0^t \lambda_u \cdot du = \int_0^t \frac{dF(u)}{1-F(u)} \quad \text{donc} \quad - \int_0^t \lambda_u \cdot du = \int_0^t \frac{-dF(u)}{1-F(u)}$$

$$- \int_0^t \lambda_u \cdot du = [\ln(1-F(u))]_0^t = [\ln(1-F(t)) - \ln(1-F(0))]$$

A t=0, il n'y a pas de défaillance donc F(0) =0 donc ln(1-F(0))= ln (1) =0, d'où :

$$- \int_0^t \lambda_u \cdot du = \ln(1-F(t)) \quad \text{donc} \quad e^{- \int_0^t \lambda_u \cdot du} = 1-F(t) = R(t)$$

On obtient donc les expressions générales des lois de fiabilité

$$R(t) = e^{- \int_0^t \lambda_u \cdot du} \quad (I.18)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{- \int_0^t \lambda_u \cdot du} \quad (I.19)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda(t) \cdot e^{- \int_0^t \lambda_u \cdot du} \quad (I.20)$$

I.4.1.3 Courbe représentative du taux de défaillance

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ suit pour beaucoup de dispositifs, la courbe en baignoire bien connue représentée sur la figure I.5.

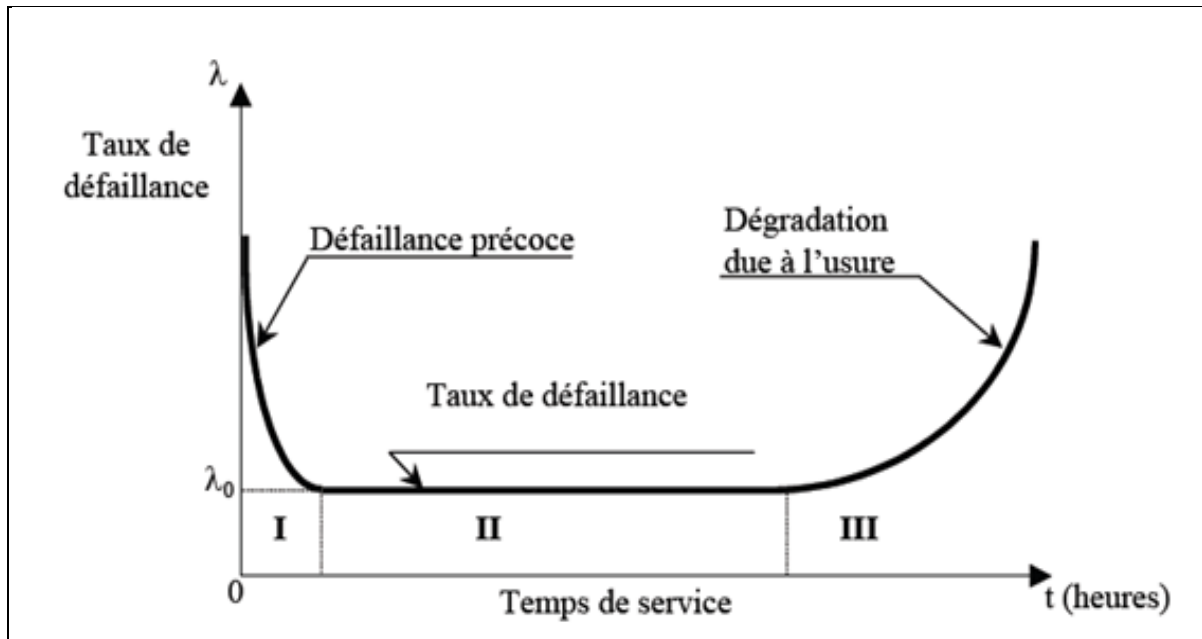


Figure I.5 Taux de défaillances $\lambda(t)$ en fonction du temps [6]

Cette courbe se décompose en trois parties :

- ⇒ La période de défaillances précoces **I**, due aux défauts de jeunesse des dispositifs, où le taux de défaillance $\lambda(t)$ décroît. La première partie de cette courbe en baignoire correspond aux erreurs de conception ou de fabrication, à des composants mal utilisés ou insuffisamment vérifiés. Cette zone peut être minimisée, voire pratiquement annulée, pour les composants vendus aujourd'hui. En effet les fabricants de composants électroniques ont mis un point d'honneur à vérifier la qualité des composants en sortie des chaînes de fabrication. Pour les composants de puissance, ces tests sont très nombreux et diversifiés [14].
- ⇒ La période intermédiaire **II**, où le taux de défaillance est approximativement constant, correspondant à la durée de vie normale. La deuxième partie de la courbe en baignoire constitue la zone de vie utile des composants. Le fonctionnement à taux de défaillance constant résulte de l'apparition de mécanismes de dégradation internes et aléatoires (donc indépendants du temps). Ces mécanismes de dégradation sont liés à des altérations physico-chimiques au sein du composant (contamination ionique, porteurs chauds, radiations ionisantes).
- ⇒ La période d'usure **III**, où le taux de défaillance augmente. La dernière partie de la courbe "en baignoire" représente les défaillances systématiques d'usure ou de vieillissement. Pour les composants électroniques, cette zone est très nettement

au-delà de la durée de vie globale d'un équipement qui peut être estimée à 20 ans. Le rythme de cycles ou successions d'impulsions en puissance ou en température ambiante peut fortement dégrader cette durée de vie.

I.4.2 Classification des défaillances en systèmes électroniques

On distingue plusieurs catégories de défaillance qui dépendent soit de la vitesse d'apparition soit de son degré ou des deux [13].

I.4.2.1 La classification des défaillances en fonction du degré :

- La défaillance partielle, qui est la déviation des caractéristiques au delà des limites du bon fonctionnement sans altérer à la fonction.
- Défaillance complète, qui est la déviation des caractéristiques telle qu'elle entraîne la disparition de la fonction
- Défaillance intermittente telle que les aptitudes sont retrouvées après le défaut

I.4.2.2 Classification des défaillances en fonction de la vitesse d'apparition

- Défaillance soudaine qui ne peut être prévue par un examen ou une surveillance.
- Défaillance progressive qui peut être prévue par un contrôle ou une surveillance

I.4.2.3 Classification des défaillances en fonction de la vitesse et du degré

- Défaillance cataleptique qui est à la fois soudaine et incomplète.
- Défaillance par dégradation qui est progressive et partielle

I.5. Causes et mécanismes de défaillance des composants électroniques

Les causes de défaillance en électronique sont regroupées en deux classes [16]:

- La première porte sur une utilisation du composant en dehors de ses spécifications. Ces contraintes sont statiques : tension, courant, température, pression, taux d'humidité... et dynamiques : di/dt , dv/dt , gradient de température... Il faut aussi tenir compte des phénomènes de focalisation et de densité locale de courant excessive relevant de fonctionnements particuliers (blocage rapide de la diode de corps d'un MOSFET par exemple). Toutes ces contraintes importantes conduisent à un vieillissement accéléré (voire instantané) d'origine thermoélectrique et thermomécanique des puces de silicium et de leur report. La genèse de cette contrainte étant très souvent d'origine externe au composant.
- La deuxième classe est liée au comportement du composant vis-à-vis de contraintes. Ainsi, les causes de défaillance peuvent être dissociées en deux groupes [13] :

- ▶ Les défaillances intrinsèques et aléatoires sous faibles contraintes, liées à des mécanismes de dégradation physico-chimiques, donc indépendantes du temps (contamination ionique, particules ionisantes...).
- ▶ Les défaillances dont l'origine est un vieillissement du composant sous fortes contraintes (délamination de d'un joint brasé, décollement de bonding, électromigration...).

I.5.1 Température élevée

Il est bien connu qu'à partir d'une certaine valeur de température, le taux de défaillance d'un composant ou d'un équipement augmente avec l'augmentation de la température. Plusieurs modes de défaillances sont dus à des réactions chimiques qui se manifestent entre le matériel utilisé pour le composant ou l'équipement et une quantité réduite de contaminant qui pourrait apparaître lors de la fabrication du composant ou s'infiltrer à la suite d'une mauvaise étanchéité entre le composant et l'atmosphère. L'interaction entre le composant et une quantité suffisante du contaminant engendre la défaillance du composant soit parce que la réaction consomme le matériel du composant, soit parce que les produits de la réaction endommagent le composant [16].

Les effets d'une température élevée de l'environnement sur les composants sont: les défaillances catalectiques, les changements temporaires ou permanents des valeurs. Généralement la cause de ces effets est le changement de l'orientation des molécules du matériel respectif, ce qui conduit à l'altération des propriétés électriques. L'augmentation de la température augmente le taux des changements de nature physique ou chimique du matériel concerné. C'est pour cela que toute amélioration de la fiabilité est liée étroitement au développement des nouveaux matériaux plus stables et plus inertes en hautes températures.

I.5.2 Température basse

Comme on l'a déjà mentionné, les équipements électroniques sont les plus sensibles aux effets de température. En effet, aux basses températures à partir d'approximativement -40°C , on doit s'attendre à des changements concernant leurs performances. Cela est dû en général aux coefficients de température des divers composants (condensateur, résistances, inductances, ... Etc.). Le vent et la neige associés aux basses températures posent de grands problèmes aux antennes, aux câbles, etc., sans parler des problèmes de maintenance de ces équipements. L'expérience montre que certains composants cessent même de fonctionner au-delà de -40°C (le quartz, les condensateurs électrolytes, ... Etc.). Les composantes mécaniques (interrupteurs, commutateurs, potentiomètre, socle, fiches, etc.) se contractent et produisent un mauvais contact [17].

I.5.3 Contamination atmosphérique

Le sable, la poussière et le sel sont les principales contraintes de contamination qui peuvent affecter le comportement des équipements et influencent leurs rendements. Notons qu'aucun métal n'est doué d'immunité contre les effets du sel contenu dans l'air et que ce sel contenu par l'atmosphère peut largement accélérer les phénomènes de corrosion. Le contact entre deux métaux en présence du sel et de l'humidité engendre la corrosion galvanique qui représente un des plus sérieux problèmes, la poussière et les fines particules de sable en présence de l'humidité élevée provoquent le court-circuit et le mauvais fonctionnement.

I.5.4 Humidité

La température et l'humidité conduisent à des taux de défaillance très élevés par rapport à n'importe quel autre environnement. L'humidité peut influencer la fiabilité des équipements ou des composants par [17] :

- Formation d'une pellicule fine de liquide
- Pénétration de la vapeur à l'intérieur des dispositifs
- Absorption d'énergie électromagnétique (si elle est présente) par la vapeur qui se traduit par un effet de charge pour les éléments inductifs (électroniques)
- L'humidité provoque essentiellement des défaillances par création de courants de fuite ou court-circuit et par corrosion, car la vapeur contient toujours des mélanges corrosifs.

Les impuretés de n'importe quelle surface provoquent rapidement l'ionisation de la pellicule de liquide et cette dernière devient conductrice; ceci se traduit dans le langage électrique par des changements de la résistance d'isolement, de la résistivité de surface, de la capacité, ... La constante diélectrique d'un matériel humide augmente et dépend de la température. Quant à l'effet secondaire qui est la corrosion, on distingue surtout deux mécanismes différents :

- ▶ La corrosion galvanique, provoquée par la mise en présence de deux métaux différents tel l'aluminium et l'or dans le cas des microcircuits dans un électrolyte; ceci conduit à la création d'une pile électrolytique. La réaction anodique de corrosion affecte l'électrode où se forment des ions.
- ▶ La corrosion électrolytique, qui requiert une polarisation extérieure.

I.5.5 Facteurs climatiques et géographiques

Parmi les facteurs climatiques et géographiques du point de vue fiabilité, on distingue cinq catégories de climats sur terre [18]:

- ▶ Tropical (chaud et humide) ;
- ▶ Désertique (aride) ;
- ▶ Polaire ;
- ▶ Maritime (corrosif) ;
- ▶ Haute altitude.

Les contraintes climatiques les plus dures sont rencontrées par les avions stratosphériques, par les fusées intercontinentales et interplanétaires, par les véhicules spatiaux, etc. Cela explique pourquoi les composants et les équipements utilisés à bord de ces véhicules doivent avoir une très haute fiabilité. Les conditions désertiques rencontrées dans des endroits, comme (l'Arabie Saoudite, l'Iran, le sud de l'Algérie, ... Etc.), rendent plus difficiles les problèmes de dissipation des équipements électroniques. En plus la variation de température de (+50°C ... +60°C) à (-5°C ... -10°C) accompagnée par des dilatations et contractions des différents matériaux peut conduire à des défaillances mécaniques des composants. C'est pour cela, il est recommandé d'utiliser des "Bum-in" (ou d'un test équivalent) pour tous les composants qui doivent fonctionner dans un climat si dur.

I.5.6 Vibrations et chocs

Les vibrations et les chocs provoquent des défaillances et endommagent l'équipement ou le composant, même si les forces inertes sont petites (25g dans le cas de vibrations, par rapport à 300 g dans le cas de choc mécanique) ; Cela s'explique par la nature répétitive des vibrations.

I.5.7 Micro-organismes

Les micro-organismes, favorisés par une chaleur humide constituent un autre facteur qui peut endommager sérieusement les équipements électroniques et électromécaniques qui opèrent dans ce milieu. Le moyen le plus efficace est l'utilisation à des périodes régulières des produits chimiques conçus spécialement pour ces fins micro-organismes.

I.5.8 Les rayonnements nucléaires

Les équipements soumis à des rayonnements nucléaires et spécialement les équipements électroniques sont susceptibles à des défaillances. Cela s'explique par le fait que les matériaux semi-conducteurs et les matériaux organiques se dégradent d'une manière appréciable s'ils sont irradiés avec des neutrons. Les rayons gamma affectent les jonctions PN. Dans le cas des circuits hybrides, les impulsions thermiques produites par détonations nucléaires conduisent au dépassement des spécifications imposées à ces circuits. Les radiations affectent plus les matériaux organiques, utilisés comme isolants

ou diélectriques. Sur les matériaux inorganiques, les radiations peuvent changer leurs structures moléculaires ou atomiques.

I.6 Etude préventive des défaillances

Dans le but d'assurer qu'un composant électronique soit fiable, deux approches sont utilisées. La première consiste à effectuer des tests de qualification accélérés. La deuxième approche consiste à évaluer la fiabilité dès la phase de conception. Ces deux approches sont complémentaires [19].

- a. La première approche est la plus utilisée en industrie. Elle consiste à fabriquer le dispositif, à l'assembler sur un substrat puis à effectuer des tests accélérés (cycles thermiques, tests d'humidité, etc). Ainsi la fiabilité est testée après que le circuit intégré et le boîtier soient conçus. Si les résultats d'analyse de défaillance révèlent des défauts, le dispositif est amélioré et une deuxième série de tests est reconduite pour évaluer la fiabilité sur les tests qui ont échoué. Cette méthode permet de bien détecter les défaillances et les analyser mais elle est très coûteuse et chronophage (beaucoup de temps).
- b. La deuxième approche consiste à évaluer et prédire les risques de défaillance dès la phase de conception du boîtier. La connaissance de ces mécanismes permet de concevoir et choisir les matériaux qui s'adaptent le mieux avec les conditions d'utilisation du dispositif. Une bonne connaissance des mécanismes de défaillances permet de minimiser et de réduire au minimum les risques de défaillances.

Cette évaluation à l'avance relève de la fiabilité prédictive et elle est appelée dans le monde de l'électronique : DFR (« Design For Reliability »).

I.6.1 Tests de qualification

Les tests approfondis de fiabilité doivent être effectués afin de pouvoir qualifier un composant. La durée de vie de la plupart des composants est de plusieurs années. Ainsi, il est difficile de les éprouver dans les conditions réelles. Par conséquent, afin d'effectuer les tests de fiabilité sur un intervalle de temps raisonnable, nous utilisons des essais accélérés au laboratoire dans un environnement contrôlé. Avec ces tests, les dispositifs sont soumis à des contraintes plus sévères afin d'accélérer l'apparition des défaillances. Parmi les tests les plus utilisés on peut citer les cycles thermiques, les tests d'humidité et les tests de vibration.

En pratique, à partir du cahier de charge, on convertit à l'aide des facteurs d'accélération, qui doivent être valides, le temps réel à la rupture en temps de rupture avec les tests accélérés. Ce temps correspond à la durée nécessaire pour valider le test. Puis, le test de fiabilité accéléré est effectué. Enfin les résultats du test permettent de valider ou pas le produit. Il faudrait aussi, s'assurer que les conditions d'accélération ne

génèrent pas de nouveaux phénomènes physiques, non pris en compte dans l'interprétation des résultats.

I.6.2 Principaux tests de qualification et leur planification

Les tests de fiabilité sont utilisés afin de simuler le comportement du produit dans son environnement d'utilisation. Il y a plusieurs tests standards qui ont été définis afin d'accélérer les phénomènes de défaillance. Les différents tests ont été standardisés, parmi les organismes qui les ont répertoriés on trouve le JEDEC (« Joint Electronic Device Engineering Council ») et l'IPC (« Institute for Interconnection and Packaging Electronic Circuits»). Les tests les plus utilisés pour la qualification des boîtiers électroniques sont répertoriés dans le Tableau I.1.

Avec les cycles thermiques, le composant est soumis à des variations de température afin d'évaluer la résistance des connexions et l'ensemble du circuit dans ces conditions. Le choix du cycle de température dépend de l'application étudiée et des exigences du profil de mission.

Les tests (PPOT, THBS/ THBC, HAST et UHST) combinent une variation de la température, de la pression et de l'humidité. Ils permettent une accélération de l'absorption de l'humidité par le composant à la condition que le circuit dissipe une puissance inférieure à 100 mW afin de permettre à l'humidité de migrer. Si cette puissance ne pouvait pas être réduite il faudrait faire du cyclage avec (une heure en mode « On » et deux heures en mode « Off »). Avec le THBS/THBC la tension électrique permet une accélération de cette absorption. Ces tests permettent d'accélérer l'apparition des défaillances liées à l'humidité comme la corrosion, la délamination et l'électro-migration [14].

Environnement du test	Abréviation	Conditions des contraintes	Niveau d'exigence
Pré-conditionnement	PCON	Niveau d'humidité 1 à 6	Passage a niveau
Cycle thermique de type C	TMCL<<C>>	-65 °C a +150°C	200 cycles
Cycle thermique de type B	TMCL<>	-55 °C a +125°C	500 cycles
Pressure pot test	PPOT	121°C, 100%RH	96 heures
Unsatured pressure cooker	UHST	130°C,85%RH	96 heures
Temperature humidity bias Static /cycled test	THBS/THBC	85°C,85%RH	1000 heures
Test de contrainte hautement accélérée	HAST	130°C,85%RH	96heures
Test de stockage a haute température	HTSL	150°C	1000 heures
High température operating life	HTOL	150°C	1000 heures

Tableau I.1 Test de quantification

I.6.3 Prototypage virtuel et évaluation de la fiabilité

L'objectif du prototypage virtuel est d'une part prédictif afin de pouvoir optimiser, prédire, qualifier et concevoir les performances avant la phase de conception des prototypes physiques et de qualification. D'autre part, le prototypage virtuel peut aider pour les actions correctives afin de résoudre les problèmes de défaillance.

L'utilisation d'outils de simulation et de prototypage virtuel est bien adaptée pour aider à l'évaluation des zones les plus fragiles, la mise en place des règles de conception et la détermination des paramètres les plus influents avec une réduction du temps de mise en marché d'un produit fiable et une optimisation des performances.

La technologie microélectronique est caractérisée d'une part par une augmentation de la complexité, du risque de défaillance et des difficultés pour satisfaire les exigences de robustesse et d'autre part par une réduction du temps consacré pour le développement, la qualification et la mise en marché d'un produit fiable.

Une grande part des défaillances des composants électroniques est due à des problèmes thermomécaniques. Ces défaillances sont souvent générées par des phénomènes physiques non pris en compte. Ceci est le résultat d'un manque de connaissances relatives au comportement des nouvelles structures et des nouveaux matériaux sous des contraintes thermomécaniques. L'analyse des contraintes dans les structures permet de mieux évaluer les zones critiques afin d'améliorer le rendement et la fiabilité des structures étudiées. L'élaboration de règles de conception pour les nouvelles architectures nécessite la validation de plusieurs étapes pour élaborer un produit fiable.

Les phases de qualification et d'évaluation de la robustesse sont généralement traitées à la suite de la préparation de prototypes physiques par l'utilisation de tests accélérés et l'estimation du risque de défaillance.

La qualification de nouveaux composants nécessite la mise en place de plusieurs types de tests. Ces tests sont souvent longs et coûteux. Cette conception fondée uniquement sur l'expérience ne peut pas conduire à des produits compétitifs. Afin de réduire le coût et le temps de développement de nouveaux produits tout en améliorant la fiabilité, des nouvelles méthodes d'évaluation de la fiabilité doivent être en mesure de parvenir à une réduction substantielle des coûts de la conception du produit, de l'analyse de la fiabilité et des essais de qualification des produits [20].

I.7 Conclusion

Actuellement, les industriels cherchent à obtenir de leurs systèmes qu'ils remplissent les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus, avec le meilleur taux de service possible et au meilleur coût. Cela se traduit par de fortes exigences en termes de disponibilité opérationnelle. Pour accroître leurs performances, il est alors essentiel d'améliorer la sûreté et la fiabilité des équipements et composants électroniques.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les méthodes de sûreté de fonctionnement. Nous avons rappelé dans un premier temps quelques concepts de la sûreté de fonctionnement et les méthodes d'analyse les plus utilisées.

Les systèmes et composants électroniques sont soumis à des environnements sévères d'utilisations (régimes extrêmes, hydrométrie, variations de température, ...) qui entraînent de fortes contraintes ainsi à leur défaillance. Les causes de défaillance peuvent être dissociées en deux groupes : Les défaillances intrinsèques et aléatoires sous faibles contraintes, liées à des mécanismes de dégradation physico-chimiques, donc indépendantes du temps (contamination ionique, particules ionisantes...). Les défaillances dont l'origine est un vieillissement du composant sous fortes contraintes (délamination de l'un des joints brasés, décollement de bonding, électromigration...).

La fiabilité des systèmes et composants est prédictive et basée sur la connaissance des mécanismes qui permet de concevoir et choisir les matériaux qui s'adaptent le mieux avec les conditions d'utilisation du dispositif. Une bonne connaissance des mécanismes de défaillances permet de minimiser et de réduire au minimum les risques de défaillances.

Dégradation et mode de défaillance des composants de puissance

II.1. Introduction

La tendance actuelle consiste à mettre de plus en plus d'équipements électroniques dans des applications embarquées (aéronautique, ferroviaire, automobile etc.) pour lesquelles la fiabilité constitue un enjeu majeur pour les concepteurs. De plus, les puissances dissipées au niveau des puces de puissance des modules déjà présents dans des applications automobiles augmentent. Ceci implique l'apparition de nouveaux modes de défaillance des composants et modules de puissance.

La tendance actuelle en électronique est de concevoir des modules dissipant des densités de puissance spécifiques et supportant des contraintes environnementales sévères dues aux profils de mission (thermiques, mécaniques, hygrométriques, ...). Ces considérations nécessitent une sûreté de fonctionnement performante des modules pour garantir une bonne fiabilité. Cela passe notamment par une minimisation de plus en plus des composants et modules électroniques et l'insertion de système de refroidissement approprié ou même un bon boîtier.

Dans cette optique, nous allons présenter les dégradations et les causes de défaillances des modules de puissance en prenant l'exemple des composants IGBT (Insulate Bipolar Transistor) comme modèle, pour cela connaître le principe physique et technologique de ce composant est très important pour prédire le comportement en circuits et détecter les régions défaillantes de ce module de puissance.

II.2 Fiabilité des modules de puissance

L'étude de la fiabilité en électronique de puissance est un vaste problème impliquant l'interaction de contraintes multiples, d'imperfections physiques et technologiques des constituants, allant du cristal au circuit de puissance ceci suivant différents modes de défaillance.

II.2.1 Principaux modes de défaillances des modules de puissance

Au cours de leur fonctionnement, les composants de puissance à semi-conducteur et leur assemblage respectif subissent des cycles thermiques actifs, induits par les pertes par conduction et commutation dans les puces. Dans le cas des applications embarquées en plus des cycles thermiques actifs, les modules de puissance subissent des contraintes environnementales qui peuvent être extrêmes et notamment pour des applications aéronautiques et spatiales.

Lorsque l'on étudie la fiabilité des modules de puissance au sein d'un laboratoire, nous mettons au point des essais de vieillissement accéléré visant à reproduire les contraintes thermomécaniques subies par les modules de puissance. La définition de protocoles de test présentant différents niveaux d'accélération de vieillissement, nous permet d'accélérer les contraintes imposées aux modules de puissance. La définition d'un indicateur de dégradation permet d'arrêter les tests de vieillissement accéléré. Ces

indicateurs peuvent être d'origine électrique ou thermique selon le mode de défaillance détecté comme [21]:

- La dégradation des fils de câblage se traduit par l'augmentation de la chute de tension directe collecteur-émetteur $V_{ce_{on}}$,
- Le délaminage des brasures du module de puissance provoque l'augmentation de la résistance thermique entre la jonction et la semelle, révélant une mauvaise évacuation de la chaleur entre la puce et le refroidisseur,
- L'apparition de courant de fuite grille-cathode et anode-cathode au sein des transistors IGBT révèle une détérioration de la puce de puissance.

II.2.1.1 Fatigue thermique des joints de brasures

La Figure II.1 présente une illustration simplifiée d'un module de puissance de type substrat céramique dont les métallisations sont en cuivre DCB. Ce module se compose de l'élément actif qui est la puce de puissance à semi-conducteur (IGBT ou MOSFET) qui assure la fonction électrique de l'assemblage de puissance et fonctionne en interrupteur électrique. Le substrat isolant permet à la fois l'isolation électrique et l'évacuation des calories dissipées (pertes dans les puces). Il joue également le rôle d'un support mécanique pour les connexions électriques. L'ensemble est ensuite reporté sur le refroidisseur par l'intermédiaire d'un support métallique (semelle). Le module est protégé par un boîtier adapté aux connexions électriques, entre le boîtier et l'assemblage de puissance, généralement on rajoute un gel pour éviter la formation d'arcs électriques et pour protéger le module des impuretés [22].

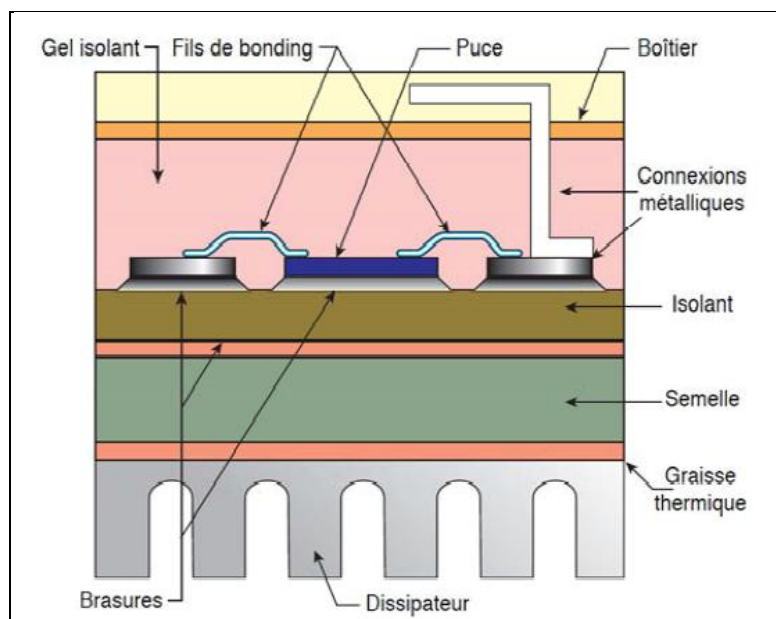


Figure II.1 Assemblage classique de puissance monté sur son radiateur [22]

Les principales fonctionnalités d'un module de puissance sont :

- La liaison électrique entre les différentes puces,
- L'isolation électrique entre les connexions,
- La protection des puces,
- Le maintien mécanique.

Les critères de choix principaux d'un module de puissance sont :

- Le coût, le poids et le volume,
- La tension de blocage,
- Le courant maximum du collecteur
- La fréquence de travail (parasites).

La défaillance de l'un ou de plusieurs éléments constituant l'assemblage de puissance peut fortement diminuer les performances de ce dernier, et dans certains cas, peut être fatal au bon fonctionnement du module de puissance. Les brasures constituent un élément important dans l'étude de la fiabilité des modules de puissance. En effet, elles sont fortement assujetties aux phénomènes de délaminage et de craquelure qui constituent le mode de défaillance le plus remarqué lorsqu'on soumet le module de puissance aux tests de vieillissement accélérés passifs et actifs [15]. Les brasures assurent plusieurs fonctions simultanément, elles permettent :

- L'assemblage des différents constituants,
- La circulation du flux thermique entre les éléments actifs et la semelle,
- La connexion électrique entre le semi-conducteur et le substrat métallisé relié aux connexions de puissance externes.

L'assemblage de puissance est soumis à de nombreuses contraintes (thermiques, électriques, environnementales, etc.) lors de son utilisation. A cause de toutes ces contraintes, le module de puissance peut subir la dégradation de ses propriétés : électriques, thermiques et mécaniques.

Plusieurs études ont été dédiées à la fatigue thermique des joints de brasure constituant les modules de puissance [23], [24], [25]. Ces études montrent que ces brasures constituent l'élément le plus fragile de l'assemblage de puissance par rapport aux cycles de vieillissement accéléré thermique passif, appliquées aux modules de puissance.

II.2.1.2 Défaillance du fil de câblage

Le deuxième mode de défaillance important est la défaillance au niveau des fils de câblage reliant la puce de puissance à son environnement de connexion électrique. On peut diviser la défaillance à ce niveau en deux catégories :

- La levée des fils de câblage au niveau de la couche de métallisation de la puce de puissance,
- La fracture du fil de câblage au niveau du pied de ce dernier.

On peut trouver dans la littérature plusieurs études dédiées à la levée des fils de câblage [20]. Ce mode de défaillance (Figure II.2 (a)) est dû essentiellement à la différence du CTE entre l'aluminium de la couche de métallisation et le silicium. En effet, le CTE de l'Aluminium est de l'ordre de 23 ppm/K à température ambiante, alors que le CTE du Silicium est seulement de l'ordre de 2,6 ppm/K.

En ce qui concerne les fissurations initiées au niveau du pied du fil de câblage, elles sont essentiellement dues aux problèmes de qualité de la fabrication du fil de câblage [26]. Toutefois, ce mode de défaillance peut être le résultat des contraintes thermomécaniques subies par ce dernier (Figure II.2 (b)) [27].

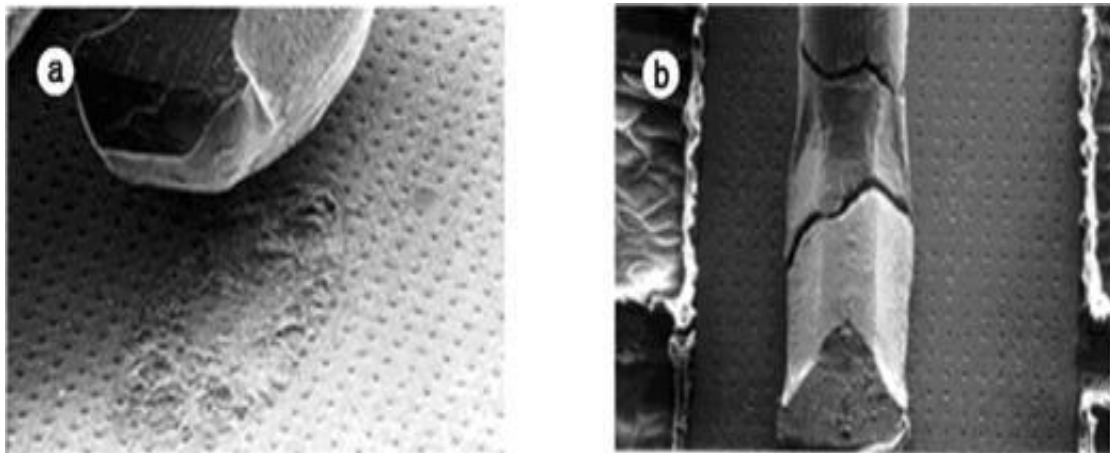


Figure II.2 (a) Levée du fil de câblage, (b) fracture du pied du fil de câblage [27]

II.2.1.3 Défaillance au niveau de la puce de puissance

La défaillance au niveau de la puce de puissance peut être une cause importante dans la défaillance au niveau du module de puissance. Cette défaillance peut être liée intrinsèquement à la fonctionnalité électrique de la puce de puissance à savoir la fonction d'interrupteur électrique. Elle peut également être liée à la défaillance même des matériaux et des différentes couches constituant la puce de puissance elle-même [22]. Lorsque la puce de puissance est soumise simultanément à l'application d'un fort

courant et d'une tension élevée, la puissance électrique instantanée devient très importante menant, dans de nombreux cas, à la destruction de celui-ci. Les principaux phénomènes physiques conduisant à la défaillance des composants de puissance sont les phénomènes de retournement (Latchup), de claquage et d'emballement thermique [24]. Le deuxième type de défaillance au niveau de la puce de puissance concerne la défaillance de la couche de métallisation de la puce et la dégradation de l'oxyde de grille, comme cela a été étudié par Ciappa [28].

II.2.2 Evaluation de la fiabilité

L'étude de la fiabilité des modules de puissance consiste à définir les modes de défaillance importants qui peuvent détériorer le fonctionnement nominal d'un module de puissance. Ces études sont basées sur la physique de défaillance, sur les études statistiques et de probabilités de défaillance et aussi sur les retours d'expérience. Le retour d'expérience est particulièrement important dans le domaine de la fiabilité parce que la récupération des modules défaillants, lorsque cela est possible, permet une investigation complète des mécanismes de défaillance effectivement responsable de la défaillance observée.

L'étude en laboratoire par les tests de vieillissement accéléré est nécessaire pour évaluer la fiabilité, par contre les phénomènes physiques responsables de telle ou telle défaillance peuvent être différents des modes réellement subis dans une application donnée. Pour cette raison, le retour d'expérience est nécessaire pour corroborer les résultats des tests de vieillissement accéléré et les modules défaillants. Malheureusement, les données des retours d'expérience sont souvent à la disposition exclusive des constructeurs et des utilisateurs directs, donc difficilement accessibles. D'autant plus que, dans certains domaines où les puissances électriques mises en jeu sont très élevées, les modules de puissance défaillants sont dans un état de destruction avancée rendant toute prospection difficile ou dans certains cas impossibles.

Du point de vue industriel, la fiabilité en général et particulièrement celle liée aux modules de puissance n'a de sens que si cette fiabilité est associée à une valeur numérique. Le taux de défaillance du module de puissance est un critère de choix et une figure de mérite est utilisée pour qualifier ce genre de composant (Figure I.5).

Pour définir le taux de défaillance λ , on a recours généralement aux recueils de fiabilité. Ces recueils sont bâtis à partir des données provenant de retours d'expériences. Ils se basent sur l'hypothèse que le taux de défaillance est constant sur toute la durée de vie du composant (pas d'effet lié au vieillissement). On peut citer entre autres [29]:

- MIL-HDBK-217F [30],
- UTE-C 80-810 (RDF2000) [31],
- FIDES [32].

II.2.3 Durée de vie des modules de puissance

On peut résumer l'étude de la fiabilité des modules de puissance à la proposition suivante : Peut-on déterminer ou au moins estimer la durée de vie d'un module de puissance dans son environnement applicatif ?

La méthodologie suivie jusqu'à présent consiste à faire une extrapolation temporelle entre les essais de vieillissement accéléré effectués en laboratoire et les profils de mission concernant l'application étudiée. En regroupant les simulations par éléments finis au niveau du module de puissance, nous pouvons estimer la durée de vie d'un module de puissance pour une application donnée. Cette méthode est basée sur une hypothèse forte qui consiste à supposer que les modes de défaillance relevés pendant les essais accélérés correspondent aux mêmes modes de défaillance relevés dans l'application réelle. La deuxième limitation par rapport à cette méthodologie est le fait qu'elle est liée étroitement aux profils des missions. Ces derniers ne sont pas toujours aussi facilement normalisés puisqu'ils dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être : l'utilisateur, les variables environnementales, etc ..., [24].

L'approche méthodologique que nous allons choisir dans ce mémoire consiste à s'orienter plus vers la fiabilité prédictive. En se basant sur des indicateurs précoces de défaillance, on essaiera de remonter à l'état actuel du module de puissance qu'on va choisir dans son environnement applicatif.

II.3 Exemple de défaillance des composants de puissance IGBTs

II.3.1 L'IGBT : Principe physique et technologie

L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) se constitue de quatre couches semi conductrices différentes ((P⁺, N⁻, P⁺, N⁺) créées sur le même cristal de Silicium, figure (I.1 a). Ce transistor associe deux technologies différentes (bipolaire et MOS) afin d'obtenir leurs avantages tout en réduisant leurs inconvénients. Il est possible, à partir de la structure interne d'un IGBT, d'extraire un schéma équivalent, Figure (I.1b) [33].

Celui-ci fait apparaître un transistor MOSFET à canal N, deux transistors bipolaires NPN et PNP et une résistance entre les zones N⁺ et P⁺ ainsi qu'une résistance de modulation (R_{mod}) relative au comportement de la couche faiblement dopée N⁻. Il est tout à fait possible de simplifier ce modèle en supprimant la résistance entre la zone N⁺ et P⁺, et le transistor parasite N⁺P⁺N⁻. Cette dernière simplification se justifie par le fait que beaucoup d'études sur la structure de l'IGBT ont permis de diminuer l'influence de ce transistor, limitant donc les risques de latch-up (amorçage du thyristor constitué des jonctions N⁺P⁺N⁻P⁺). Le schéma équivalent se ramène donc à un MOS bipolaire PNP avec une résistance modulable R_{mod} qui doit tenir la tension à l'état bloqué et avoir une faible valeur à l'état passant. Ceci implique que la couche N (ou région de base) doit être faiblement dopée, épaisse et associée à une zone d'injection P⁺ pour réduire la chute de tension à l'état passant.

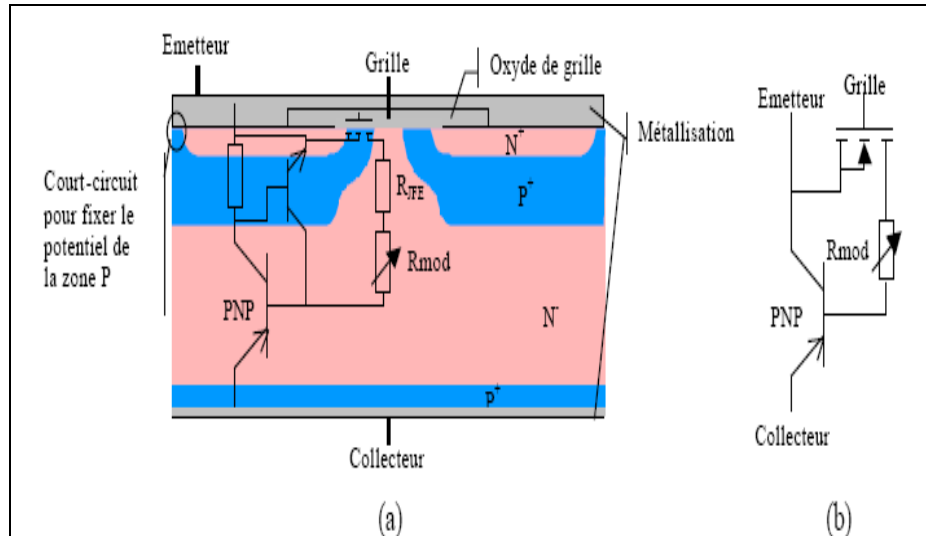


Figure II.3 Composant IGBT : (a) Structure (b) Schéma équivalent

De ce fait, le MOSFET intégré n'a pas à supporter une forte tension au blocage mais doit conduire un fort courant à l'état passant, tout en ayant une faible chute de tension. La commande est réalisée en appliquant une tension entre la grille et l'émetteur. Si on applique une tension positive entre la grille et l'émetteur, supérieure à une certaine tension de seuil, un canal N se crée dans la couche P⁺, entre les couches N⁺ (émetteur de l'IGBT) et N⁻. Ce canal se crée par effet MOS. Le transistor MOS du schéma équivalent devient conducteur et un flux d'électrons est injecté dans la couche N⁻. Ce flux d'électrons stimule la jonction N-P⁺ en diminuant la taille de la zone de charge d'espace au niveau de cette jonction. Cet abaissement de la barrière de potentiel permet le passage des trous de la région P⁺ vers la région N⁻ (ainsi que celui des électrons dans le sens opposé). La couche N⁻ se trouve donc en forte injection de trous. La double injection de trous et d'électrons en quantité voisine permet de moduler la résistivité de la région de base du transistor PNP. Cette modulation entraîne la diminution du champ électrique dans cette région, champ initialement intense dû à l'état bloqué du transistor. Cela permet d'avoir une faible chute de tension aux bornes de l'IGBT, à l'état passant. Les trous transitant dans la région de base sont aspirés par la jonction N-P⁺ polarisée en inverse, ce qui constitue le courant du PNP. Le courant conduit dans le transistor est donc issu d'un flux d'électrons dû à la partie MOS et d'un flux de trous dû à la partie bipolaire comme il est montré sur la Figure (II.4) [34].

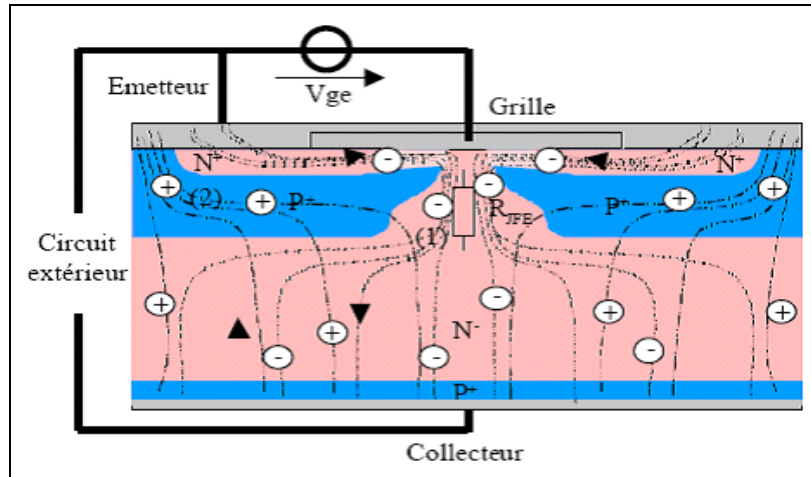


Figure II.4 Conduction de deux cellules IGBT adjacentes [34].

Le rapport entre ces deux courants constitue le gain β du transistor bipolaire (le courant issu du MOS correspond au courant de base du transistor bipolaire). Ce gain β peut être modifié en jouant sur l'efficacité d'injection des trous de la jonction P+N (collecteur) et sur le coefficient de transport des porteurs dans la région de base N (dépendant de la concentration de dopant et de la durée de vie des porteurs dans cette zone). D'ores et déjà, on peut constater qu'il existe deux familles d'IGBT :

- Si le gain β est faible, le comportement MOSFET est privilégié (rapidité de commutation)
- Si le gain β est élevé, le comportement bipolaire est privilégié (faible chute de tension)

Le compromis entre ces deux comportements reste aujourd'hui un dilemme lors de la conception de transistors IGBT.

Une fois le transistor est passant, si on applique une tension nulle ou négative entre la grille et l'émetteur, le canal N formé dans la région P+ se referme très rapidement (effet MOS) et donc le flux d'électrons injecté dans la base du bipolaire PNP est stoppé. Suite à cette fermeture, la région de base du bipolaire se retrouve en l'air avec une quantité de charges stockées importante. Ces charges stockées agissent toujours sur la base N- et donc maintiennent le PNP en conduction. Pour que le transistor IGBT se bloque, il faut annuler la quantité de charges stockées dans la région de base. Cette annulation peut se faire par recombinaison naturelle des porteurs dans la zone N- (dépendante de la durée de vie de ces dits porteurs dans cette zone et de la quantité de charges initialement présente) et par évacuation de charges via la jonction P+N-. Le blocage de l'IGBT fait donc apparaître deux phases de décroissance du courant collecteur : une première phase de décroissance rapide due à l'ouverture du canal MOS et une seconde phase plus lente due à l'évacuation des charges présentes dans la région de base. Cette deuxième phase constitue le principal inconvénient de l'IGBT puisqu'elle fait apparaître une queue de courant (ou courant de traînage) engendrant un surplus de

perdes à l'ouverture et une limitation de la fréquence de découpage du composant de puissance. Pour limiter ce courant de traînage, il faut privilégier le comportement du MOSFET en diminuant le gain β du bipolaire, ce qui a pour conséquence d'augmenter la chute de tension à l'état passant. Ceci est possible en diminuant l'efficacité d'injection des trous dans la région N^- ce qui limite la quantité de charges stockées dans cette région. Il est possible aussi de réduire le courant de traînage en diminuant la durée de vie des porteurs dans la région N^- . Ceci facilite la recombinaison des charges stockées mais accroît aussi la chute de tension à l'état passant et rend le composant plus sensible à la température [29].

Nous voyons bien qu'il existe des moyens pour améliorer les caractéristiques de l'IGBT au blocage, mais ces moyens amènent inévitablement une augmentation de la chute de tension à l'état passant. Plusieurs technologies d'IGBT ont été mises au point pour réduire cette chute de tension.

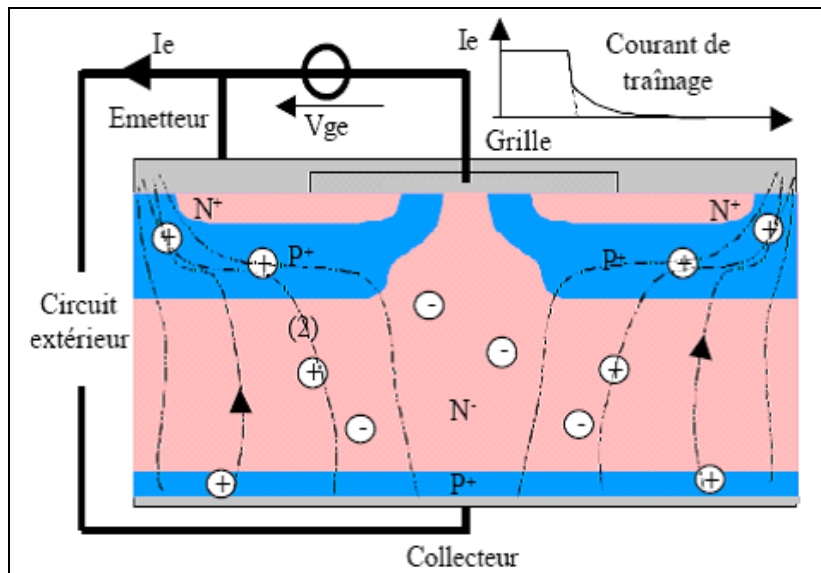


Figure II.5 Blocage de deux cellules IGBT adjacentes [29].

II.3.2 Comportement électrique du module IGBT au sein d'une cellule de commutation

L'étude des aspects physiques et technologiques des modules IGBT nous a permis de connaître et de comprendre les phénomènes liés à la conduction et à la commutation. On doit aussi faire une étude du comportement de tel composant au sein d'une cellule de commutation, afin de définir les contraintes électriques subies par les puces (tension maximale à l'état bloqué, courant maximal à l'état passant...). Ces notions sont essentielles pour comprendre certaines causes de défaillance, mais aussi pour prédire le comportement thermique du composant en mode de fonctionnement.

II.3.2.1 Caractéristiques statiques de l'IGBT et de la diode

Les caractéristiques statiques de l'IGBT et de la diode, pour une température donnée, sont présentées sur la figure (I.4) [35].

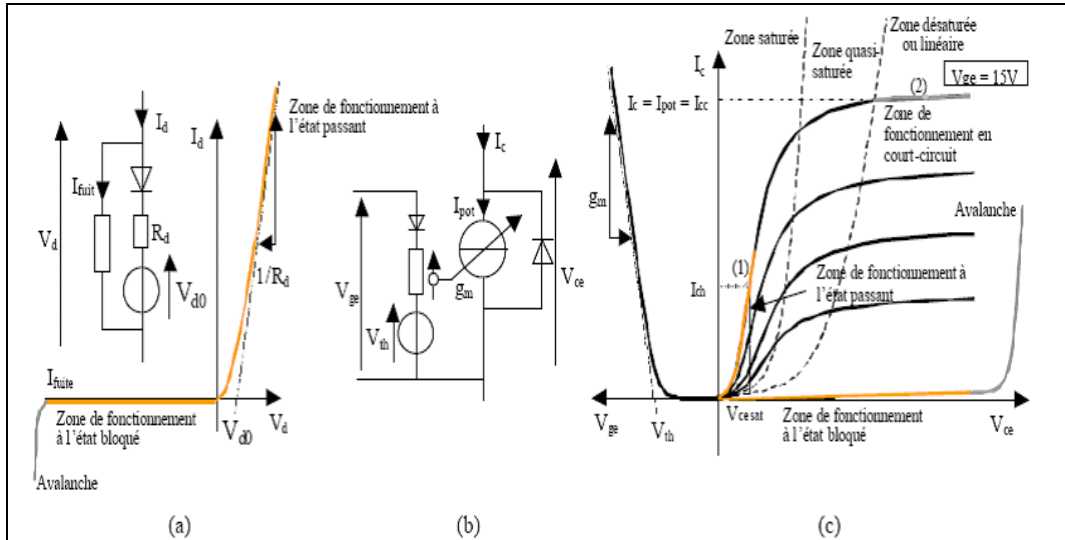


Figure II.6 Caractéristiques et modèle statique [35].

(a) Diode,

(b) Modèle MOS/IGBT,

(c) Transistor IGBT

L'IGBT est bloqué lorsque la tension de grille V_{ge} est inférieure à la tension de seuil V_{th} . Le composant supporte donc toute la tension d'alimentation. Il devient passant lorsque la tension de grille est supérieure à la tension de seuil. Le courant, qui est imposé par la charge, transite dans le composant. En fonctionnement normal, le point de fonctionnement est indiqué sur la Figure II.6 par le point (1). Ce point est défini par l'équation (II.1) [35]:

$$i_c = (1 + \beta) \cdot C_0 \cdot [(V_{ge} - V_{th}) \cdot V_{ce}] \tag{II.1}$$

Avec : $C_0 = \frac{\mu_{ns} \cdot C_{ox} \cdot Z_{canal}}{L_{canal}}$

Avec :

β le gain de la partie bipolaire

μ_{ns} : La mobilité des porteurs dans le canal N

C_{ox} : La capacité de l'oxyde MOS

Z_{canal} : La largeur du canal MOS

L_{canal} : La longueur du canal MOS

Selon cette relation, la tension à l'état passant est d'autant plus importante que la tension de grille est faible. Pour réduire les pertes par conduction, il est nécessaire de commander le composant avec une tension de grille relativement élevée. Dans le cas d'un court-circuit, les caractéristiques statiques de l'IGBT permettent d'obtenir le point de fonctionnement. Lorsque cela se produit, l'impédance de la maille est extrêmement faible. Le point de fonctionnement se retrouve alors en (2) car l'IGBT se désature ou n'a pas pu se saturer (en fonction du type de court-circuit). L'IGBT se comporte comme un limiteur de courant et son amplitude dépend des caractéristiques du composant dans la zone saturée. De plus, la tension aux bornes du composant est égale à la tension d'alimentation de la cellule. Comme tout transistor ayant un rôle de limiteur de courant dans ces cas là, l'IGBT est soumis à des contraintes très importantes pouvant l'entraîner dans des régimes de fonctionnement extrêmes amenant la destruction de ce dernier. Le courant, lors d'un court-circuit est donné par l'équation (2) :

$$i_{\text{cc}} = (1 + \beta) \cdot \frac{C_0}{2} \cdot (V_{\text{ge}} - V_{\text{th}})^2 \quad (\text{II.2})$$

Cette relation nous montre que l'amplitude du courant de court-circuit dépend de la tension de commande (V_{ge}) et de la transconductance. De plus, le gain β et la tension de seuil V_{th} , sont sensibles à la température. Durant le court-circuit, la valeur du courant décroît avec l'augmentation de la température. Lorsque la température de génération intrinsèque de porteurs est atteinte, le silicium entre en régime intrinsèque : ses caractéristiques changent du tout au tout et le courant n'est plus maîtrisé [25].

II.3.2.2 Caractéristiques dynamiques de l'IGBT

Pour analyser le comportement dynamique de l'IGBT durant les phases de commutation, il est important de compléter les modèles statiques par les capacités parasites entre les jonctions des semi conducteurs et de tenir compte du recouvrement pour la diode [2]. Comme dans le cas du MOSFET, la capacité C_{ge} de l'IGBT est constante en tout point de fonctionnement tandis que les capacités C_{gc} et C_{ce} sont non linéaires en fonction de la tension à leurs bornes. Ce phénomène, appelé effet Miller, fait apparaître un plateau sur la tension de grille lors de la commutation. Le modèle complet de l'IGBT est donné sur la Figure(II.7) [35].

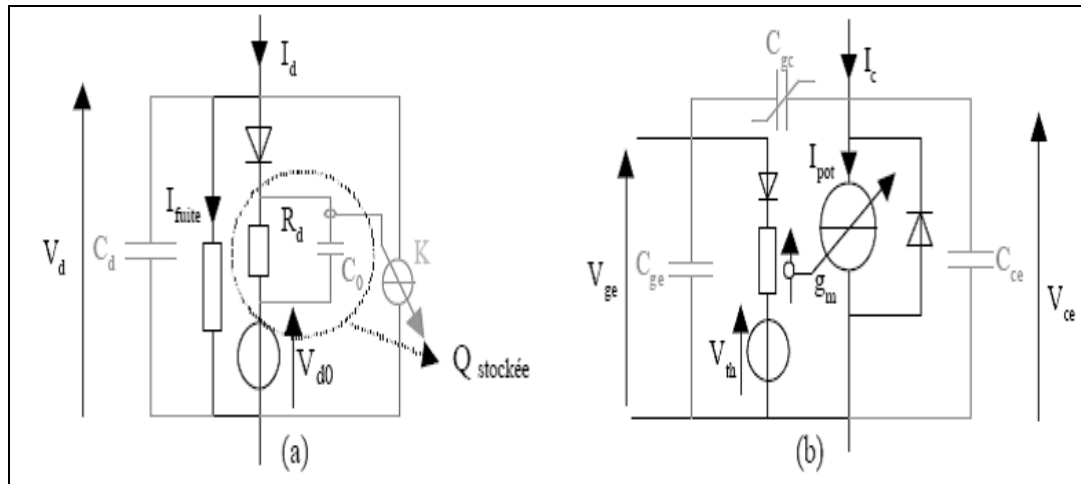


Figure II.7 Modèle dynamique de la diode et de l'IGBT [28].

Pour bloquer l'IGBT, il faut appliquer une tension nulle ou négative entre grille et émetteur. La dynamique de la tension V_{ce} durant cette phase peut être fixée par deux phénomènes : si on considère que cette dynamique ne dépend que du courant de charge, donnée par l'équation(3):

$$\left(\frac{dV_{ce}}{dt}\right)_{off} = \frac{I_{ch}}{C_{oss}} \quad (II.3)$$

Par contre, si on considère que cette dynamique génère un fort courant capacitif dans C_{gc} , la commande de l'IGBT peut contribuer à la dynamique de la tension.

II.3.3 Les différentes structures d'IGBT

Il existe plusieurs « types » de composants IGBT, qui selon leurs structures, ont des comportements physiques et performances électriques différents. Il faut avant tout distinguer deux technologies de conception « fondamentales » qui sont la technologie dite « planar » et la technologie dite « trench ». Une différence majeure existe, au niveau de la grille de commande, entre ces deux composants et influe de façon fondamentale sur le comportement électrique du dispositif.

II.3.3.1 La structure Planar

La technologie est dite Planar ou « latérale » faisant référence à son canal MOS qui est latéral/horizontal. Dans cette technologie on pourra référencer les structures suivantes : NPT pour « Non Punch Throug », PT pour « Punch Through », et plus récemment SPT pour « Soft Punch Through ». La structure NPT est la structure « basique » d'un IGBT. Afin d'obtenir les autres structures (PT et SPT), le principe est de partir de

la structure NPT, Figure (II.8) classique à laquelle on aura ajouté une couche que l'on appelle buffer ou tampon [35].

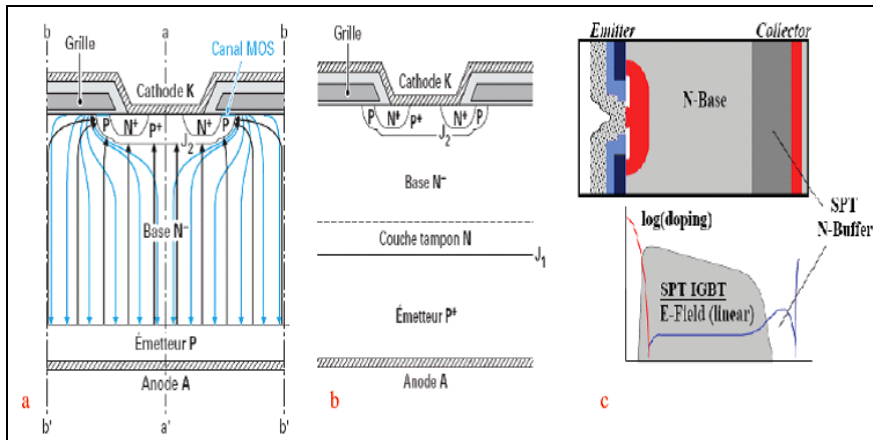


Figure II.8 Représentation des différentes structures Planar [14]:

- (a) NPT ;
- (b) PT ;
- (c) SPT.

II.3.3.2 La structure Trench

La particularité de cette technologie réside en la conception de la grille de commande du MOS, qui est devenue, par rapport à la structure Planar, verticale et « enterrée », figure (II.9). De ce fait, les flux de courants au sein du composant deviennent totalement verticaux et adoptent donc des trajectoires optimisées au fonctionnement du dispositif.

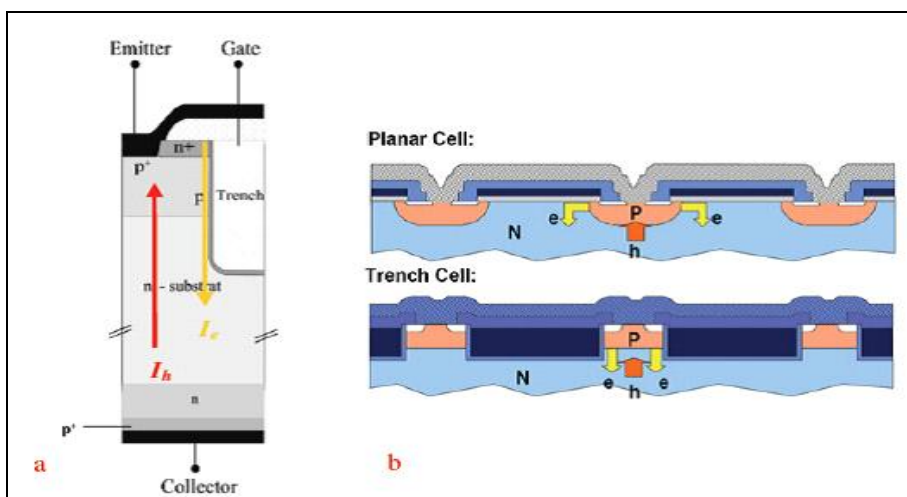


Figure II.9 Représentation [14] :

- (a) d'une structure Trench avec couche tampon ;
- (b) des flux de courant dans une structure Planar et Trench.

II.3.3.3 Les structures les plus récentes

Dans la course à la réduction des pertes, certaines structures dites « avancées » bénéficient de cellules supplémentaires, diffusées ou enterrées, généralement de type N^+ pour des composants à canal N . Le composant IGBT CSTBT (Carrier-Stored Trench-Gate Bipolar Transistor) est une structure à tranchée qui possède une couche enterrée N^+ entre le caisson P/P^+ et la base large N^- , Figure II.10). Plus dopée que la base N^- , cette couche (Carrier Stored layer) a pour but la réduction de la tension de déchet à l'état passant [14].

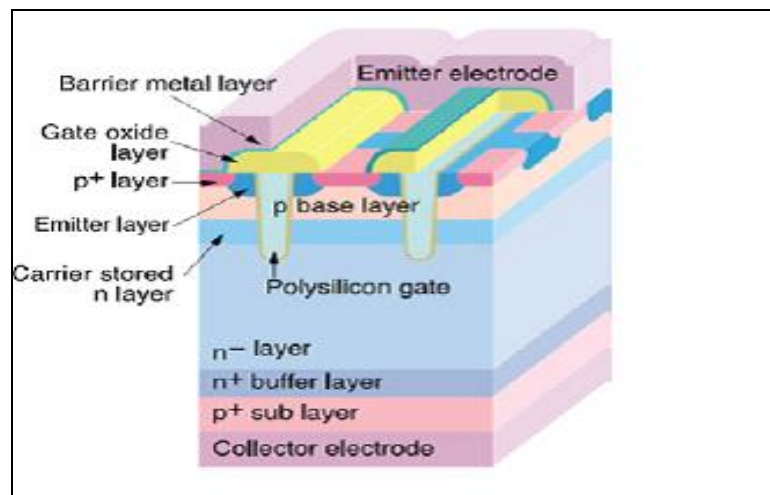


Figure II.10 Coupe du Trench CSTBT Light Punch Through [14].

Les électrons injectés depuis le canal du MOS diffusent aisément dans cette couche et permet un ajustement simple de la résistivité. De plus, la présence de la barrière formée par la jonction P^+N^+ rend difficile la diffusion des trous injectés par l'anode à travers le caisson P/P^+ . Cela a pour effet de créer une accumulation de charges et de remplir les conditions de neutralité électronique du côté de la cathode. La conséquence directe est la réduction de la tension de saturation. Ce principe n'est pas exclusif aux structures à tranchée et peut également être appliquée aux composants Planar.

II.3.4 L'utilisation de l'IGBT

Les IGBT trouvent de très vastes domaines d'application dans les branches les plus diverses de l'électronique et de l'industrie comme la commutation de puissance dans les secteurs civils et militaires, alimentation pour courant élevé, appareillage médical, contrôle des moteurs en robotique, amplificateur de puissance HI-FI, four à induction magnétique, charge dynamique de puissance, alimentation à découpage, soudure électrique à l'arc et démarrage des véhicules (Figure (I.11) et comme des composants de base pour les convertisseurs de tension placés dans les sous systèmes de conversion photovoltaïques et etc. ... [36].



Figure II.11 Application de l'IGBT pour les véhicules électriques [37]

II.3.5 Mécanismes de dégradation et modes de défaillance des modules IGBT

Comme tous composant électronique en fonctionnement, les modules IGBT sont soumis à des mécanismes de dégradation et de vieillissement qui peuvent être fonctionnels (liés aux conditions de fonctionnement) ou environnementaux (liés à l'environnement, électrique ou non, du composant). Dans le domaine de la microélectronique, tous ces mécanismes de dégradation et les modes de défaillance des composants ont été très largement étudiés et le sont encore aujourd'hui. Pour ce qui est des composants de puissance, cet état de l'art va nous montrer que la plupart des études qui ont été menées concernent les conséquences du cyclage thermique appliqué aux modules IGBT de forte puissance.

Les modes de défaillance d'un module IGBT au sein d'une cellule de commutation sont constitués d'un enchaînement de phénomènes. Les causes peuvent être multiples, plus ou moins connues, et aboutissent inévitablement à la destruction du composant. Durant ce paragraphe, nous allons faire une énumération non exhaustive des mécanismes de dégradation des modules IGBT en général. Ensuite, nous allons reconstituer le cheminement amenant la défaillance et déterminer à quel moment doivent intervenir les différentes protections.

Les causes de la défaillance d'un composant peuvent provenir de deux sources [35]:

- ✚ Elles peuvent être dues aux contraintes appliquées au composant durant son fonctionnement normal (tension, élévation de température, contraintes environnementales...) : ce sont des causes dites externes. Généralement, ces mécanismes amènent le composant à fonctionner hors de son aire de sécurité.

- ✚ Elles peuvent être dues aux “défauts” induits dans le composant durant les différents procédés de fabrication (malformation de l’oxyde de grille, défauts de pureté du cristal de silicium, défaut de réalisation du packaging...) : ce sont des causes dites internes.

II.3.5.1 Les effets du cyclage thermique

Les mécanismes de défaillance apparaissant lors du cyclage thermique d’un composant sont les plus connus et les plus étudiés en électronique de puissance. Cette contrainte est généralement appliquée aux composants de moyenne et forte puissance utilisés dans le domaine de la traction : entraînement ferroviaire, véhicule électrique, ... Cette contrainte résulte de l’application de cycles de marche et d’arrêt ou de variations de fréquence de modulation sur les dispositifs concernés. Ce cyclage entraîne une forte ondulation de la température au sein du composant et induit des contraintes thermo-mécaniques à l’ensemble des constituants du module (surtout au niveau des interfaces entre les puces et le substrat, entre ce substrat et la semelle du composant, et au niveau des bondings). Ces contraintes résultent d’une forte disparité des coefficients de dilatation des matériaux employés pour le packaging de ces modules (cuivre, alumine, silicium, aluminium...). Cette contrainte majeure limite le nombre de cycles que peut subir le composant avant la défaillance. Dans le cas des composants de type “module de puissance”, les conséquences de ce cyclage sont multiples et assez bien connues [35].

a. Déconnexion des faisceaux de bonding

La déconnexion d’un fil de bonding est due à l’apparition de micro-fissures entre l’extrémité de ce fil et la métallisation à laquelle il est soudé. De manière générale, ces fils sont constitués d’aluminium pur, de diamètre compris entre 300 et 500 μ m et soudés par ultrasons sur des métallisations d’émetteurs, en aluminium elles aussi. Ces micro-fissures sont dues à l’application de plusieurs cycles de croissance et de décroissance de la température, sur un empilement de couches, au niveau de la métallisation supérieure des puces, ayant des coefficients d’expansion thermique très différents. Ce cyclage engendre des efforts mécaniques sur la soudure du bonding, entraînant le décollement de celui-ci au bout d’un certain nombre de cycles (Figure II.2).

b. Craquelures au niveau des faisceaux de bonding

La génération de craquelures sur les fils de bonding se produit sur les modules de puissance actuels. Cette dégradation est due aux contraintes thermo-mécaniques appliquées sur le fil de bonding. Quand le fil est soumis à un cycle de température, il se dilate et se contracte entraînant un déplacement de celui-ci. Etant soudé sur les métallisations, ce déplacement induit une flexion du fil au niveau de ses deux extrémités : pour un fil de 1 cm, l’allongement est de 10 μ m à 50°C et donc induit une augmentation

de l'angle entre le fil et la métallisation de $0,05^\circ$. Cette dégradation apparaît à long terme et est souvent due à un défaut de qualité au niveau de la soudure par ultrason. La figure II.12 nous montre le décollement d'un fil de bonding et une fissure sur un autre [35].



Figure II.12 Fissure au pied d'un fil de bonding [35]

c. Déformation des métallisations en surface des puces

Durant le cyclage thermique, les efforts de tension et de compression sont appliqués à la couche de métallisation. La disparité entre les coefficients d'extension du silicium et de la métallisation ainsi que la rigidité du silicium engendre des efforts dépassant la limite de déformation élastique admissible par le contact métallisation/silicium. Dans ce cas, la relaxation du phénomène peut provoquer le fluage de la métallisation, le glissement des grains au niveau du contact ou la dislocation de la métallisation. L'apparition de ces phénomènes dépend de la température des puces. En fonction de la texture de la métallisation, ce phénomène peut amener l'extrusion ou la cavitation des grains d'aluminium au niveau de la métallisation. Cette dégradation engendre une augmentation de la résistance de la métallisation jusqu'à la destruction de la puce (Figure II.13), [35].

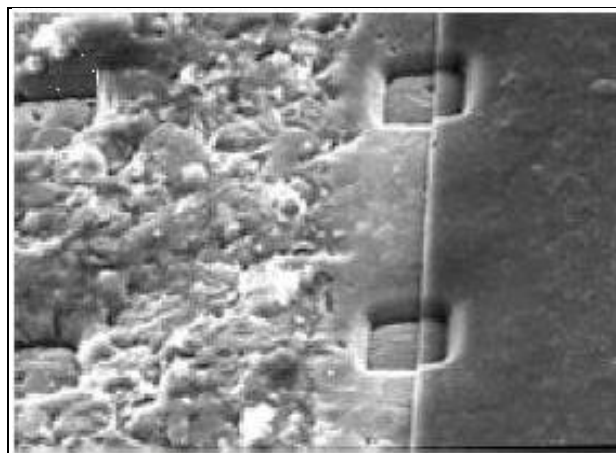


Figure II.13 Déformation de la surface d'une métallisation [35]

d. Cassure au niveau du substrat et des puces

Les matériaux les plus cassants utilisés pour la conception de module IGBT sont le silicium et la céramique du substrat isolant. Les micro-fissures déjà présentes dans ces différentes couches, soumises à de fortes contraintes thermo-mécaniques, peuvent croître et amener la rupture totale de la couche concernée. Une cassure du substrat peut provoquer la mise en court-circuit de la puce. La rupture de celle-ci peut être causée par un dommage initial, induit par la soudure des fils de bondings. La figure II.14 montre la rupture du substrat en alumine d'un module IGBT, soumis au cyclage thermique. Ce type de fissure entraîne la rupture diélectrique au niveau du substrat isolant [33].

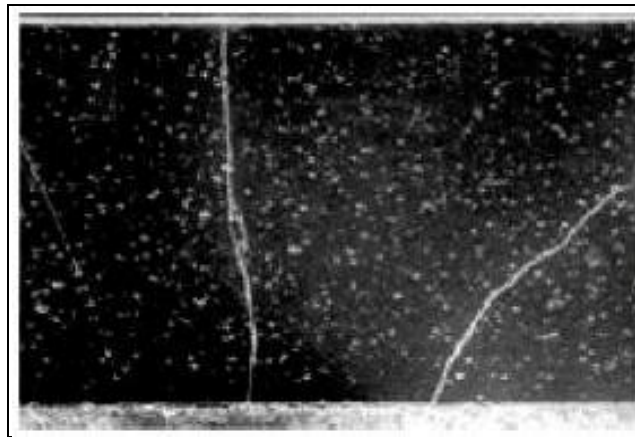


Figure II.14 Rupture du substrat d'un module [33]

e. Fatigue des brasures et délamination des puces et du substrat

Le mode de défaillance le plus courant pour les modules IGBT de puissance soumis à du cyclage thermique est le délaminage des brasures, surtout au niveau de la brasure substrat/semelle (Base plate). Cette brasure est la plus fragile car la différence entre les coefficients de dilatation du substrat (en alumine) et de la semelle (en cuivre) est la plus grande de toutes. De plus, la différence de température est la plus importante, différence appliquée sur une grande surface. Ce phénomène de fatigue thermique apparaît aussi sur la brasure puce/substrat. Cette fatigue consiste en la formation de cavités ou l'extension de cavités existantes, à l'intérieur des brasures.

Des efforts ont été faits par les fabricants de composants de manière à limiter la formation de cavités lors de l'assemblage du module, en contrôlant le profil de température lors de la formation des brasures et durant les différentes phases de recuit [38].

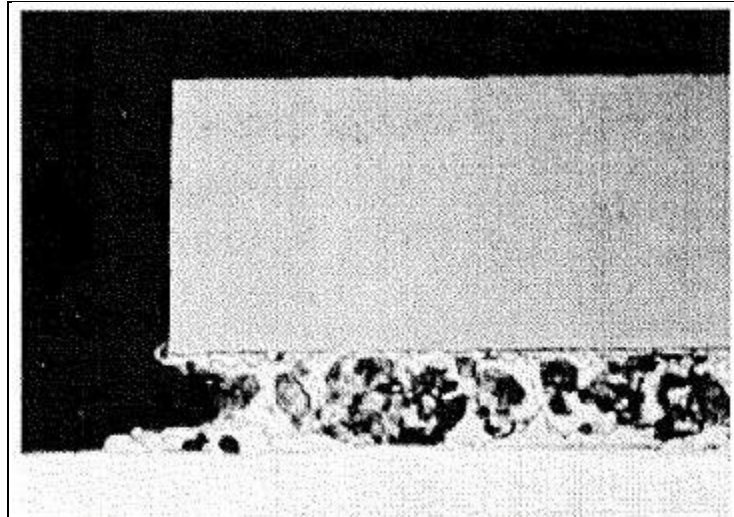


Figure II.15 Délamination d'une puce IGBT [38]

Le tableau II.1 énumère tous ces modes de dégradation et présente les différents scénarios provoquant la défaillance du module IGBT [35].

Modes de dégradation	conséquence	Mode de défaillance du module IGBT
Déconnexion des faisceaux de bonding	Auto-échauffement, ouverture des bondings amenant à la génération d'arcs électriques dans le gel silicone et risque d'explosion	Détérioration de la métallisation, puce en circuit ouvert
Craquelures des faisceaux de bonding	Augmentation de la résistivité au niveau du contact, auto-échauffement, ouverture des bondings	Puce en circuit ouvert
Déformation de la métallisation en aluminium	Dégradation limitée de la résistance de la métallisation auto-échauffement, ouverture des faisceaux de bonding ou dépassement de la température intrinsèque du silicium	Puce en court circuit ouvert ou puce en court circuit
Cassure au niveau du substrat et des puces	Claquage diélectrique de la couche, création d'un échauffement intense, augmentation du courant de fuite	Puce en court circuit ouvert ou puce en court circuit entre la puce et le radiateur
Fatigue des brasures et délaminage des puces	Augmentation de la résistance thermique sous la puce, élévation de la température de jonction, dépassement de la température intrinsèque du silicium	Puce en court circuit

Tableau II.1 : mécanismes de vieillissement des composants soumis au cyclage thermique

Ces modes de dégradation sont parfaitement bien connus car ce sont les mécanismes les plus souvent rencontrés dans les applications de type traction.

Les indicateurs liés à ces phénomènes de défaillances sont aussi bien identifiés :

- Augmentation de la tension V_{cesat} due à la dégradation de la soudure des bondings,
- Augmentation du courant de fuite entre grille-émetteur due à dégradation de l'oxyde de grille,
- Augmentation de la résistance thermique jonction/boîtier due à la délamination de la brasure substrat/semelle).

f. La corrosion

Le phénomène de corrosion touche toutes les parties métalliques d'un composant et consiste en une somme de réactions chimiques ou électrochimiques entre ces métaux et leurs environnements immédiats. Cette corrosion conduit à une détérioration des parties métalliques du composant (bonding, métallisations...) arrivant, à terme, à leurs destructions totales [Jensen]. Les dégradations dues à la corrosion électrochimique des parties métalliques prennent une part importante en microélectronique et apparaissent si les conditions suivantes sont réunies :

- Présence d'humidité dans le boîtier,
- Apparition d'une polarisation continue,
- Présence d'ions tels que Cl^- ou Na^+ agissant comme des catalyseurs dans les réactions.

En électronique de puissance, les modules IGBT sont aussi soumis à la corrosion. Quand les faisceaux de bonding, généralement en aluminium pur, sont mis en contact avec de l'oxygène, une couche d' Al_2O_3 se forme. Cette couche devient de l'hydroxyde d'aluminium ($\text{Al}(\text{OH})_3$) quand l'aluminium est en contact avec de l'eau pure. Quand il est exposé à une autre solution, cet hydroxyde d'aluminium est dissous par des acides forts et des bases fortes. En présence d'un électrolyte, l'aluminium est corrodé [20].

L'identification des causes mises en jeu pour corroder un module IGBT est très complexe. En effet, le boîtier d'un module IGBT constitué de différents métaux et alliages est confronté à de multiples sources de contaminations. La Figure II.16 nous montre deux bondings à différents stades de corrosion, le module IGBT étant soumis à du cyclage thermique (après plus d'un million de cycles). Les effets de la corrosion des faisceaux de bonding sont amplifiés par le cyclage thermique (en plus de la corrosion, les bondings sont soumis à des efforts mécaniques qui accélèrent leurs ruptures).



Figure II.16 Rupture d'un bonding d'émetteur due à la corrosion [20]

II.3.5.2 L'électromigration

Le phénomène d'électromigration peut apparaître au niveau des métallisations des circuits intégrés quand la densité de courant devient grande ($> 0,5 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$). Une température élevée accélère le processus. Quand un courant électronique traverse un conducteur, une certaine quantité de mouvement de ces électrons est transférée aux atomes du conducteur entraînant un mouvement de ces atomes dans la direction du flux d'électrons [Jensen]. Ce phénomène est accéléré avec la température avec une énergie d'activation de l'ordre de 0,5 à 0,7 eV. Le cyclage thermique a un effet d'accélération sur ce phénomène à cause de la dégradation des contacts au niveau des bonding (augmentation de la température) et de l'apparition d'efforts mécaniques intenses au niveau des métallisations. C'est pour cette raison que le phénomène d'électromigration a aussi été étudié dans le cas de composants de puissance soumis au cyclage thermique [33]. Un autre type d'électromigration existe et met en jeu la puce silicium où sont réalisées des métallisations.

Dans le domaine de l'électronique de puissance, peu d'études ont été menées concernant ce mécanisme de défaillance. Toutes les observations décrites plus haut sont issues d'études menées sur la fiabilité des composants en micro-électronique. Ce que l'on peut dire aujourd'hui concernant les composants de puissance, c'est que toutes les conditions sont réunies pour voir apparaître ce phénomène de défaillance.

II.3.5.3 Le phénomène de décharges partielles

Le phénomène de décharges partielles apparaît dans tous matériaux isolants, soumis à un champ électrique et contenant des inclusions gazeuses. La rigidité diélectrique d'un gaz est inférieure à celle d'un matériau solide isolant. Lorsque l'on applique une tension à un diélectrique contenant des inclusions gazeuses, des micro-décharges très localisées peuvent se produire dans ces inclusions. De manière générale, les décharges partielles ont lieu au voisinage des discontinuités ou le champ électrique est très inhomogène. Ces renforcements du champ électrique causent un amorçage dans le gaz contenu dans les inclusions. Aujourd'hui, ce phénomène de décharges partielles est peu observé sur des modules IGBT de moyenne puissance (i.e. pour des calibres en tension de l'ordre de 600V, par exemple), [35].

II.3.5.4 Les effets du rayonnement cosmique

Ce que l'on appelle rayonnement cosmique, c'est le flux de particules hautement énergétiques (plusieurs Krad) reçues quotidiennement sur Terre. Ces particules sont issues de l'espace mais aussi du soleil. Sur les composants électroniques, ces particules peuvent générer des charges par collision dans les oxydes de grille et dans le corps du composant. La présence de cette nouvelle quantité de charges a pour effet d'abaisser la tension de seuil de ces composants, de quelques millivolts. La robustesse aux éléments

parasites est alors réduite et il peut y avoir un risque d'amorçage du transistor, voire même apparition du phénomène de latch-up pour les transistors IGBT. Les particules les plus lourdes et les plus énergétiques peuvent créer des dégâts importants dans les oxydes de grille (La figure II.17) [35].

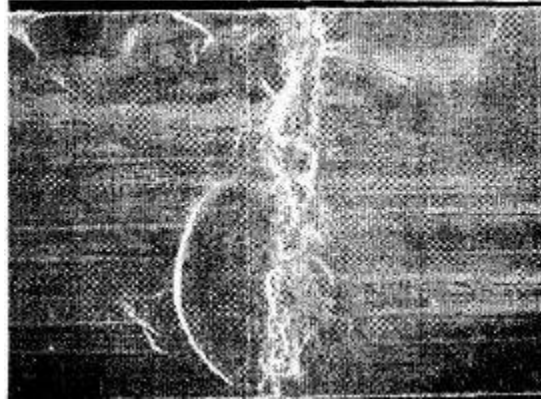


Figure II.17 Fusion locale du silicium d'une puce (vue en coupe) due au rayonnement cosmique [35]

II.3.5.5 Le vieillissement des oxydes de grille et leurs défaillances

Les avancées technologiques effectuées dans le domaine de l'électronique ont engendré une diminution de l'épaisseur des oxydes de grille, toujours alimentés par les mêmes niveaux de tension. Les mécanismes physiques d'injection de charges sont les suivants : injection thermoélectronique (Shottkey) ou effet tunnel (Fowler-Nordheim). Le résultat de cette injection est une dégradation des performances du composant, se traduisant par une augmentation de la tension de seuil et une diminution du gain du transistor [35], [20].

Les défauts intervenant au sein des oxydes de grille des transistors, sont importants. On peut citer la rupture diélectrique de l'oxyde due à une accumulation de défauts, les décharges électrostatiques, la contamination ionique, ... La défaillance d'un oxyde se traduit par l'apparition d'un fort courant local qui peut entraîner généralement une défaillance rapide du composant. Le facteur le plus important dans la rupture diélectrique de n'importe quel oxyde, pour une épaisseur et une tension donnée, est la qualité de cet oxyde. Le processus d'accroissement de cet oxyde permet de maîtriser sa qualité.

II.4 L'effet de la température sur les composants électroniques

La chaleur est un mode de transfert d'énergie qui concerne la structure atomique d'un matériau constituant tout système électronique. Lorsque ce système reçoit une certaine quantité de chaleur, l'agitation des particules qui le composent augmente. En électricité, le passage d'un courant électrique dans un conducteur provoque un dégagement de chaleur: c'est ce qu'on appelle l'effet Joule. Plus l'intensité est importante, plus la chaleur dissipée est grande. Du point de vue de la terminologie, on doit distinguer la chaleur, qui est une grandeur d'échange d'énergie, et la température, qui est une grandeur, mesurée en °C, propre au corps considéré [28].

L'augmentation de la fréquence de fonctionnement et le développement en miniaturisation a engendré plusieurs problèmes dus à l'augmentation considérable du flux de chaleur généré dans les composants électroniques. Si la chaleur n'est pas dissipée en temps voulu, la température de jonction sera supérieure à la température de fonctionnement maximale mentionnée par le constructeur, le contrôle thermique devient donc de plus en plus immédiat et important.

La température intéresse l'électronicien pour au moins deux raisons:

- ▶ Capturer, mesurer, réguler la température d'un système ou d'un lieu;
- ▶ Apprécier l'influence de la température sur le comportement d'un dispositif

En effet, l'élévation de température, ou échauffement, d'un composant peut modifier sensiblement son comportement ou ses performances. Il est donc important de refroidir suivant le cas, certains appareils (par exemple, un régulateur ou un processeur). A cet effet, on veillera à assurer une aération suffisante et, au besoin, on adjoindra au composant un radiateur ou un ventilateur.

Un autre point auquel il convient d'être attentif est l'humidité, résultant de la condensation lors des variations de température. L'humidité, comme la poussière, sont des grands ennemis de l'électronique vu leur influence sur le fonctionnement normal des systèmes électroniques [15].

La probabilité de défaillance dans les systèmes électroniques est fortement dépendante de la température de fonctionnement, comme indiqué dans la Figure II.18. La surcharge thermique est la cause de défaillance la plus fréquente dans les systèmes électroniques modernes. Par conséquent, il est vraiment important de comprendre les caractéristiques thermiques statiques et dynamiques des modules électroniques, en particulier concernant la température de jonction [35].

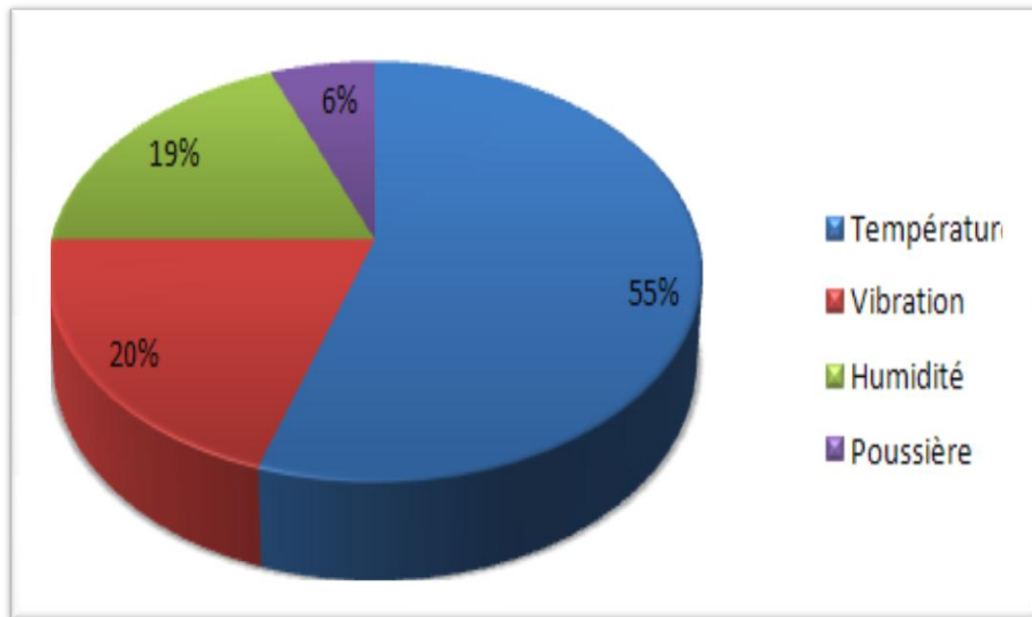


Figure II.18 Causes principales de la défaillance électronique [35]

L'élévation interne de la température se manifeste par [39]:

- Variation des performances électriques : la température peut être une valeur limite au-delà de laquelle le fonctionnement n'est pas garanti. La dérive des paramètres provoque une diminution des performances pouvant aller plus ou moins brutalement jusqu'à la défaillance ;
- Le boîtier « packaging » qui est soumis à des gradients de température très importants. Il existe des températures critiques pour lesquelles se produisent des changements d'état de structures même de boîtiers ;
- Les cycles thermiques ou le fonctionnement en mode impulsionnel, auxquels sont soumis les matériaux ayant des coefficients de dilatation différents, induisent des forces très importantes, peuvent conduire à une rupture instantanée ou créer une fatigue qui provoque une rupture à plus ou moins long terme exemples de soudures en modules électroniques.

Le packaging et la gestion thermique dans les équipements électroniques sont devenus des enjeux importants en raison de l'augmentation des niveaux de puissance et de la miniaturisation des dispositifs. Avec l'arrivée de conditionnements plus denses et des fréquences de fonctionnement plus élevées, le coût, la fiabilité et la taille ont été améliorés, mais, la gestion thermique n'a pas suivi suffisamment cette évolution. La figure II.19 présente l'évolution de la puissance thermique dissipée pour un transistor (FETS et IGBTs) et un conducteur Smart. Nous notons une augmentation considérable de la puissance thermique dissipée par les transistors. Nous remarquons également, une complexité de plus en plus importante en systèmes embarqués [35].

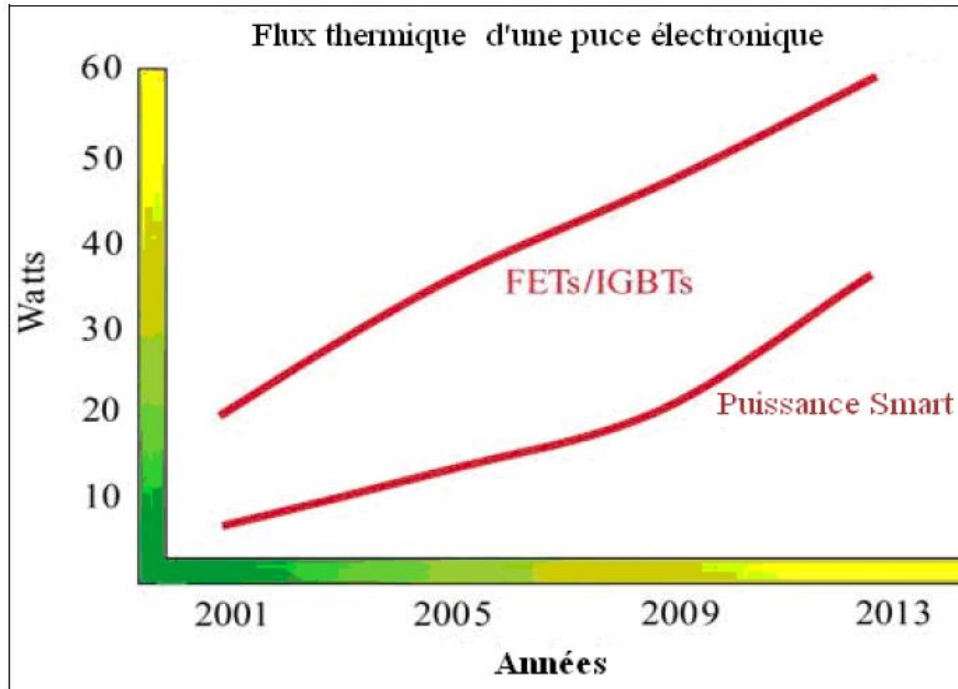


Figure II.19 Evolution de la puissance thermique dissipée pour un transistor (FETS et IGBTs) et un conducteur Smart [40]

La température est en général l'ennemi de l'électronique. La température des composants dépendra directement de la chaleur dissipée, du rendement voulu et du choix du bon boîtier.

II.5 Conclusion

La mesure de la qualité de composant s'appuie principalement sur les analyses de construction et de défaillance. La première consiste à une étude de la technologie employée avec décomposition des phases successives de fabrication du composant, la deuxième analyse teste la fiabilité et cherche les causes de défaillance et essayer de cerner le mode de destruction. Dans cette optique, nous avons présenter les dégradations et les causes de défaillances des modules de puissance en prenant l'exemple des composants IGBT comme modèle, pour cela connaitre le principe physique et technologie de ce composant était très important pour prédire son comportement en circuits et détecter les régions défaillantes de ce module de puissance.

La température est en général l'ennemi de l'électronique. La température des composants dépendra directement de la chaleur dissipée, du rendement voulu et du

choix du bon boîtier. Pour cela, nous allons engager une étude exemple sur l'effet thermique dans les modules IGBTs comme modèle, pour cela connaître son comportement thermique et détecter les régions chaudes qui pourraient le conduire à la défaillance sera notre premier pas, mais avant il faut résoudre les équations de diffusion de chaleur qui régissent ce système modulaire.

Etude de la fiabilité du Module IGBT sous Contraintes Thermiques

III.1 Introduction

Les contraintes thermiques sont depuis très longtemps prises en compte par les électroniciens de puissance car une bonne évacuation de la chaleur a toujours été nécessaire pour atteindre des calibres en courant et tension suffisants. Néanmoins, les solutions utilisées par ces derniers n'ont pas vraiment évolué car aujourd'hui la plupart des installations utilisent des dissipateurs à ailettes pour les puissances les plus faibles, des caloducs pour des puissances intermédiaires ou encore des plaques à eau pour les plus grosses puissances. La recherche sur le refroidissement des composants électroniques n'a réellement connu un essor que lorsque la microélectronique s'est retrouvée face au même type de problème il y a une vingtaine d'années : l'augmentation simultanée de la densité surfacique de transistor et de la fréquence de fonctionnement a eu pour effet d'augmenter les densités de perte. Elles peuvent aujourd'hui atteindre plusieurs centaines de Watt /cm² de silicium.

Les contraintes posées par les composants actifs de l'électronique de puissance sont principalement dues à leur structure verticale et à leur mode de fonctionnement (découpage de forts courants et de fortes tensions). Ainsi, la structure verticale des puces de puissance implique que [41]:

- les potentiels sont différents sur chaque face lorsque le composant supporte la tension.
- les niveaux de courant (et de flux de chaleur) étant importants, il faut que la résistance de contact (électrique et thermique) entre la puce et son électrode soit la plus faible possible.
- L'encapsulation (ou packaging) d'un ou plusieurs composants électronique de puissance dans un module doit prendre en compte toutes ces contraintes.

En outre, les performances de tout module de puissance sont de :

- Assurer un maintien mécanique de la puce permettant d'avoir de faibles résistances thermiques et électriques de contact entre cette dernière et son environnement.
- Permettre une bonne évacuation de la chaleur,
- Assurer une isolation électrique entre les deux électrodes et permettre au composant de tenir la tension.
- Limiter les phénomènes CEM (Comptabilité Electromagnétique) : réduction de l'inductance de maille, limitation du couplage puissance/commande.
- Assurer une bonne fiabilité dans le temps.

Dans ce chapitre on va faire une simulation du comportement thermique d'un composant électronique : IGBT mais en passant d'abord par résolution de l'équation de

diffusion thermique et la citation de ses différentes méthodes de résolution ainsi que la présentation de la méthode TLM (Transmission Line Matrix). Ensuite une étude et calcul de taux de défaillance d'un modèle de module IGBT sera entamée.

III.2 Equation de la chaleur

III.2.1 Principe et Equation de chaleur

Deux corps à températures différentes échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à disparition complète de leur différence de températures. Cet échange peut se faire suivant trois modes de transmission fondamentaux: la conduction, la convection et le rayonnement. On s'intéresse dans cette étude particulièrement au premier mode.

Le phénomène de conduction pure se rencontre essentiellement dans les solides. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps se fait suivant deux mécanismes distincts : une transmission par vibrations des atomes ou molécules et une transmission par électrons libres. L'importance relative de chacun des deux mécanismes dépend évidemment de la nature du corps [16], [42]. L'équation de base de la conduction est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.1})$$

Ou encore:

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

Ou le signe(-) indiquait que le sens de la diffusion, α est le facteur de diffusivité, T la température et t le temps.

III.2.2 Différentes méthodes de résolution de l'équation de chaleur

La résolution de l'équation de chaleur est étudiée depuis fort longtemps mais trouver une technique ou un outil d'aide à la conception simple et efficace, est toujours d'actualité. Des méthodes numériques de modélisation basées sur les différences finies ou les éléments finis existent mais sont incomplètes ou complexes. La solution analytique des fois n'existe pas pour des systèmes complexes. Les méthodes analogiques sont une alternative intéressante car le sens physique est maintenu [43].

III.2.2.1 Solutions Analytiques

Plusieurs méthodes analytiques pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur ont été développées, chacun possédant des caractéristiques particulières avantageuses suivant les types particuliers de problèmes à résoudre. Les méthodes les plus utilisées sont [44] :

- **Méthode utilisant les séries de Fourier** : Cette méthode a trouvé une popularité considérable pour le cas de circuits intégrés, hybride, et les modules électroniques intégrant des systèmes de refroidissement de chaleur au cours des dernières décennies. Cette méthode FSM est un outil très utile pour la prédiction facile de structures planes et simples.
- **Méthode de transformation**: Elle est basée sur l'utilisation de la forte similitude mathématique de l'équation de Laplace pour le problème thermique multicouche à l'état stationnaire [36]. Cette méthode de transformation (TM) permet d'éliminer les coordonnées x , y et t et transforme l'équation de la chaleur en une équation différentielle classique ne dépendant que de la variable z et les transformations requises sont effectuées à l'aide d'algorithmes de transformée de Fourier. Pour cela, seules les structures simples peuvent être facilement décrites.
- **Méthode du Modèle Compact**: Un modèle compact (CM) est un réseau de résistance thermique simple contenant pas plus de dix ou vingt nœuds. Le CM a été utilisé pour prédire la température d'un dispositif électronique en boîtier. La plupart des documents présentés ont discuté de l'utilisation de ce modèle pour l'analyse de la performance thermique [37], [35]. Cependant, la résistance à la CM n'est pas la vraie résistance thermique, et la forme de la CM ne reflète pas les grandes voies d'écoulement de la chaleur dans les boîtiers.
- **Méthode de séparation des variables** : Elle constitue l'une des méthodes importantes de la résolution des équations différentielles ceci en réécrivant les équations de formes de deux variables distinctes et indépendantes. Elle est plus pratique à appliquer en dimensions finies.

Les solutions analytiques de l'équation de transfert de chaleur ne peuvent être obtenues sans hypothèses simplificatrices pour la géométrie, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites. Pour l'analyse thermique de problèmes pratiques, de telles simplifications ne sont pas généralement possibles. Par conséquent, les méthodes numériques avec la flexibilité dans le traitement des géométries complexes font une approche idéale pour la solution de ces problèmes de transfert de chaleur.

III.2.2.2 Solutions numériques

La modélisation numérique offre la possibilité d'obtenir des résultats précis en donnant une analyse des systèmes complexes ou les techniques d'analyse et de mesure n'existaient même pas. Plusieurs méthodes de modélisation numérique pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur ont été développés tels que :

a- Les modèles numériques

Les méthodes numériques sont devenues un outil important pour simuler le comportement thermique des systèmes électroniques. De nombreuses méthodes ont été utilisées [39], [40], On citera :

- **Méthodes des différences finies** :Le principe de cette méthode consiste en une discrétisation du domaine de définition des variables espace et temps. L'équation de la chaleur est alors appliquée aux nœuds sous sa forme discrète. Il en découle un système d'équations algébriques (souvent formé d'un grand nombre d'équations) qu'il faut résoudre par des logiciels informatique [46].
- **Méthodes des éléments finis** :La méthode des différences finies remplace l'équation différentielle par une équation aux différences par approximation algébrique. Elle est mieux s'adapter aux formes irrégulières, et d'autre part aux problèmes où les conditions aux limites sont pas constantes.
- **Éléments de frontières** :Une alternative aux méthodes basées sur les éléments finis consiste à considérer des domaines délimités par des surfaces fermées dans lesquelles on résout l'équation de diffusion de la chaleur, en imposant les conditions de frontière prescrites du problème, un système d'équation algébrique linéaire est alors obtenu. La solution de ce système d'équations peut être trouvée en utilisant des méthodes directes ou itératives. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que le calcul en régime dynamique est plus compliqué que les deux autres méthodes.

b- Méthodes dynamique des fluides

Au cours des dernières années, la méthode CFD (Computational Fluid Dynamics) a été développée pour prévoir les températures des appareils électroniques et des interactions de transfert de chaleur en circuits. Cependant, une grande variabilité dans la longueur des échelles exigent un temps de calcul énorme et les simulations CFD exigent également une connaissance en informatique pour utiliser le logiciel.

III.2.2.3 Solutions électrothermiques

L'utilisation de solutions électrothermiques pour résoudre les problèmes de chaleur ont été développés tels que, [45]:

a- Méthode directe (Fully Coupled Method):

Cette méthode est basée sur la modélisation du comportement des circuits électroniques par un seul outil de simulation spécifique. La simulation peut être traitée par circuits et systèmes simulateurs comme Saber, ELDO ou Spectre. Le problème de cette méthode est dans la complexité des modèles à simuler.

b- Méthode de relaxation :

Cette méthode de relaxation a été basée sur le couplage de l'effet thermique avec le simulateur de circuits électriques. Les simulateurs devraient avoir fixés à recevoir et à envoyer des valeurs calculées à un autre simulateur de sauvegarde de données. Par conséquent, l'arrière-plan mathématique du mécanisme de couplage est nécessaire.

II.2.2.4 Méthodes de Mesures de température Pratiques

Les méthodes de mesures pratiques de température se basent sur la détermination de l'impédance thermique. Cette technique nécessite la connaissance précise des caractéristiques de fonctionnement électrique du module électronique spécifié et ne fournit aucune information sur la distribution de la température sur ses régions actives. Cette méthode présente de graves inconvénients celle de dépasser la puissance maximale de fonctionnement du dispositif lui-même et elle nécessite à chaque test une excitation d'impulsions différentes de chaleur et son refroidissement à la température ambiante. Une des techniques la plus utilisée est l'infrarouge (IR) microscope [47].

III.3 Modélisation numérique de l'équation de chaleur

III.3.1 Introduction

La modélisation numérique est la représentation des systèmes physiques en petites modèles spécifiques qui sont obtenus souvent par des méthodes numériques lorsque les solutions analytiques n'existent pas. Les méthodes de résolution numériques sont des méthodes approximatives qu'on utilise très souvent pour solutionner les différents problèmes physiques. La modélisation numérique offre la possibilité d'obtenir des résultats précis pour les systèmes complexes sans les problèmes des techniques d'analyse et de mesures pratiques. Plusieurs méthodes de modélisation numérique pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur ont été développées [48]:

- **La méthode de différence finie dans le domaine temporel (FDTD) :** C'est une méthode utilisée en modélisation électromagnétique, car il s'agit d'une technique dans le domaine temporel où les équations de Maxwell sont modifiées à des équations centrales de différence.
- **Circuit équivalent de l'élément partiel (PEEC) :** PEEC est une approche plus souple et flexible pour la manipulation de la nature hybride de l'électronique intégrée. Contrairement à d'autres méthodes, PEEC facilite l'intégration transparente des simulateurs de circuits traditionnels avec des outils d'analyse électromagnétiques. Ainsi, PEEC est utilisée pour modéliser des géométries tridimensionnelles.
- **La méthode des moments (MoM) :** C'est une technique qui est couramment utilisée pour analyser les structures d'antennes, car elle modélise que la structure métallique et non l'espace autour de lui. Cependant, il est également utilisé dans d'autres applications électromagnétiques.
- **La méthode de ligne de transmissions (TLM) :** C'est une technique numérique appropriée pour résoudre les problèmes électromagnétiques, mais elle peut également être appliquée à des problèmes thermiques ou de diffusion, ainsi que l'acoustique. Son approche de base est d'obtenir un modèle discret, qui est ensuite résolu exactement par calcul numérique. La méthode de modélisation par ligne de transmissions revient à remplacer chaque bout du matériau (appelé nœud aussi) par une ligne de transmission soumise aux effets de dispersion et de réflexion d'impulsions classiques et détecter ainsi la valeur et la position des nœuds chauds dans les composants électroniques. La TLM (Transmission Line Matrix) a un certain nombre de caractéristiques qui la rendent idéale pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur [49]:
 - La méthode est exprimée en termes de circuits électriques qui sont familiers à l'ingénieur,
 - Les deux environnements internes et externes peuvent être modélisés simultanément,
 - L'étude des formes complexes peut être incluse et les propriétés des matériaux non homogènes peuvent être introduites,
 - Les régions de source de chaleur peuvent être représentées et le sens de la nature physique du modèle à géométrie complexe, est conservé.

III.3.2 La Méthode TLM

La propagation de la chaleur est prédite par la résolution de l'équation de diffusion mais pour une structure réelle, elle peut souvent être très difficile. La méthode

de Ligne de Transmission de Johns avait été utilisée avec succès pour modéliser le comportement thermique des diodes Punch through, après elle a été utilisée presque exclusivement par plusieurs chercheurs pour résoudre les différents problèmes de diffusion et de propagations d'ondes. La méthode TLM est inconditionnellement stable, elle a un grand intérêt dans la résolution des problèmes non linéaires avec une géométrie compliquée d'une part, et a un niveau considérable dans la simulation et la conception thermique des composants, pour prévenir leur fiabilité en présence de phénomènes divers soit un courant à grande intensité, soit une tension très élevée, soit une haute impulsion de chaleur [50].

Nous allons appliquer la méthode TLM pour la modélisation de la diffusion thermique dans les composants d'électroniques: les IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) utilisés en commutation de tensions et de courants très élevés.

III.3.2.1 Principe de la méthode TLM

Une impulsion électrique dans réseau de lignes de transmission obéit à l'équation de propagation d'ondes de Maxwell [51]:

$$\nabla^2 \Phi = A R_d C_d \frac{\partial \Phi}{\partial t} + B L_d C_d \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (III.3)$$

Avec Φ le potentiel, R_d , C_d et L_d sont les résistances, capacités et inductances distribuées par lignes respectivement. A et B sont des constantes. Si le premier terme de l'équation (III.3) domine le second terme, alors on a l'équation de diffusion décrite par:

$$\nabla \cdot (K_t(T) \nabla T(x, y, z, t)) = \rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (III.4)$$

où C_p est la capacité calorifique, ρ la densité et le K_t est la conductivité. Nous avons une analogie: Le potentiel est équivalent à la température et le courant au flux de chaleur. Par conséquent, le système est divisé alors en petits volumes unitaires. Chaque élément est représenté par un nœud qui représente une unité de ligne transmissions. La Figure III.1 présente le circuit équivalent du model d'un nœud de TLM et la Figure.III.2 illustre le cas 3D ou les résistances restent groupées autour du nœud. L'inductance et la capacité sont remplacées par l'impédance Z, qui relie chaque nœud à ses voisins. Selon la théorie fondamentale de lignes de transmission, l'impédance ligne est exprimée par :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{a \Delta t}{C} = \frac{L}{a \Delta t} \quad (III.5)$$

Avec C la capacité, L inductance, a est la dimension choisie.

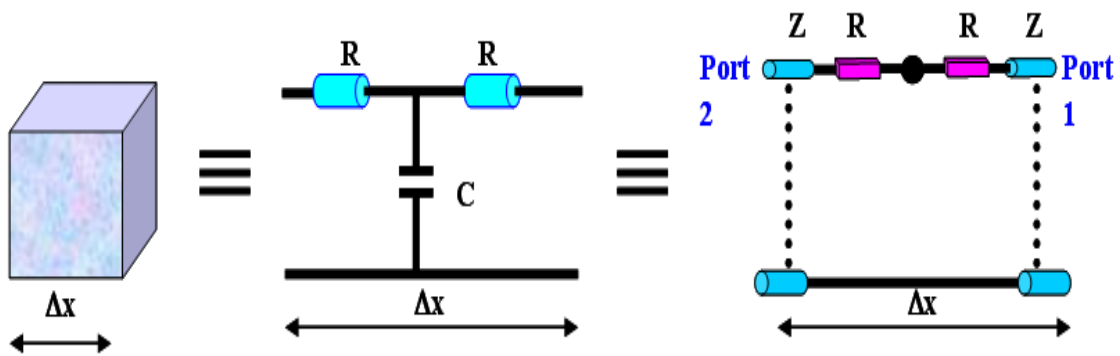


Figure III.1 Circuit équivalent du model d'un nœud

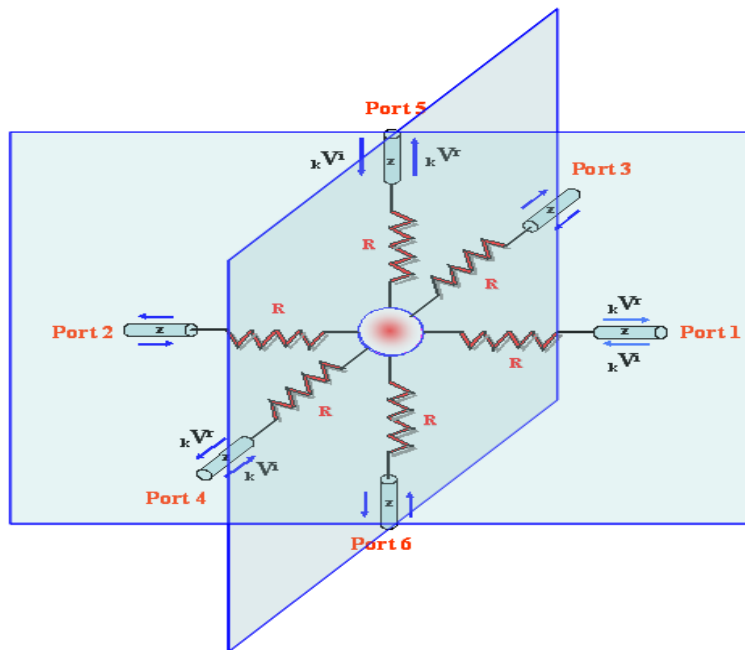


Figure III.2 Représentation d'un nœud TLM-3D

III.3.2.2 Procédure Numérique de la méthode TLM

La procédure numérique à mettre en place consiste à calculer, à chaque itération, l'intensité des impulsions incidentes sur un nœud donné pour déterminer la valeur de la

grandeur physique en ce point et ensuite calculer l'intensité des impulsions réfléchies en vue de préparer la prochaine itération. On doit alors suivre les étapes suivantes :

➤ **Les températures nodales :**

À chaque nœud N, la température est calculée à partir des impulsions incidentes ${}^k V_j^i(N)$. L'indice j indique sur quelle ligne de transmissions l'impulsion y est. Pour un nœud tridimensionnel (Figure III.2), la température nodale est [51] :

$${}^k V(N) = \left[\frac{2({}^k V_1^i + {}^k V_2^i)}{R_x + Z} + \frac{2({}^k V_3^i + {}^k V_4^i)}{R_y + Z} + \frac{2({}^k V_5^i + {}^k V_6^i)}{R_z + Z} \right] \frac{1}{Y} \quad (\text{III.6})$$

Avec
$$Y = \frac{2}{R_x + Z} + \frac{2}{R_y + Z} + \frac{2}{R_z + Z}$$

➤ **Les impulsions réfléchies :**

Les impulsions réfléchies ${}^k V_j^r(N)$ sont calculés selon :

$${}^k V_{1,2}^r = \frac{1}{R_x + Z} [Z {}^k V + (R_x - Z) V_{1,2}^i] \quad (\text{III.7})$$

$${}^k V_{3,4}^r = \frac{1}{R_y + Z} [Z {}^k V + (R_y - Z) V_{3,4}^i] \quad (\text{III.8})$$

$${}^k V_{5,6}^r = \frac{1}{R_z + Z} [Z {}^k V + (R_z - Z) V_{5,6}^i] \quad (\text{III.9})$$

➤ **Les impulsions incidentes :**

Les impulsions incidentes sont calculées par celles réfléchies à l'étape précédente. A l'itération (k+1), on a:

$${}_{k+1}V_j^i(x, y, z) = \Gamma_{j,k} V_j^r(x, y, z) + (1 - \Gamma_{j,k}) V_{j'}^r(u, v, w) \quad (\text{III.10})$$

où (x, y, z) sont les coordonnées du nœud N et le Γ est le coefficient de réflexion dans la direction (j) donnée par :

$$\Gamma_j = \frac{Z(u, v, w) - Z(x, y, z)}{Z(u, v, w) + Z(x, y, z)} \quad (\text{III.11})$$

Les valeurs correspondantes de j' , j , u , v et w pour $j=1, 2, \dots$ pour les équations (III.10) et (III.11) sont mentionnées en Tableau III.1

J	j'	U	v	W
1	2	x-1	y	z
2	1	x+1	y	z
3	4	X	y-1	z
4	3	X	y+1	z
5	6	X	y	z-1
6	5	X	y	z+1

Tableau III.1 Les valeurs de $j, j', u, v, \text{ et } w$ utilisées dans les équations (III.10) et (III.11).

L'exécution d'une itération TLM consiste seulement à répéter les équations de (III.6) à (III.11).

Conditions aux limites :

Les coefficients de réflexions sont alors égales à l'unité ($\Gamma_j=1$). Cette condition implique que les impulsions incidentes aux extrémités du réseau TLM seront réfléchies avec la même amplitude et dans le même sens. On aura donc [52]:

$$\begin{aligned}
 T_1^i(1, y, z) &= T_1^r(1, y, z) \\
 T_2^i(N_x, y, z) &= T_2^r(N_x, y, z) \\
 T_3^i(x, 1, z) &= T_3^r(x, 1, z) \\
 T_4^i(x, N_y, z) &= T_4^r(x, N_y, z) \\
 T_5^i(x, y, 1) &= T_5^r(x, y, 1) \\
 T_6^i(x, y, N_z) &= T_6^r(x, y, N_z)
 \end{aligned}
 \tag{III.12}$$

Avec N_x , N_y et N_z le nombre de nœuds pour les trois directions X, Y et Z respectivement. Figure III.3 illustre une présentation de conditions aux limites en modélisation TLM.

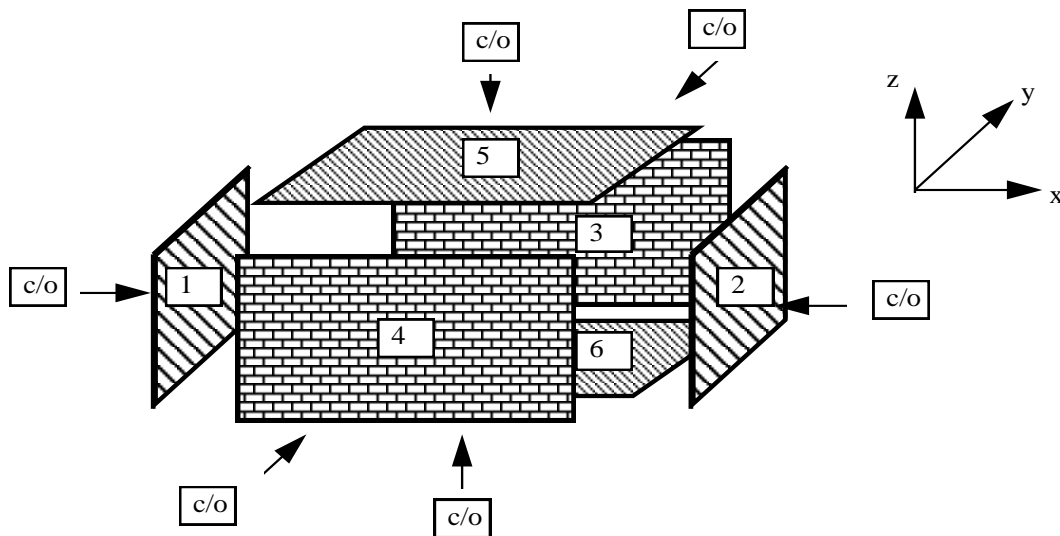


Figure III.3 Conditions aux limites

Une analyse unidimensionnelle et tridimensionnelle par TLM sera présentée pour étudier l'effet d'auto échauffement dans les dispositifs IGBT. Il est évident que la dissipation de la chaleur interne a une importance capitale sur la dérive des propriétés électriques, d'une part, et la conception géométrique du circuit intégré, d'autre part. La présence de champs électriques intenses à certains endroits du composant comme la région active ou les rebords géométriques conduit à l'apparition de points chauds destructeurs si les matériaux semi-conducteurs ne dissipent pas assez rapidement cette

chaleur d'où naissance d'une défaillance plus tard à long terme de fonctionnement de ce module de puissance.

III.4 Modélisation de l'effet thermique dans un IGBT

III.4.1 Introduction

De nos jours, les systèmes modulaires sont plus admis en électronique de puissance en tant que composant à haute commutation de puissance et haute tensions mais la réduction de dimensions de ces modules conduit à l'apparition de problèmes thermiques surtout après l'émergence des composants de puissance GTO, IGBT, etc....

Tout au long de ce paragraphe consacré aux aspects thermiques du module de puissance, nous allons essayer de fixer et de déterminer de manière précise la température maximale admissible pour une puce IGBT. Cette détermination a nécessité de s'intéresser à tous les éléments de la chaîne de transfert thermique : du système de refroidissement (dimensionnement), au packaging du module IGBT, jusqu'à la puce.

III.4.2 Comportant thermique de l'IGBT comme unité module

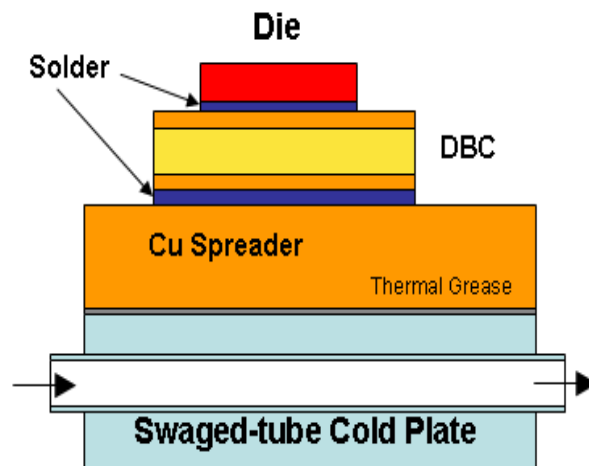
Dans plusieurs applications industrielles, on est souvent préoccupé d'avoir une alimentation stable et réglable. Cette tension peut être obtenue au moyens des onduleurs qui éliminent les fluctuations de la tension continue d'entrée, en maintenant la relation tension / fréquence constante tout en réglant l'amplitude de la tension requise par la charge. Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple : variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues (UPS). De façon générale, les onduleurs peuvent être classifiés en deux types : les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés. Chaque groupe peut utiliser les dispositifs de commande comme : BJT, MOSFET, IGBT,... ou commande forcée des thyristors en fonction des applications.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour obtenir cette tension et la MLI (modulation en largeur d'impulsion) est l'une des plus efficaces. En plus de régler l'amplitude, cette méthode contrôle le contenu harmonique de la tension de sortie de l'onduleur en repoussant les harmoniques d'ordre inférieur vers les fréquences les plus élevées, ce qui rend le filtrage plus facile et moins coûteux, car la taille des composantes du filtre, est assez réduite.

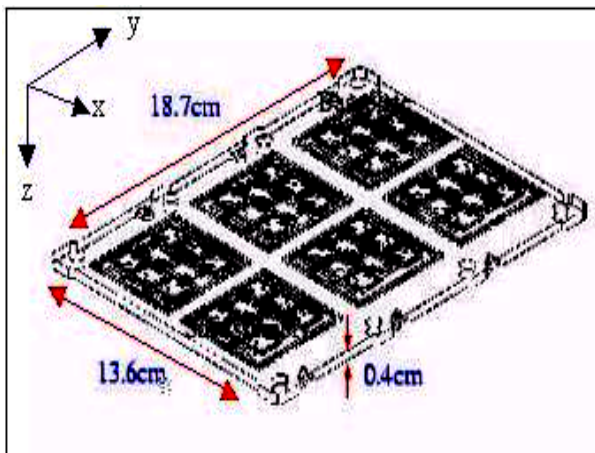
Un des grands soucis de l'électronique de puissance actuel est la performance thermique des IGBTs. Il y a deux facteurs principaux qui l'affectent. Le premier facteur est le coefficient de dilatation thermique (CTE) des différents matériaux. Le deuxième facteur est la conductivité thermique car il est indispensable que la chaleur générée au

cours du fonctionnement du composant soit absorbée aussi rapidement et efficacement que possible.

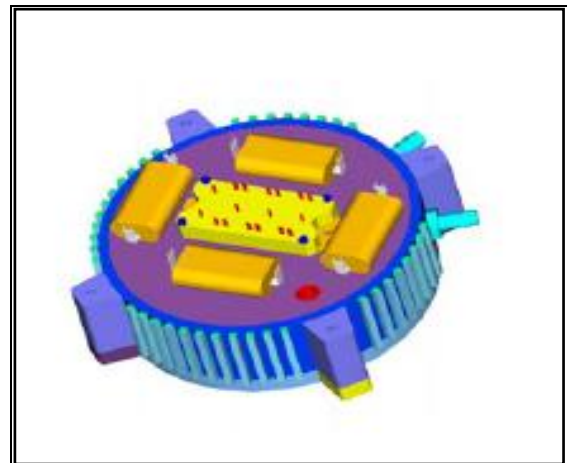
La Figure III.4 présente un modèle de module de puissance IGBT, ainsi que les matériaux physiques constituant l'IGBT comme unité module. Le composant IGBT offre une faible conduction et des pertes importantes de commutation résultante du rendement de l'onduleur comme système lui-même [53].



(a)



(b)



(c)

Figure III.4 Le modèle du module de puissance

(a) les matériaux physiques constituaient l'IGBT.

(b) la structure schématique d'un module IGBT.

(c) montage physique du module IGBT sur la plaque du moteur.

Notre module IGBT est composé de différents matériaux soit le Si, Cu, les MMC et la céramique. Ceci fournit la combinaison unique des propriétés dans des applications récentes de technologie [8]. Au début, nous avons fait la simulation TLM pour le IGBT power module avec AlN DBC comme substrat et Cu comme base plate. Le Tableau III.2 Propriétés thermiques des matériaux utilisés.

matériaux	CTE (ppm/K)	K_t (W/mK)	Diffusivité thermique (m^2 / s)
<i>ALN</i>	3.0-4.1	170	7.8×10^{-5}
<i>AlSiC</i>	12.6	180	8.4×10^{-5}
<i>BeO</i>	6.8	270	8.0×10^{-5}
<i>Copper</i>	17	393	1.5×10^{-4}
<i>Cu-Mo</i>	7.2	197	2.9×10^{-5}
<i>Graphite-Cu</i>	2.0	356	1.2×10^{-4}
<i>Diamond</i>	0.8-2.0	1000-2000	4.5×10^{-4} - 9×10^{-4}

Tableau III.2 Propriétés thermiques des matériaux utilisés

Les élévations de la température sont calculées en utilisant TLM. Pour toutes les simulations, des programmes seront élaborés par le Logiciel MATLAB afin d'évaluer la température à chaque nœud dans le dispositif comme fonction de temps. Les premières simulations sont présentées en Figure III.5. Nous avons remarqué que presque toute la chaleur produite dans la région active se diffuse par le substrat.

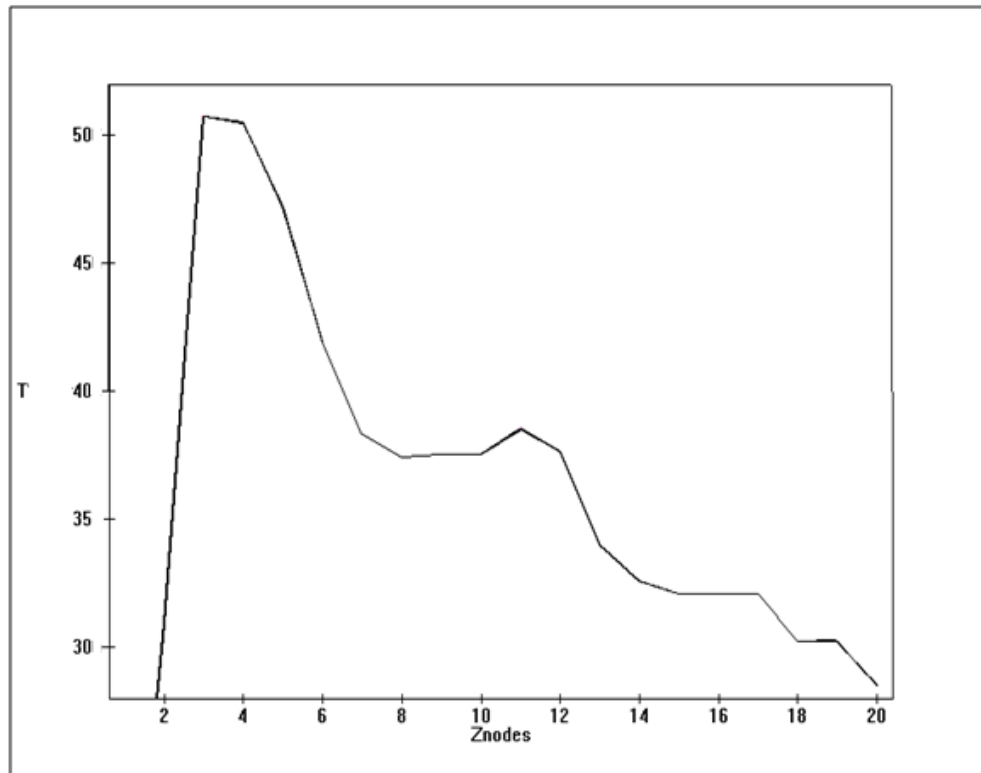
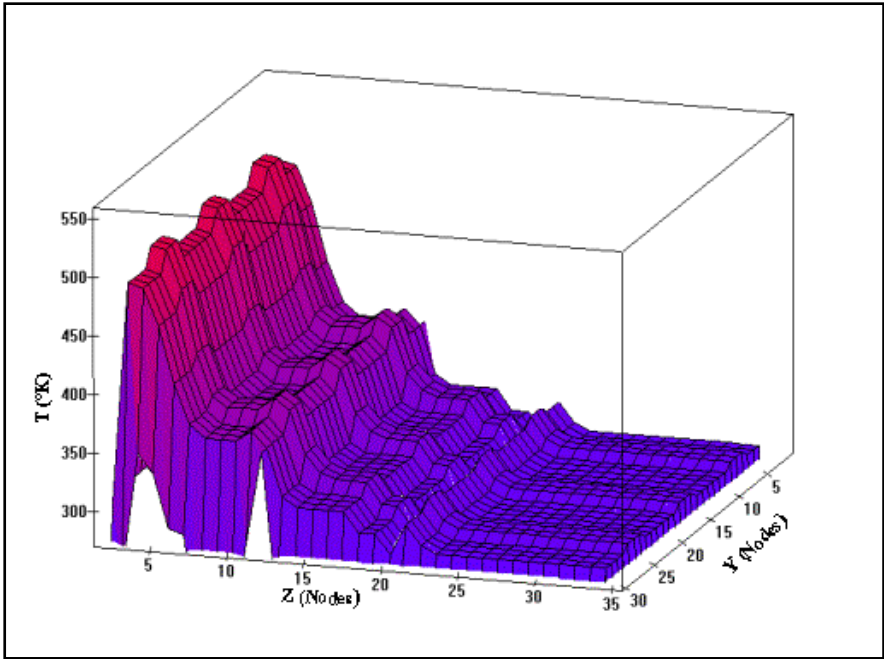
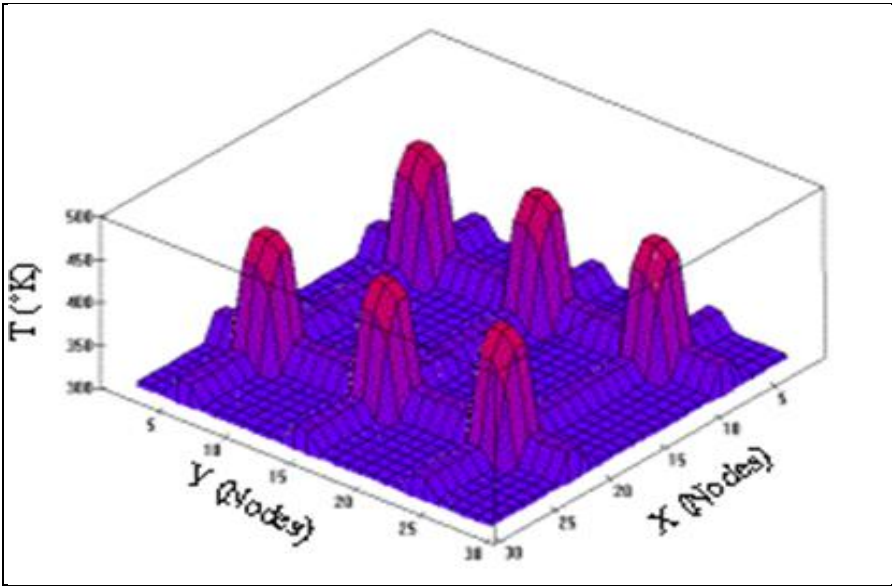


Figure III.5 Evolution de la température suivant l'axe Z

Les Figures III.5 et III.6 illustrent l'application de la méthode TLM à la modélisation de la diffusion thermique, aussi bien pour le cas unidimensionnel que tridimensionnel, pour un module de puissance de 24 composants (Figure III.4.b) mais vue la symétrie on considère pour la simulation que la quart constitué de 6 unités IGBT ou on considère que l'évolution de la propagation de la chaleur se fait principalement au top du module c'est-à-dire au niveau de la couche Si comme semi-conducteur.



(a)



(b)

Figure III.6 Evolution de la diffusion de la température du module IGBT.

(a) suivant l'axe YZ.

(b) Suivant l'axe XY.

D'après ces résultats, on déduit que:

- La température maximale est localisée au niveau du semi conducteur Si et la plaque supérieure (Top plate).
- La température diminue aux régions inter unités ainsi l'importance de la distance inter unité IGBT dans la dissipation du flux thermique.
- Le substrat en céramique et la base plate agissent comme diffuseurs de température. Les résultats de simulation montrent l'importance de la céramique pour la dissipation du flux thermique au niveau des sources de chaleur localisées dans le module IGBT.
- On remarque l'augmentation de la température au niveau de la soudure. Ainsi, le choix d'une couche de soudure mince sous les dispositifs de silicium est avantageux. Utilisation de la graisse (contact physique entre les composants et l'interface), est nécessaire pour le transfert thermique. Mais cette interface est défaillance puisque on remarque une coupure de diffusion de température.

Notre module est en limite de défaillances sous la contrainte de l'élévation de température d'où l'étude de sa fiabilité est d'une importance primordiale.

III.4.2.1 Comportant thermique du module IGBT en mode MLI

Quand on veut faire varier la vitesse d'un moteur (modules IGBTs insérés), la première idée qui vient à l'esprit est de faire varier la tension aux bornes du moteur mais on constate que pour des valeurs faibles de la tension, le moteur ne tourne pas. Le moteur demande une tension minimale pour démarrer. Si cette dernière est trop basse, les forces électromagnétiques ne sont pas suffisantes pour vaincre le frottement. Il devient donc difficile d'ajuster la vitesse de façon précise. La solution à ce problème est astucieuse. Il suffit de fournir au moteur une tension qui est toujours la même soit la tension maximale. Par contre, cette tension ne sera appliquée que par très courtes périodes de temps. En ajustant la longueur de ces périodes de temps, on arrive à faire tourner plus ou moins vite les moteurs. Mieux, on remarque que la vitesse des moteurs devient proportionnelle à la longueur des périodes de temps. Contrôler la longueur des périodes passées à la tension maximale par rapport au temps passé sans application de tension (tension nulle) est donc le coeur de la solution. En réalité, cette solution est très connue en contrôle des systèmes et en électronique et elle porte le nom de PWM (Pulse Width Modulation) ou Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI).

Le PWM est un signal numérique, donc la tension peut prendre deux valeurs seulement. Le signal est carré. Le niveau bas correspond généralement à 0 Volt. La période est notée T ; la durée de l'impulsion (pour laquelle la tension est celle de l'état haut) est appelée t_h , Figure III.7.

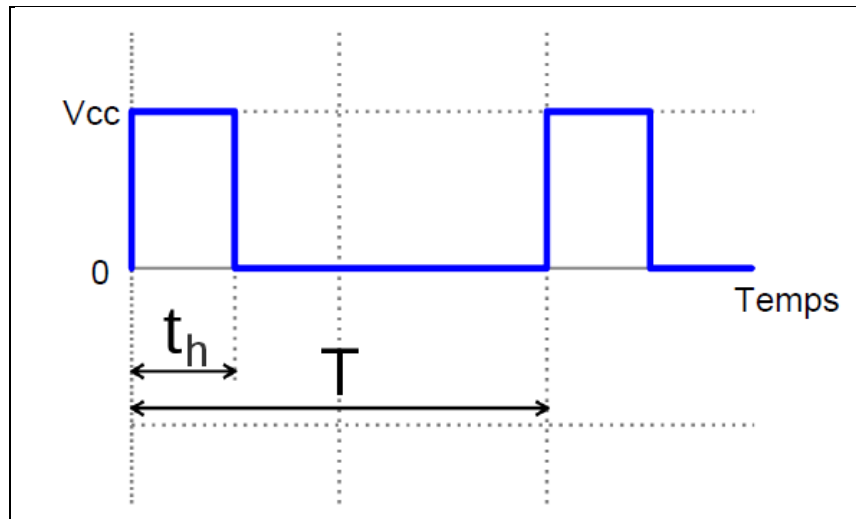


Figure III.7 Niveaux d'impulsions pris en Modulation par Largeur d'Impulsions

Ainsi, la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de commander la tension de sortie d'un onduleur en amplitude et en fréquence à partir des signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur tout en limitant l'effet des harmoniques.

L'évolution de la diffusion thermique pendant les cycles de fonctionnement est décrite par la méthode TLM. La Figure III.8 illustre l'augmentation en température en composants IGBT. Pendant le premier cycle de charge MLI, la température augmente puis descend dans le front descendant du cycle. Après trois cycles de chargement, l'élévation de température persiste. Pour les cycles suivants, la température varie quasi-périodiquement dans la même manière ainsi l'état d'équilibre doit être atteint.

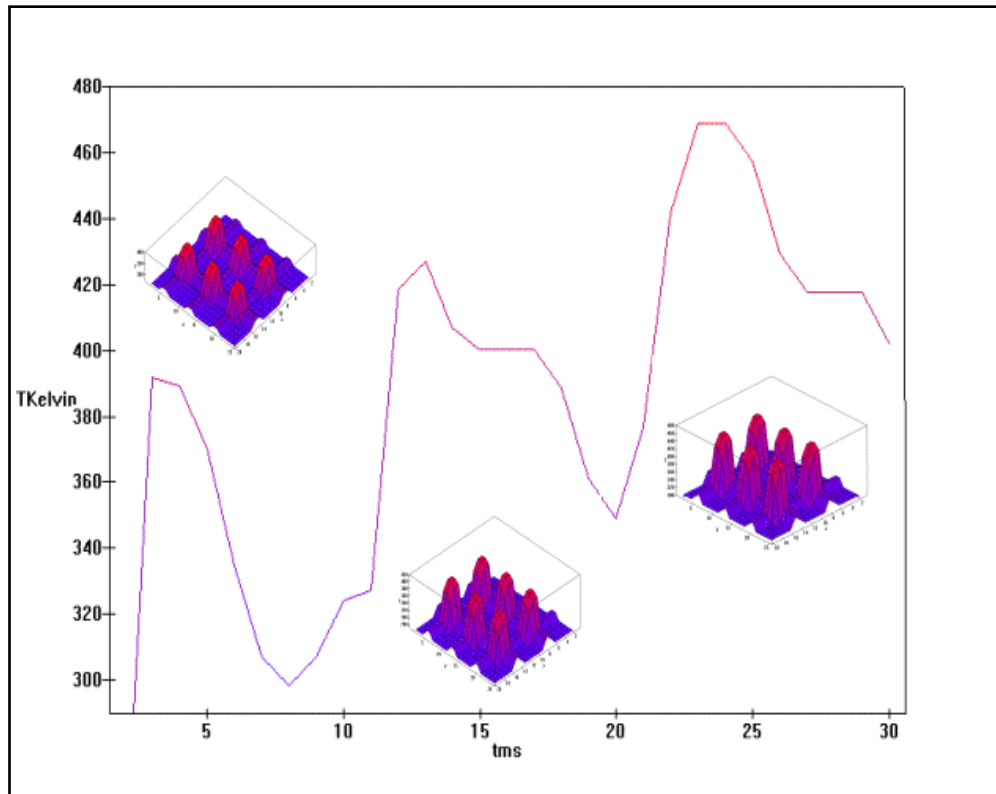


Figure III.8 Réponse dynamique du module IGBT en mode MLI

La Figure III.9 montre les réponses dynamiques de la température à un noeud dans le centre de la puce IGBT. Ces réponses dynamiques sont obtenues avec 100W puissance constante appliquée dans cette puce. Toutes les surfaces latérales sont maintenues aussi parfaitement adiabatiques, tandis que le fond de la plaque de base est supposée être maintenue à la condition limite isotherme de 300°K. Pour dans les impulsions de fonctionnement entièrement périodiques, la température oscille à la puissance tour-On-Off et tourner de temps, respectivement.

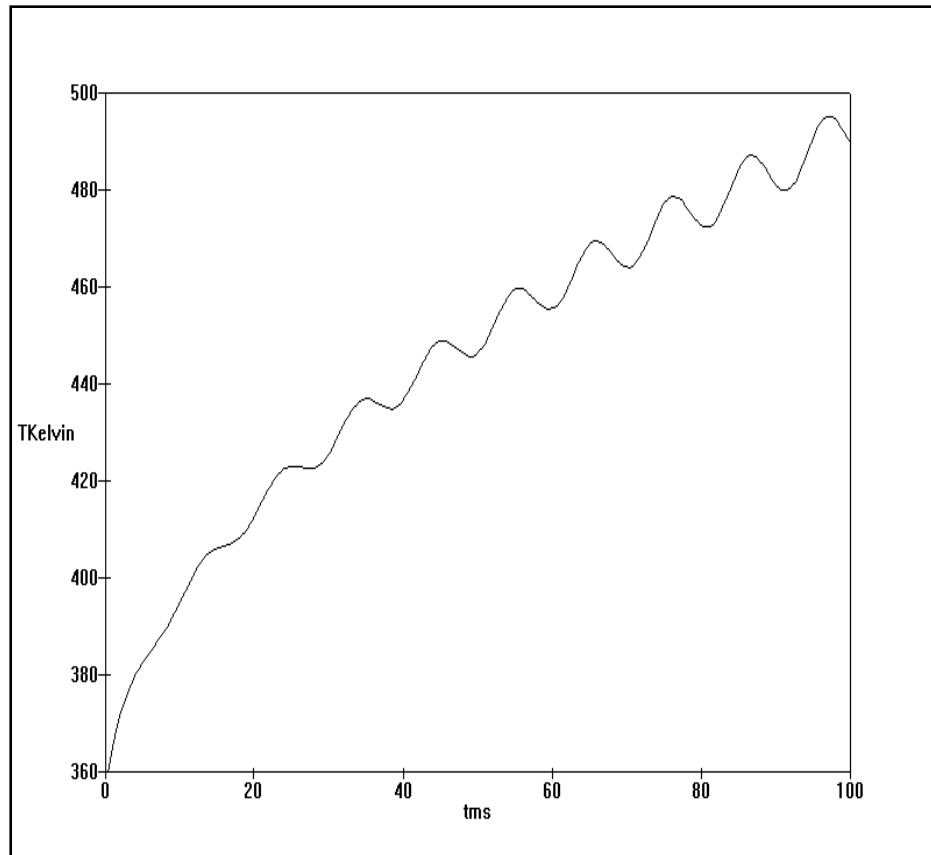


Figure III.9 Profil de diffusion de chaleur générée pour des impulsions successives appliquées au module de puissance IGBT.

Lors de la simulation, le profil de la diffusion de la chaleur est de forme exponentielle à des températures minima et maxima locaux en formes d'onde. Lorsque des impulsions se succèdent, la jonction ne peut pas refroidir à la température initiale au cours de chaque cycle, la méthode de détermination de la température maximale de jonction est complexe.

La détermination de la température maximale est très importante dans la conception de l'électronique de puissance pour caractériser l'effet impulsionnel dans les modules et systèmes électroniques.

On peut en déduire que ce module sera en limite de défaillances sous la contrainte de l'élévation de température surtout en grandes puissances [53,54], d'où l'étude de sa fiabilité est d'une importance primordiale.

III.5. Etude de Fiabilité du Module IGBT

III.5.1 Introduction

La fiabilité est un vaste domaine contribuant à la compréhension, à la modélisation et à la prédiction des mécanismes de dégradation et de vieillissement susceptibles de conduire le composant à la défaillance et le système à la panne. La connaissance des relations entre les limites physiques, les défauts intrinsèques, les imperfections technologiques et les contraintes environnementales et internes constitue la substance même de cette activité vaste et complexe. Cette connaissance exhaustive restera sans doute une utopie, mais nous devons nous en rapprocher. En attendant, la fiabilité peut toujours apporter des palliatifs : adapter les contraintes aux limites physiques, protéger le composant à l'égard d'agressions internes ou externes, ou inversement faire évoluer les composants pour les rendre plus robustes et plus tolérants à l'égard des contraintes réelles. Dans le cas des systèmes multi-composants la défaillance du système dépend de la défaillance d'un certain nombre de composants suivant la structure du système. Pour calculer la fiabilité d'un système, son taux de défaillance et son MTTF à partir des propriétés de ses composants (fiabilité, taux de défaillance et MTTF), il faut localiser les sources et les origines des défaillances dans le système.

III.5.2 Généralités d'évaluation de la fiabilité des systèmes

En fiabilité, deux types de systèmes sont à distinguer les systèmes ayant une structure élémentaire et ceux ayant une structure complexe. Une structure élémentaire contient des composants indépendants en série ou en parallèle ou toutes combinaisons possibles de ces deux cas. Un système pouvant être décomposé en plusieurs modules à structure élémentaire est considéré comme système simple ou compliqué si sa taille est très importante. À l'inverse nous parlons de systèmes complexes quand le système n'est pas constitué de structure élémentaire et si les composants ne sont pas indépendants. L'exemple suivant illustre le diagramme de fiabilité d'un système à structure élémentaire (Figure III.10) et le diagramme de fiabilité d'un système à structure complexe (Figure III.11) (dans ce cas la fonction de structure ne peut pas être factorisée). La formule générale de la fiabilité est :

$$R = e^{-\lambda t} \quad (\text{III.13})$$

Ainsi pour un taux de défaillance λ , on calcule le MTBF (Mean Time Between Failures) comme suit :

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{III.14})$$

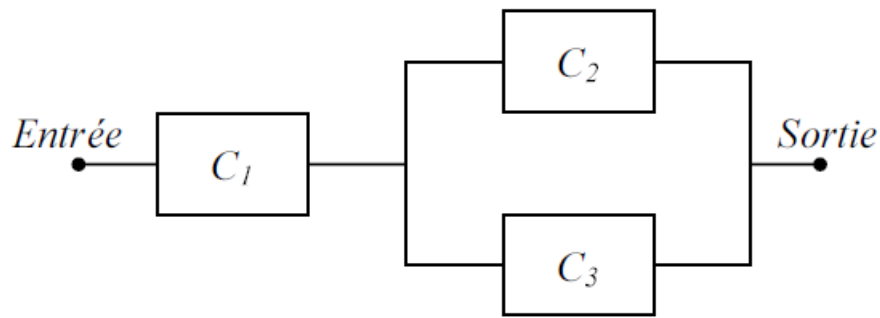


Figure III.10 Système à structure simple

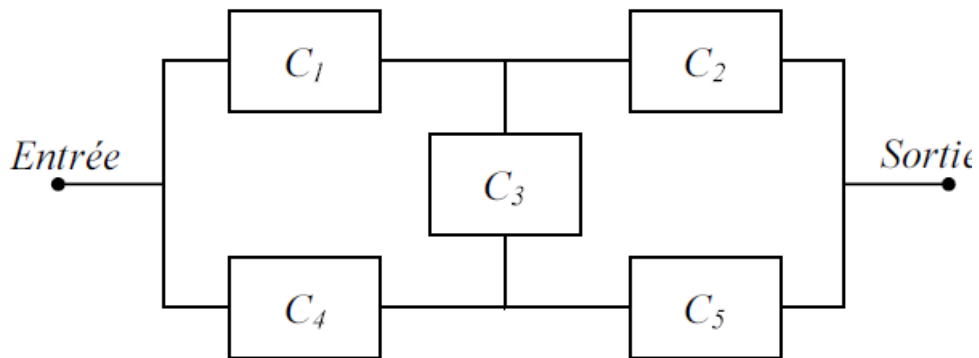
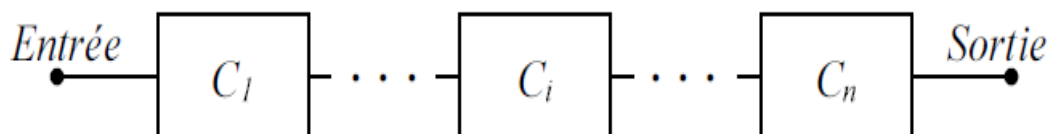


Figure III.11 Système à structure complexe

Pour exprimer la fiabilité du système, dans ce qui suit notée $R_{\text{sys}}(t)$, en fonction des fiabilités de ses composants $R_i(t)$, nous utiliserons les diagrammes de fiabilité.

a. Composants en série :

Soit un système S constitué de n composants C_i en série, $i = 1 \dots n$, Figure III.12.

Figure III.12 Système avec n composants en séries

➤ **La fiabilité du système est :**

$$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (III.15)$$

Avec $R_i(t)$ la fiabilité du composant C_i .

➤ **Le taux de défaillance du système est :**

$$\lambda_{sys} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (III.16)$$

Avec λ_i le taux de défaillance du composant C_i .

➤ **Le temps moyen de non défaillance est :**

$$MTBF_{sys} = \frac{1}{\lambda_{sys}} \quad (III.17)$$

b. Composants en parallèle :

Soit un système S constitué de n composants C_i en parallèle, Figure III.13.

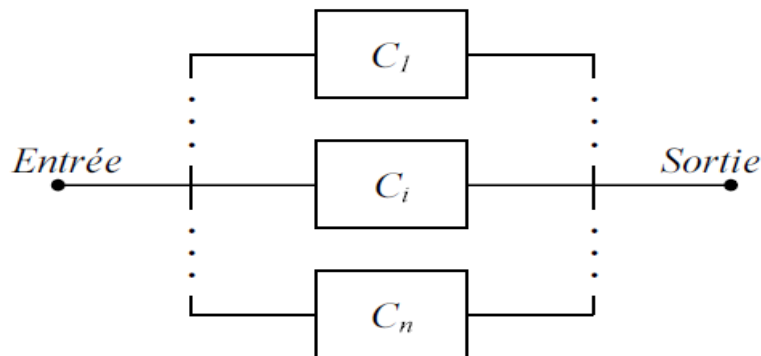


Figure III.13 Système avec n composants en parallèles

➤ **La fiabilité du système est :**

$$R_{sys}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (III.18)$$

Avec $R_i(t)$ la fiabilité du composant C_i .

➤ **Le temps moyen de non défaillance est :**

$$MTBF_{sys} = MTBF \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \quad (III.19)$$

Dans cette partie nous avons exposé les paramètres et indicateurs permettant de caractériser la fiabilité d'un système. Nous avons rappelé la différence entre une structure élémentaire ou simple et une structure complexe. L'évaluation de la fiabilité d'un système à partir de fiabilités de ses composants interconnectés en série et en parallèle est décrite à partir d'une méthode de diagramme de fiabilité.

III.5.3 Variations de la fiabilité

La variation temporelle de la fiabilité d'un système à partir de fiabilités de ses composants interconnectés en série et en parallèle est décrite à partir d'une méthode de diagramme de fiabilité.

a. Variation de la fiabilité pour assemblage série du système

La Figure III.14 illustre l'évolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage en série. Le temps moyen pris pour évaluer la fiabilité est 20 ans (durée de fonctionnement normal des dispositifs en général). On remarque une décroissance de fiabilité dès les premières années ceci suivant le taux de défaillance λ des systèmes.

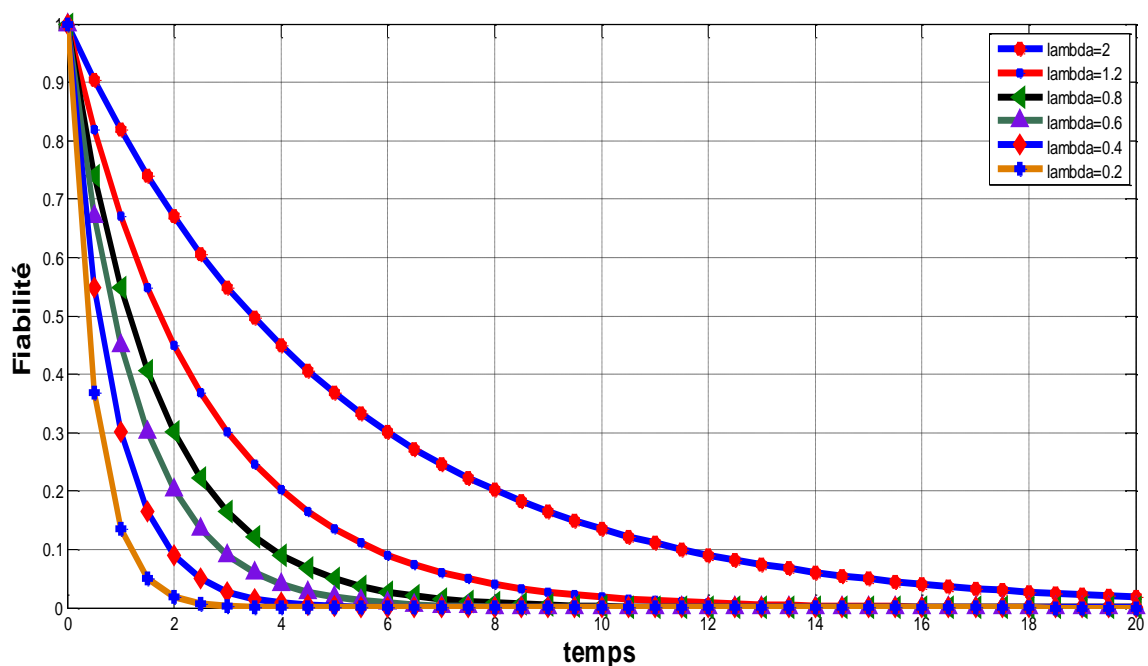


Figure III.14 Evolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage en série.

b. Variation de la fiabilité pour assemblage en parallèle du système

La Figure III.15 illustre l'évolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage en parallèle. Le temps moyen pris pour évaluer la fiabilité est 20 ans (durée de fonctionnement normal des dispositifs en général). On remarque une décroissance de fiabilité rapide les premiers quatre années. Un assemblage pur parallèle des sous systèmes est donc déconseillé pour la conception totale des systèmes électroniques.

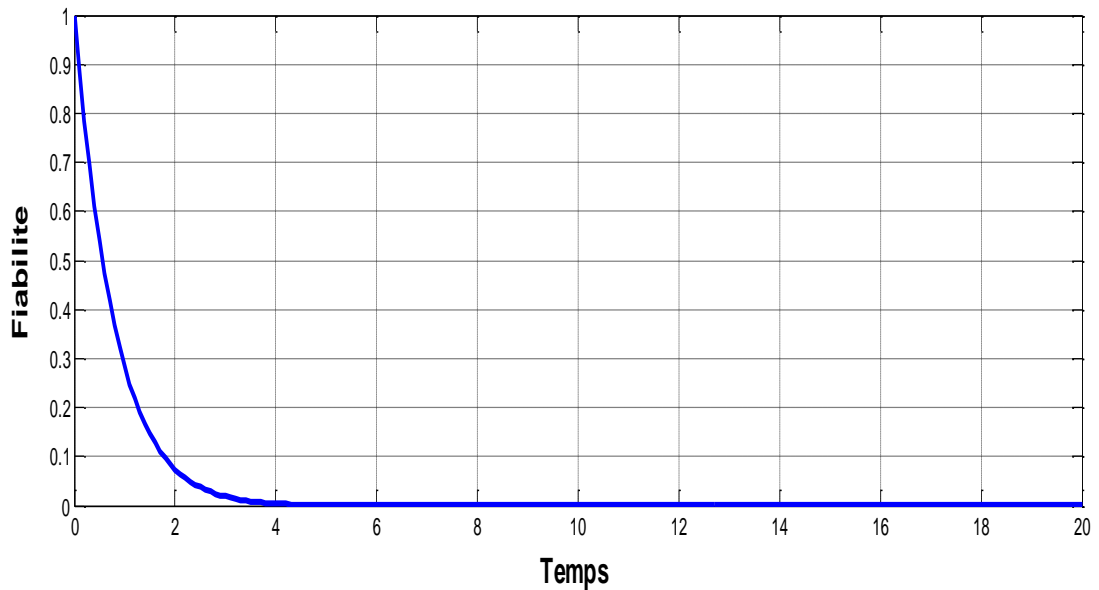


Figure III.15 Evolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage parallèle

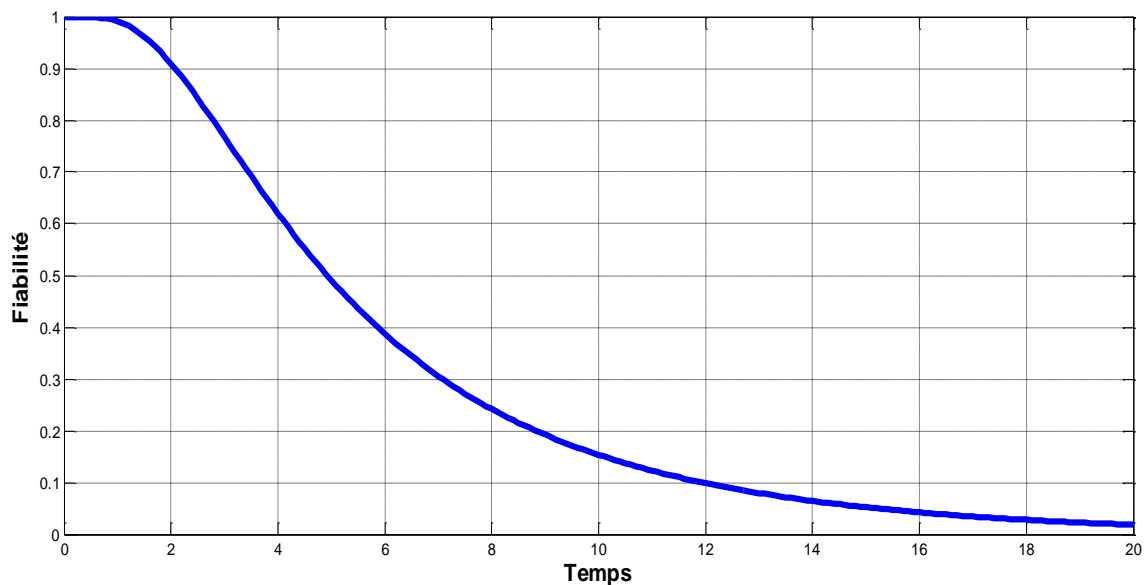
c. Variation de la fiabilité pour assemblage en série/ parallèle du système

Figure III.16 Evolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage mixte (parallèle/série).

La Figure III.16 illustre l'évolution temporelle de la fiabilité du système à assemblage en mixte. Le temps moyen pris pour évaluer la fiabilité est 20 ans (durée de fonctionnement normal des dispositifs en général). On remarque que cette figure se subdivise en trois parties. La fiabilité reste bien maintenue pendant deux premiers puis commence à se dégrader à partir de la cinquième année ensuite une décroissance de fiabilité rapide pour les autres années. Un assemblage mixte des sous systèmes est donc favorable pour la conception totale des systèmes électroniques.

d. Comparaison de différentes configurations

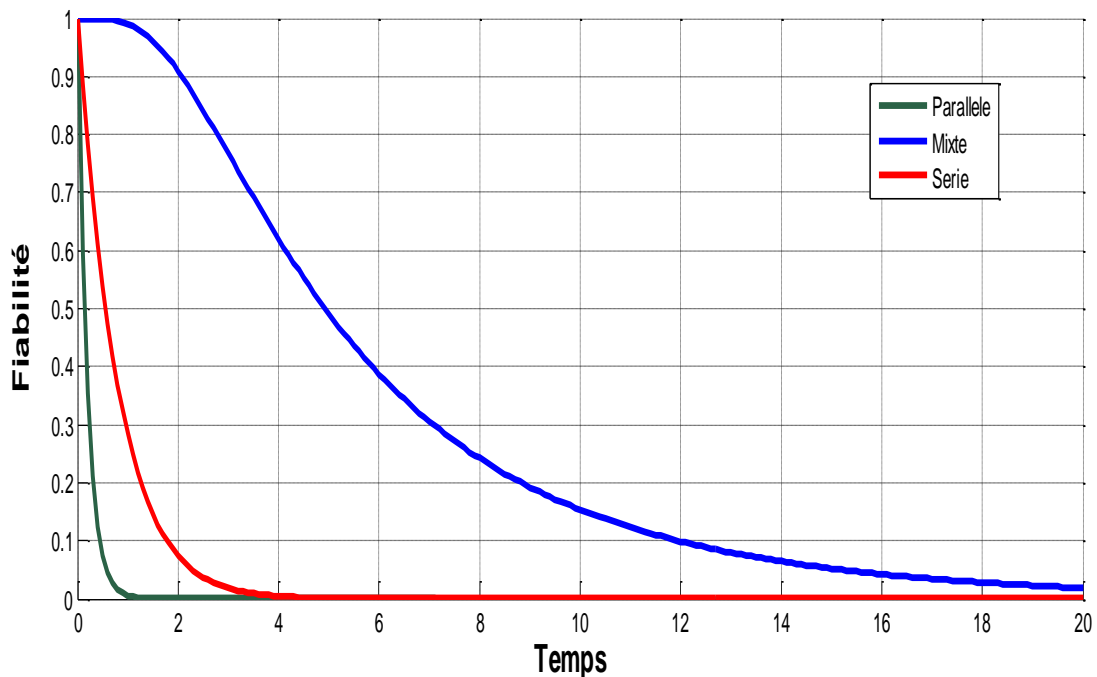


Figure III.17 Comparaison de différentes configurations

La Figure III.17 illustre la comparaison entre les différentes configurations série, parallèle et mixte. On note que la configuration mixte est la meilleure configuration possible pour maintenir la fiabilité des systèmes.

Nous avons présenté la variation de la fiabilité du système en fonction des fiabilités des sous systèmes qui le constituent et dépend directement de leurs connexions (série, parallèle...). Cette simulation est seulement analytique alors que dans la réalité, le taux de défaillance est calculé pour différentes contraintes d'environnement, et pour différents niveaux de charges (puissance, tension) car elles peuvent changer d'une structure à l'autre.

III.5.4 Calcul de taux de défaillance pour le module IGBT

Effectuer une étude de fiabilité sur un composant, ou sur un système plus complexe, comporte plusieurs aspects. Outre le fait de s'assurer qu'il remplisse les conditions de fonctionnement qui lui ont été demandées, le but premier est de déterminer son taux de défaillance.

Dans le cas des composants électroniques, et notamment des modules de puissance, cette détermination n'est pas chose aisée. D'une part, parce que leur fonctionnement est complexe, et d'autre part, parce qu'ils font intervenir un grand nombre de matériaux dont les comportements thermiques et mécaniques de chacun différent et varient au cours du temps. Il paraît donc évident que les modes de défaillances sont complexes, plus ou moins importants, et surviennent à divers moments au cours de leur vie.

III.5.4.1 Les recueils utilisés pour le calcul de fiabilité :

Les recueils de fiabilité sont bâtis à partir de données provenant de retour d'expériences et permettant de définir la probabilité de défaillance des composants. Ces recueils se basent sur l'hypothèse que le taux de défaillances est constant sur toute durée de vie du composant.

Les recueils les plus couramment utilisés, susceptible de pouvoir donner des résultats pertinents pour l'électronique de puissance sont : MIL-HDBK-217F, FIDES et RDF 2000[30,32].

a. MIL-HDBK-217F

C'est le département de la défense des états unis qui fut le premier à publier ce genre de recueil au début des années 60 il a été mis à jour depuis, et la dernière version est le - MIL-HDBK-217F de 1991, sur laquelle viennent se greffer deux notes de changements en 1995. Le but premier de ce recueil était d'établir une méthode d'estimation de la fiabilité des équipements et systèmes électroniques militaires. Aujourd'hui malgré l'obsolescence de ses données, et le fait qu'il n'ait plus été mis à jour depuis plus de dix ans, il est encore très utilisé dans de nombreux domaines industriels.. Le taux de défaillances prédit (λ_P) est de la forme :

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_t \cdot \pi_a \cdot \pi_q \cdot \pi_e \quad /10^6 \text{ heures} \quad (\text{III.20})$$

où λ_b est un taux de défaillances de base.

π_t : représente le facteur de température.

π_a : Facteur d'application : dépend de la puissance p_r

π_e : Facteur environnemental : dépend de l'application choisie.

π_q : Facteur de qualité du boîtier.

b. UTE-C 80-810 (RDF2000)

Les bases de données de ce recueil proviennent essentiellement de l'industrie des Télécommunications. Celui-ci a été publié par l'Union Technique de l'Electricité (UTE). La dernière mise à jour date d'août 2005. A l'instar du MIL-HDBK-217F, ce recueil donne les éléments pour calculer les taux de défaillances des composants électroniques reportés sur une carte électronique. Cependant ici on peut définir les facteurs d'influence plus précisément en fonction d'un profil de mission. Pour un IGBT, le taux de défaillances prédit (λ_p) est de la forme :

$$\lambda_p = \lambda_{die} + \lambda_{package} + \lambda_{overstress} \quad (III.21)$$

où λ_{die} est le taux de défaillances lié à la puce, $\lambda_{package}$ est le taux de défaillances lié au boîtier, et $\lambda_{overstress}$ est le taux de défaillances lié aux surcharges éventuelles que pourrait subir le composant.

c. FIDES

Le dernier recueil à présenter un calcul pour composants de puissances est le Guide FIDES : une méthodologie issue d'un consortium européen de huit industriels de la Défense et de l'Aéronautique (Airbus, Eurocopter, GIAT Industries, MBDA missile systems, Thales Airborne Systems, Thales Avionics, Thales Research & Technology et Thales Underwater Systems) créée sous l'égide de la Délégation Générale pour l'Armement française (DGA). L'édition A date de 2004.

Les objectifs du Guide FIDES sont d'une part de permettre une évaluation réaliste de la fiabilité des équipements électroniques, y compris dans les systèmes qui rencontrent des environnements sévères (système de défense, aéronautique, électronique industrielle, transport...), et d'autre part de fournir un outil concret pour la construction et la maîtrise de cette fiabilité. Pour un IGBT, le taux de défaillances prédit (λ_p) est de la forme :

$$\lambda_p = \lambda_{physique} \cdot \pi_{part-manufacturing} \cdot \pi_{process} \cdot \quad (III.22)$$

Avec :

$$\lambda_{physical} = \sum_i^{phase} \left(\frac{t_{annual}}{8760} \right)^i \cdot (\lambda_0 \pi_{th} + \lambda_{0boitier} \pi_{boitier} + \lambda_{0joints\ bras\ és} \pi_{joints\ bras\ és} + \lambda_{0RH} \pi_{RH} + \lambda_{0meca} \pi_{meca}) \pi_{induit} \quad (III.23)$$

Le modèle globale décrit élan le recueil FIDES est compose de trois facteurs principaux :

- Le facteur processus $\pi_{process}$, lié à la qualité et la maitrise technique de processus de développement, de fabrications et d'utilisations du composant.
- Le facteur lié à la fabrication π_{pm} , qui traduit la qualité et la maitrise technique de fabrication du composant.
- La contribution physique liée aux sollicitations et les technologies des composants et d'application.

La maitrise de la fabrication et de l'utilisation des systèmes électroniques et de puissance sont supposées effectives, les facteurs lies au processus de fabrications ont été considérés fixes suivant la technologie choisie. La contribution physique dans FIDES repose sur le principe d'un taux de défaillance constant de base associé à chaque composant pondéré par des facteurs d'accélération qui dépendent de l'application.

III.5.4.2 Variation du facteur d'accélération en fonction de la température de jonction

Le facteur d'accélération π_t (inséré en équation III.20) est de la forme [30] :

$$\pi_t = \exp \left[4640 \left(\frac{1}{373} - \frac{1}{T_j + 273} \right) \right] \quad (\text{III.24})$$

Ou T_j température de jonction Si du IGBT

La variation du facteur accélérateur en fonction de la température est présentée en Figure III.18. On remarque que π_t augmente en fonction d'élévation de la température de jonction : Pour $t < 100^\circ\text{C}$ on remarque une variation normale du facteur accélérateur, au delà de 100°C on remarque une croissance élevée de π_t ainsi augmentation considérable du taux de défaillance. Pour cela il est conseillé que la température de fonctionnement des systèmes soit inférieure à 100°C .

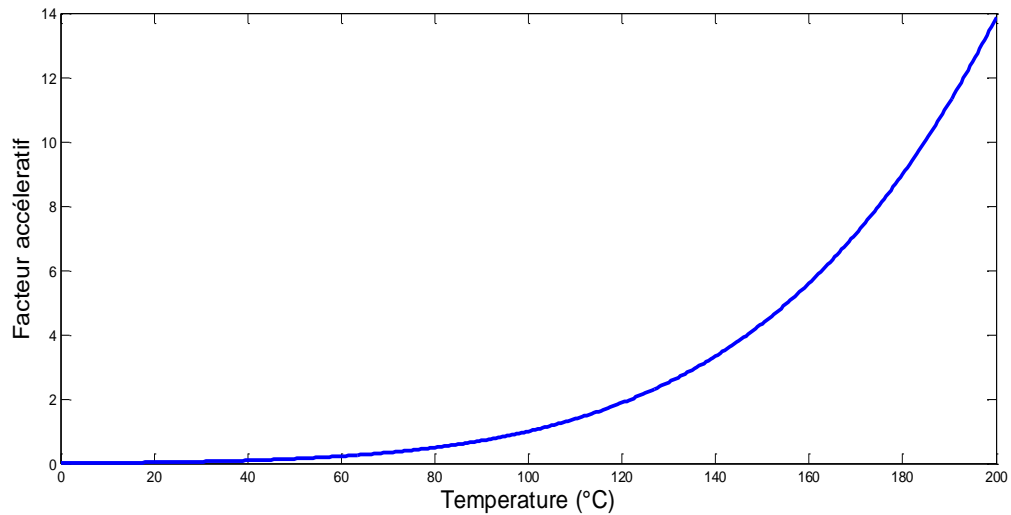


Figure III.18 Evolution du facteur accélérateur en fonction de la température de jonction

III.5.4.3 Variation du Nombre de cycles thermique en fonction de la température

Le nombre de cycles thermiques que peut supporter un composant en fonction de la variation de l'élévation de chaleur ΔT_j est de la forme [32] :

$$\text{Nb cycles} = 10^7 \exp[(-0.05\Delta T_j)] \quad (\text{III.25})$$

La variation du nombre de cycles thermiques en fonction de la température est présentée en Figure III.19. On remarque que quand on augmente le nombre de cycles injectés spontanément durant le fonctionnement des modules IGBT, l'écart de variation de la température diminue indiquant ainsi que la chaleur générée ne se diffuse pas rapidement à travers ces modules ainsi le mode impulsif a un effet considérable sur la fiabilité.

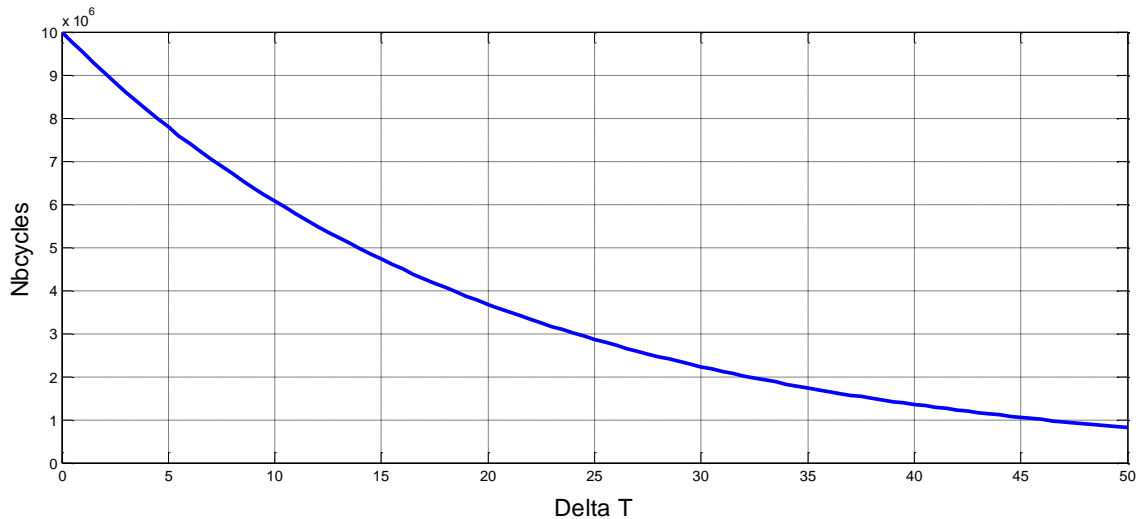


Figure III.19 Evolution du nombre de cycle en fonction de l'écart de variation de la température

III.5.4.4 Calcul du taux de défaillance de l'IGBT à partir du recueil MIL-HDBK-217F

Le taux de défaillances prédit λ_p est de la forme (équation III.20), on prendra le modèle suivant :

- Le profil de mission du IGBT choisi est adapté a l'automobile, ainsi on prendra le calibre 200-600 V.
- f : Fréquences de fonctionnement jusqu'à 20 KHZ.
- P : Puissance de fonctionnement à 90W.
- $\frac{v_{ces}}{v_{ceo}} = 0.8$: Variations des tensions émetteurs du transistor IGBT.

A partir de ces paramètres nous pouvons utilisés le recueil MIL-HDBK-217F pour calcul le taux de défaillance en défaillance/10⁶ heure pour différents températures. Le tableau III.3 regroupe quelques valeurs de variations.

$T_{junction}$ (°C)	45	60	80	100	120	150
λ_p (IGBT) (def/10 ⁶ heure)	3.11	4.14	5.589	7.659	9.936	13.8698

Tableau III.3 Variation du taux de défaillance du l'IGBT en fonction de la température

On représente en Figure III.20 cette variation du taux de défaillance du l'IGBT en fonction de la température. On remarque que le taux de défaillance du l'IGBT augmente et même se double (à 45 °C on a 3.11 def/heures alors que à 100°C on le double un peu près 7.659 def/heures) indiquant ainsi que les composants sous contraintes thermiques continues et à longues durées (quelques années) peuvent faire une défaillance du aux claquage par exemple de la jonction, et on n'aura pas de fonctionnement normal du module de puissance ainsi une anomalie du système.

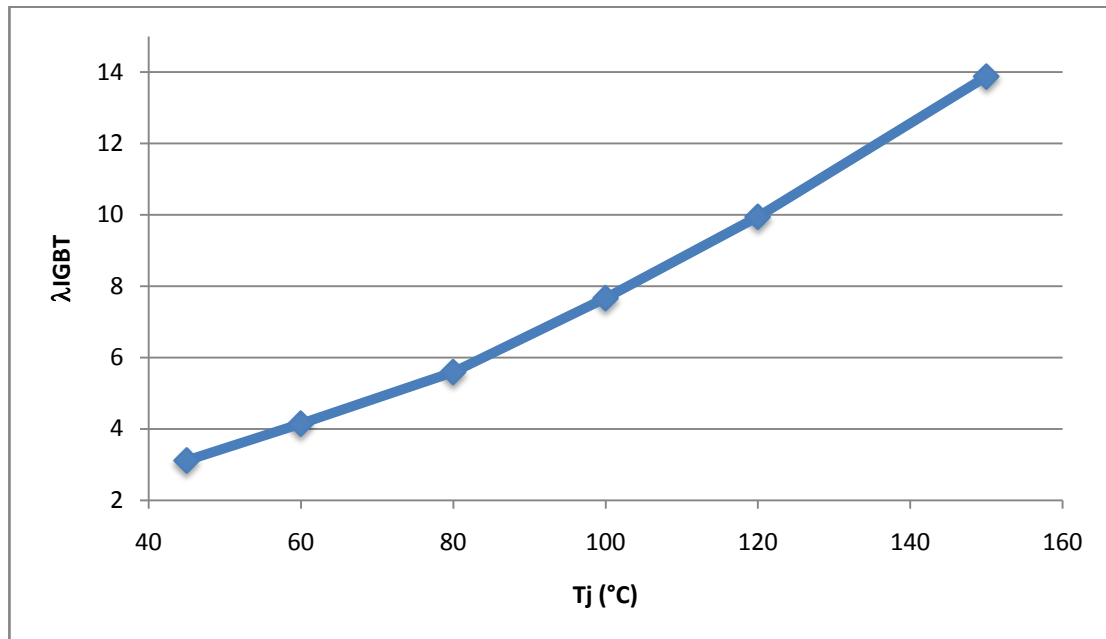


Figure III.20 Variation du taux de défaillance du l'IGBT en fonction de la température

III.5.4.5 Calcul du taux de défaillance de l'IGBT à partir du recueil FIDES

Le calcul des facteurs d'accélération physiques est fait suivant les tables fournies dans le recueil, les contributions physiques pris en compte sont :

- l'effet thermique.
- Les joints brasés.
- l'humidité.
- les vibrations mécaniques.

Ci-dessous un exemple de calcul de taux de défaillances de base d'un composant IGBTs (semi conducteur) mis dans un boîtier To220. Les taux de défaillances dans FIDES est donné en unité FIT (failure in time) c'est-à-dire en nombre de défaillance par 10^9 .

On prendra le modèle suivant :

- Le profil de mission de IGBT choisi est adapté a l'automobile, calibre 200-600v ainsi on prendra :
- $\lambda_{0th}=0,0102$.
- $\lambda_{0\text{ boitier}}=0,00303$.
- $\lambda_{0\text{ joint brasés}}=0,01515$.
- $\lambda_{0RH}=0,0589$.
- $\lambda_{0meca} = 0,0003$
- Les facteurs d'accélération sont calculés à partir les formules inclus en recueil (Voir Annexe).

On obtient les valeurs des paramètres suivants :

$$\pi_{th}=382.$$

$$\pi_{\text{boitier}} =14,50.$$

$$\pi_{\text{joints bras}}=4,21.$$

$$\pi_{\text{mec}}=0.$$

$$\pi_{RH}=2,3.$$

$$\pi_{\text{process}} =2.$$

$$\pi_{\text{part-manufacturing}} = 0,5.$$

A partir de ces paramètres nous pouvons utilisés le recueil pour le calcul de l'équation (III.22), on obtient :

$$\lambda_p=25 \text{ FIT}$$

III.5.4.6 Comparaisons des méthodes pour $T_j=100^\circ\text{C}$:

A partir d'un IGBT mis en service dans un environnement d'automobile nous calculons le taux de défaillance λ_p en utilisant deux recueils MIL -HDBK 217F et FIDES. Pour pouvoir comparer le résultat on fixe le temps à une minute. Le Tableau III.4 décrit le résultat de comparaison du calcul avec références bibliographiques [56,57] ayant le même modèle du composant et même application. Le λ_p est exprime en FIT

ReRecueil	MIL-HDBK	FIDES
λ_p (FIT)	7650	25
λ_p (FIT) [56,57]	7500	20

Tableau III.4 Résultat de la comparaison

Les résultats obtenus par MIL HDBK et FIDES concordent avec les résultats de référence pour ce genre de module dans ces conditions de fonctionnement. Un léger écart est du au faite que les modes d'applications qu'utilisent les IGBT ont changé. Cet écart est également du au faite que pour le MIL-HDBK 217 les paramètres de calcul sont purement multiplicatifs contrairement au FIDES ou les paramètres sont multiplicatifs et additifs car l'élévation d'un seul de ses paramètres influe considérablement sur le taux de défaillance. Notons que le profil de mission n'est pas totalement pris en considération dans le MIL HDBK 217f et pris dans FIDES.

III.6. Le Management thermique du composant actif

La gestion thermique d'un composant actif peut être améliorée en jouant sur son environnement proche, c'est-à-dire en modifiant le module de puissance de sorte que les gradients de température en son sein soient les plus faibles possibles, pour cela il faut :

- La diminution des résistances de contact est en effet très importante puisque dans notre exemple les chutes de température dues aux interfaces thermiques sont loin d'être négligeables.
- L'amélioration de la conductivité thermique des matériaux est importante car son augmentation induit forcément une diminution des gradients de température dans le substrat. Elle permet également d'améliorer le transfert thermique global en permettant au flux de chaleur de mieux s'épanouir au sein du module et donc d'augmenter la surface d'échange entre celui-ci et le dissipateur. Bien sûr, ce phénomène d'épanouissement de la chaleur est pris en compte par tous les fabricants de boîtiers électroniques qui rajoutent sous le composant une semelle métallique appelée « spreader », assez épaisse permettant au flux de s'épanouir avant d'arriver au système de refroidissement. Toutefois ce spreader, quand il est en cuivre, pose quelques problèmes :

- il est lourd.
- la conductivité thermique proche de 400 W/m/K ne permet pas d'obtenir un épanouissement optimal.
- son coefficient de dilatation (CTE) est éloigné de celui du silicium et de celui du matériau isolant dans le cas de substrats isolés ; ceci entraîne des problèmes de fiabilité.

Pour répondre à ces problèmes, on utilise aujourd'hui des semelles faites en alliages plus légers (par exemple l'AlSiC) dont les CTE se rapprochent de celui de la céramique.

Des travaux de recherche sont en cours pour réaliser des spreader en matériaux composites ayant une très bonne conductivité thermique et un coefficient de dilatation faible. Les travaux ont tout d'abord porté sur des matrices de cuivre chargées par des fibres de carbone et se dirigent maintenant vers des matrices métalliques chargées par des poudres de diamant, des nano fibres de carbone ou encore des nanotubes de carbone [58].

III.7. Conclusion

Avec l'augmentation de la dissipation thermique dans les appareils électroniques de puissance et la réduction des facteurs de forme globaux, l'étude thermique devient de plus en plus un élément important dans la conception de nouveaux composants électroniques.

Une analyse unidimensionnelle et tridimensionnelle de TLM a été présentée dans ce chapitre pour étudier l'effet d'auto échauffement dans les dispositifs IGBT. Les résultats confirment clairement que les modules IGBT sont capables de générer une quantité considérable de chaleur, qui doit être dissipé efficacement pour éviter l'influence sur le fonctionnement du composant et même sa durée de vie.

L'évaluation de la fiabilité d'un module de puissance est déterminée à partir des fiabilités de ses composants interconnectés en série et en parallèle, mais on a aussi besoin de recueils de base de tous les paramètres spécifiques des composants insérés (Diodes et Transistors) pour déterminer le taux de défaillances probable et estimer leur durée de vie.

conclusion générale

Conclusion Générale

La fiabilité des composants électroniques destinés à la traction automobile est un point sensible du développement et donc de l'essor technologique des véhicules électriques. Du fait de leur mode de fonctionnement et de leur environnement, ces composants subissent des contraintes plus importantes que dans les applications industrielles conventionnelles. Il est donc important de connaître ces contraintes si l'on désire estimer leur durée de vie et ainsi fiabiliser le système dans son intégralité.

Les évolutions récentes dans le domaine de l'électronique de puissance convergent vers l'augmentation de la densité de puissance et la réduction de volume des dispositifs électroniques. C'est dans cette perspective de développement que sont apparus les premiers convertisseurs intégrés, destinés à la moyenne puissance et notamment à la traction (voiture, train ...). Malheureusement, l'émergence de ces nouvelles structures, s'accompagne d'une augmentation des contraintes thermiques subies par les puces de silicium, du fait du rapprochement physique de ces dernières, de l'augmentation de la puissance et de l'environnement dans lequel évoluent ces structures.

Dans le cas d'une étude de fiabilité, basée sur les problèmes de fatigue thermique, il est important de pouvoir estimer la température dans les zones dites fragiles du composant. Dans le cas des modules de puissance, deux zones sensibles aux variations thermiques et par conséquent à l'origine de mécanismes de défaillances, peuvent être auscultées. Tout d'abord, la couche de brasure comprise entre la semelle du composant et la céramique puisqu'elle est le siège de fissures pouvant engendrer un phénomène de délamination de cette zone. Ensuite la puce, qui possède également une couche de brasure susceptible d'être affectée par des fissures, mais aussi car elle est un élément très sensible du composant à cause de son seuil de température qui conduit à la dégradation des caractéristiques électriques ; alors des problèmes de fonctionnement peuvent survenir.

Une analyse unidimensionnelle et tridimensionnelle de TLM a été présentée pour étudier l'effet d'auto échauffement dans les dispositifs IGBT. Les résultats confirment clairement que les modules IGBT sont capables de générer une quantité considérable de chaleur, qui doit être dissipée efficacement pour éviter l'influence sur le fonctionnement du composant et même sa durée de vie.

L'évaluation de la fiabilité d'un module de puissance est déterminée à partir des fiabilités de ses composants interconnectés en série et en parallèle, mais on a eu besoin aussi des recueils de base de tous les paramètres spécifiques des composants insérés (Diodes et Transistors) pour déterminer le taux de défaillances probable et estimer leur durée de vie.

Conclusion Générale

Les résultats montrent que le taux de défaillance du l'IGBT augmente pour une augmentation ou élévation de la température de jonction, indiquant ainsi que le composants sous contraintes thermiques continues et à longues durées (quelques années) peut engendrer une défaillance du aux claquages par exemple de la jonction, et on y aura pas de fonctionnement normal du module de puissance ainsi une anomalie du tout le système d'application.

La détermination de la température maximale est très importante dans la conception de l'électronique de puissance surtout en mode impulsionnel (cycles thermiques) dans les modules et systèmes électroniques. On peut en déduire que ce module sera en limite de défaillances sous la contrainte de l'élévation de température surtout en grandes puissance, d'où l'étude de sa fiabilité prédictive est d'une importance primordiale.

La gestion thermique appelée aussi Management thermique d'un composant actif peut être améliorée en jouant sur son environnement proche, c'est-à-dire en modifiant le module de puissance de sorte que les gradients de température en son sein soient les plus faibles possibles.

Enfin, on conclura l'apport de la méthode proposée et en particulier l'intérêt d'intégrer les notions de fiabilité dans les futurs systèmes et circuits électroniques.

Annexe

Factors contributing to physical stresses

Π_{Thermal}	<p>In an operating phase : $e^{11804 \times 0.7 \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{j\text{-component}} + 273)} \right]}$</p> <p>In a non-operating phase : $\Pi_{\text{Thermal}} = 0$</p>
Π_{TCy} Case	$\left(\frac{12 \cdot N_{\text{annual_cy}}}{t_{\text{annual}}} \right)_i \times \left(\frac{\min(\theta_{\text{cy}}, 2)}{2} \right)_i^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\Delta T_{\text{cycling}}}{20} \right)_i^4 \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{\text{max-cycling}} + 273)} \right]}$
Π_{TCy} Solder joints	$\left(\frac{12 \cdot N_{\text{annual_cy}}}{t_{\text{annual}}} \right)_i \times \left(\frac{\min(\theta_{\text{cy}}, 2)}{2} \right)_i^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\Delta T_{\text{cycling}}}{20} \right)_i^{1.9} \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{\text{max-cycling}} + 273)} \right]}$
Π_{Mech}	$\left(\frac{G_{\text{RMS}}}{0.5} \right)_i^{1.5}$
Π_{RH}	<p>$\left(\frac{\text{RH}_{\text{ambient}}}{70} \right)_i^{4.4} \times e^{11804 \times 0.9 \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{\text{board_ambient}} + 273)} \right]}$</p> <p>In an operating phase : $\Pi_{\text{RH}} = 0$</p>

Bibliographie

Références Bibliographiques

- [1] C. Alonso, "Modélisation de composants pour la simulation en électronique de puissance – application au GTO et à l'IGBT", thèse de l'INPT, 1994.
- [2] Viet-Son Duong, "Etude de l'intégration d'une protection par fusible dans les convertisseurs à IGBT", thèse de l'INPG, Grenoble, 1997.
- [3] A.Leroy et J.P.Signoret, « le risque technologique », Presse universitaire de France 1992.
- [4] M.Gireau, « Sûreté de fonctionnement des systèmes - Principes et définitions », Techniques de l'Ingénieur, E 3 850, 2005.
- [5] A.G.Mihalache, « Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarque », thèse de doctorat, décembre 2007.
- [6] A.Medina, « Défauts des systèmes à représentation multi-modèles linéaires invariants dans le temps », doctorat de l'Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2004.
- [7] Bernard Gault, « La fiabilité », Cours de BTS maintenance Industrielle, université de Nantes, 2005.
- [8] Norme X60-500 "Terminologie relative à la fiabilité - Maintenabilité – Disponibilité", Afnor 1988.
- [9] W.Wondrak, "Physical limits and lifetime limitations of semiconductor devices at high temperature", Microelectronics reliability, Vol. 39, issues 6-7, June-July 1999, pp. 1113-1120.
- [10] Voir le site: <http://www.clearsy.com/surete-fonctionnement/>
- [11] Y.Mortureux, « Arbres de défaillance, des causes et d'événement », Technique de l'ingénieur, traité CD-ROM Sécurité et gestion des risques, SE 4 050, 2004.
- [12] Philippe Baudesson « Sûreté de fonctionnement, reconfiguration et marches dégradées des onduleurs multiniveaux à IGBT », thèse de l'INPT, Toulouse, 2000.
- [13] M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules", Microelectronics Reliability, Vol.42, n°4-5, pp.653-667, April-May 2002.
- [14] Benmansour, "Contribution a l'étude des mécanismes de défaillances de l'igbt sous régimes de fortes contraintes électriques et thermiques", thèse au laboratoire IMS Bordeaux, décembre 2008, n° 3752.
- [15] J.Y.Delétage, « Étude de la durée de vie d'assemblages microélectroniques par l'utilisation de simulation, de modèles de dégradation et de circuits intégrés spécifiques de test », Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux 1, décembre 2003, n°2796.
- [16] G. Coquery, R. Lallemand, A. Hamidi, D. Wagner, « Fiabilité des modules IGBT de forte puissance – Influence de la fatigue thermique due aux cycles de traction – Essais accélérés de cyclage thermique en puissance », EPF'96, Grenoble.

Références Bibliographiques

- [17] Ammous, B. Allard, H. Morel « Transient temperature measurements and modeling of IGBT's under short circuit », IEEE transactions on power electronics, vol. 13, n°1, January 1998.
- [18] A. Bouzourene, L. Humbert, G. Rojat, P.J. Viverge « Vieillissement des transistors Bipolaires à Grille Isolée (IGBT) », EPF'98, Belford.
- [19] M. Corazza « Techniques mathématiques de la fiabilité prévisionnelle, Collection Sup'Aéro, Cépaduès-Edition, 1975.
- [20] M.Bouarroudj-Berkani et Laurent Dupont, "Fatigue des composants électroniques de puissance," *Techniques de l'Ingénieur*, Reference D3126, 10 novembre 2010.
- [21] Calmon, J.P. Chante, B. Reymond, A. « Analysis of IGBT dV/dt in hard swtiching mode », Senes, EPE, 1995, Sevilla.
- [22] Z. Dou, "Nouvelles structures de redondance pour onduleurs securises a tolerance de pannes dédiés aux applications critiques," Thèse de l'INP Toulouse a soutenue en Novembre 2011.
- [23] Camera, C. Crovetto, F. Fasce, M. Pasqualetti, M. Portesine, R. Scicolone, « Electrical and thermal characterization of high power press-packed IGBT », P.E. Zani, EPE, 1999, Lausanne.
- [24] K. Heumann, M. Queum « Second breakdown and latch-up behavior of IGBTs », the European Power Electronics Association, 1993.
- [25] F. Calmon « Participation à l'étude du comportement électrothermique des IGBT (Transistors Bipolaires à Grille Isolée) », Thèse à l'INSA de Lyon, 1995.
- [26] M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules", *Microelectronics Reliability*, Vol.42, n°4-5, pp.653-667, April-May 2002.
- [27] Benmansour, S. Azzopardi, J.-C. Martin and E. Woigard, "Failure mechanism of trench IGBT under short-circuit after turn-off", *Microelectronics and Reliability*, vol.46, Iss. 9-11, Sept.-Nov. 2006, pp. 1778-1783.
- [28] M. Ciappa, W. Fichtner "Lifetime prediction of IGBT module for traction applications" *Proceedings of 38 IEEE International Reliability Physics Symposium*, San Jose, USA, pp. 210-216, 2000
- [29] Mathieu RIZZI, "Contribution à l'étude de la fiabilité des modules de puissance pour application automobile", Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux1, mars 2008, n° 3573.
- [30] MIL-HDBK-217F, "US Department of Defense, Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment", 1991.
- [31] S. Januszewski, M. Kociszewska, H. Swiatek, G. Swiatek, "Semiconductor Device Failures in Power Converter Service Conditions" *EPE Journal*. Vol.7 n°3-4 December 1998.
- [32] Guide FIDES 2004 Edition A, "Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques", DGA - DM/STTC/CO/477-A, 2004.

Références Bibliographiques

- [33] J.M. Li, M. Alnahr, D. Lafore « Etude des IGBTs en régime de surcharge transitoire forte puissance – courte durée », EPF 1996, Grenoble.
- [34] M. Alnahr « Comportement de l'IGBT en régime extrême », M. Alnahr, thèse de l'INPG, 1999.
- [35] J.Vallon, « Introduction à l'étude de la fiabilité des cellules de commutation à IGBT sous fortes contraintes », thèse de doctorat, soutenue Décembre 2003
- [36] Pierre Lefranc, "Étude, conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance", Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, novembre 2005, n°2005-ISAL-0097.
- [37] J. Donlon, "IGBT Reliability Issues and Needs," presented at the Utility-Scale Grid-Tied PV Inverter Rel.Tech. Workshop, Albuquerque, NM, 2011
- [38] Ducos C., "Conception, réalisation et validation d'un circuit intégré de test pour la fiabilisation des technologies d'encapsulation plastique", Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux 1, octobre 1997, n°1742.
- [39] A.Maouad, « Caractérisation de dégradation des IGBT en milieu industriel », thèse de doctorat, l'université de Metz, Juin 2000.
- [40] T. Kovaltchouk, J. Aubry, B. Multon, et H. Ben Hamed, « Influence of IGBT Current Rating on the Thermal Cycling Lifetime of a Power Electronic Active Rectifier in a Direct Wave Energy Converter », in Power Electronics and Applications (EPE), 2013, 15th European Conference on Power Electronics and Applications, Lille, France, 2013, p. pp.1,10.
- [41] F. Richardeau, "Sureté de Fonctionnement en Electronique de Puissance", mémoire d'Habilitation à Diriger la Recherche, ENSEEIHT - INP Toulouse, 17 juin 2004.
- [42] C.Christopoulos , " The Transmission Line Modelling Method ", IEEE/OUP Series On Electromagnetic Wave Theory, Oxford University Press, Chapter 7, pp.167-176, 1995.
- [43] A.Bejan:"Heat transfer", John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [44] A. G. Marcello Pesare , Anna Gina Perri, "An analytical method for the thermal layout optimisation of multi-layer structure solid-state devices," Solid-State Electronics, vol. 45, 2001.
- [45] P. Dupuy, « Modèles thermiques et méthodologie d'analyse thermique pour circuits intégrés de puissance de type "SmartPower", these de LAAS- No d'ordre : 449, 1998.
- [46] R. Hocine, S.H.Pulko, A. Boudghene Stambouli, A. Saidane," TLM Method for Thermal Investigation of IGBT Modules in PWM Mode", Microelectronic Engineering Journal, Elsevier Science, 2009.
- [47] A.Hamidi, G.Coquerz , R.Lallemand and P.Vales, "Temperature Measurements and Thermal Modelling of a High Power IGBT Multichips Modules for Reliability Investigations in Traction Application", Microelectronics Reliability journal N°38, pp 1353-1359,1998.

Références Bibliographiques

- [48] J. S. P. Turkes, “ Electro-thermal simulation of power electronic systems” , *Microelectronics Journal*, vol. 29, pp. 785-790, 1998
- [49] D.de Cogan, “Transmission-Line-Matrix (TLM) Techniques for Diffusion Applications”, Gordon & Breach, London, 1998.
- [50] X. Gui, P. W.Webb, and G. B-Gao, “Use of the three-dimensional TLM Method in the Thermal Simulation and Design of Semiconductor Devices”, *IEEE transactions on electron devices*, 39(6), (1992) 1295-1301.
- [51] R. Hocine, A. Boudjemai, A. Amrani, K. Belkacemi,” A Three-Dimensional TLM Simulation Method for Thermal Effect in PV-Solar Cells”, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering Vol:8 No:6*, 2014 waset.org/publications/9998553.
- [52] A.E.Kronberg, A.H.Benneker, “Notes on Wave theory in Heat Conduction: A new boundary condition”, *International journal Heat Mass Transfer*, pp 127-137, 1998.
- [53] R. Hocine, A.Boudghene Stambouli, A. Saidane et A. Boudjemai,” Transmission Line Matrix: A Tool for Study the Thermal Management of Thermo-Electric properties of Materials and Power Electronics Devices”, 5th International Conference on Electronics Engineering ICEE 2013, 20-21 Novembre USTOMB Oran.
- [54] Yamamoto, T., Yoshiwatari, S., and Ichikawa, “Expanded lineup of highpower 6th generation IGBT module families,” *Fuji Electric Review*, vol. 58, no. 2, pp. 60–64, 2012.
- [55] F. Richardeau, and L. Pham, “Reliability calculation of multilevel converters - theory and applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 10, pp. 4225-4233, Oct. 2013.
- [56] M. Ciappa, « Lifetime prediction on the base of mission profiles », *Microelectron. Reliab.*, vol. 45, no 9-11, p. 1293-1298, sept. 2005.
- [57] T. Kovaltchouk, J. Aubry, B. Multon, et H. Ben Hamed, « Influence of IGBT Current Rating on the Thermal Cycling Lifetime of a Power Electronic Active Rectifier in a Direct Wave Energy Converter », in *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications*, Lille, France, 2013, p.1,10.
- [58] M. Bendali, C. Larouci, T. Azib, C. Marchand, et G. Coquery, « Design Methodology with Optimization of an Interleaved Buck Converter for Automotive Application », in *IEEE EUROCON 2013*, Zagreb, Croatia, 2013.