



HAL
open science

Vieillissement du TRIAC soumis à des essais de fiabilité du type HTRB

Gilles Rousseau

► **To cite this version:**

Gilles Rousseau. Vieillissement du TRIAC soumis à des essais de fiabilité du type HTRB. Electronique. 2016. dumas-01803690

HAL Id: dumas-01803690

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01803690>

Submitted on 30 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

CENTRE REGIONAL ASSOCIÉ DE ORLÉANS

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

SPECIALITÉ : ÉLECTRONIQUE-AUTOMATIQUE

OPTION : SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES

par

Gilles ROUSSEAU

Vieillissement du TRIAC soumis à des essais de fiabilité du type HTRB

Soutenu le 20 octobre 2016

JURY

PRÉSIDENT :

M. Didier LE RUYET, Professeur (CNAM Île-de-France)

MEMBRES :


M. Sosthène IBALA, Enseignant (CNAM Centre-Val de Loire)

M. Rémi BERTHET, Responsable de l'école SITI (CNAM Centre-Val de Loire)

M. Stéphane FORSTER, Expert Fiabilité (STMicroelectronics)

M. Bernard BROSSARD, Responsable Fiabilité Produits (STMicroelectronics)

Les résultats présentés dans ce rapport étant confidentiels, certaines informations non indispensables à la compréhension du document ont été masquées.

Ainsi, certains jugements de valeurs sont masqués de cette façon : «  ». Il en est de même pour le fabricant des pièces sur lesquels les essais expérimentaux ont été menés.

La référence du fabricant des pièces sur lesquels les essais expérimentaux ont été réalisés sera écrite de cette façon : « XXXXX-XXXXXXXX/X », le calibre en courant de cette façon : « XX A », et enfin la tenue en tension : « XXX V ».

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Fiabilité de la société STMicroelectronics à Tours. Je souhaite remercier sincèrement les personnes qui m'ont apporté leur soutien pour la réalisation de ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Christine ANCEAU, responsable des laboratoires de fiabilité et caractérisation ainsi que Fabien ALLANIC, responsable du ressource center pour m'avoir permis d'effectuer ce projet au sein du laboratoire de fiabilité. Je tiens à remercier Gilles DUTRANNOY, ingénieur qualité de m'avoir fait confiance en me soumettant ce sujet de mémoire.

Je remercie bien sûr également Stéphane FORSTER, ingénieur et expert fiabilité, pour sa disponibilité, son support, et les précieux conseils qu'il m'a communiqués tout au long de ce travail. Je remercie aussi Bernard BROSSARD, ingénieur fiabilité, pour ses conseils et m'avoir fait partager ses retours d'expérience sur la fiabilité des TRIACs.

Enfin, je tiens également à remercier mes collègues Sébastien BODIN, Olivier POITEVIN, Dany DONNET, David KARSENTI et David PEYRAT pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail ainsi que pour les bons moments passés avec eux au sein du laboratoire de fiabilité.

Liste des abréviations

AEC	Automotive Electronics Council.
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité.
DC	Direct Current.
FIT	Failure In Time.
GCT	Gate-Commutated Thyristor.
GTO	Gate Turn-Off thyristor.
HBD	Hard Breakdown.
HTRB	High Temperature Reverse Bias.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
IPM	Intelligent Power Module.
JEDEC	Joint Electron Device Engineering Council.
JEP	JEDEC Publications.
MIL-STD	Military Standard.
MOS	Metal Oxide Semiconductor.
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
MTTF	Mean Time To Failure.
NF	Norme Française.
ppm	Pièce Par Million. Nombre de défauts pour un million de pièce.
SBD	Soft Breakdown.
SCR	Silicon-Controlled Rectifier.
TDDBD	Time-Dependent Dielectric Breakdown.

Index des notations

$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius.
μ	Moyenne d'une distribution normale ou log-normale.
A	Anode.
A	Ampère.
A	Constante.
A	Constante.
A1	Anode 1.
A2	Anode 2.
AC	Alternative Current.
AF	Acceleration Factor.
AF_T	Facteur d'accélération en température.
AF_V	Facteur d'accélération en tension.
Al	Aluminium.
Au	Or.
C	Constante.
E	Champ électrique.
E_a	Energie d'activation.
E_g	Largeur de la bande interdite.
eV	Electron Volt.
F(t)	Fonction de défaillance.
f(t)	Densité de probabilité de défaillance.
FA	Facteur d'accélération.
G	Gâchette.
h	heure.
h(t)	Taux de défaillance en fonction du temps
Hz	Hertz.
I₀	Courant nominal du semiconducteur à l'état passant.
I_{AK}	Courant de l'anode vers la cathode.

I_{BO-}	Breakover current.
I_{BO+}	Breakover current.
I_{Ch}	Courant de charge.
I_{DL}	Leakage Direct Current.
I_{DL}	Leakage Reverse Current.
I_{DRM}	Peak Repetitive Blocking Current.
I_G	Courant de gâchette.
I_{GT}	Gate Trigger Current.
I_H	Holding Current.
I_L	Leakage Current.
I_{nominal}	Courant traversant le semiconducteur à l'état fermé.
I_R	Reverse current.
I_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Blocking Current.
I_s	Courant de saturation.
I_{TM}	Peak repetitive state current (SCR).
K	Cathode.
k	Constante de Boltzmann. $k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$.
K	Kelvin.
m	Mètre.
mA	Milliampère.
min	Minute.
mW	Milliwatt.
n	Facteur de loi en puissance.
n	Nombre total d'échantillons bons.
nA	Nanoampère.
P_d	Puissance dissipée.
P_{dis}	Puissance du semiconducteur à l'état fermé.
P_{OFF}	Puissance dissipée par le TRIAC à l'état bloqué.
P_{ON}	Puissance du semiconducteur à l'état fermé.
Q	Cadrant.

r	Nombre d'échantillons défailants.
R	Résistance.
R(t)	Fonction de fiabilité.
R_{GK}	Résistance entre gâchette et cathode.
R_{th(c-h)}	Résistance thermique entre le boîtier et le radiateur.
R_{th(h-a)}	Résistance thermique entre le radiateur et l'air.
R_{th(j-a)}	Résistance thermique entre la jonction et l'air.
R_{th(j-c)}	Résistance thermique entre la jonction et le boîtier.
s	Seconde.
SiO₂	Oxyde de silicium.
t	Temps.
T	Température.
T	TRIAC.
T	Période d'un signal périodique.
T_a	Température ambiante.
T_c	Température de boîtier.
TH	Thyristor.
T_h	Température du radiateur.
T_j	Température de jonction.
T_{j(max)}	Température de jonction maximale.
T_{OFF}	Temps permettant une décroissance de la température.
T_{ON}	Temps d'application du courant dans le composant.
V	Volt.
U	Valeur efficace d'une tension.
u_{ZEQ2(t)}	Tension instantanée aux bornes de l'impédance ZEQ2.
V_A	Potentiel sur l'anode.
V_{AK}	Tension aux bornes de l'anode et de la cathode.
V_{BO-}	Breakover voltage.
V_{BO+}	Breakover voltage.
V_D	Direct voltage.

V_{DRM}	Peak Repetitive Forward off–state Voltage.
V_F	Forward Voltage.
V_{GK}	Tension entre la gâchette et la cathode.
V_K	Potentiel sur la cathode.
V_{ON}	Tensions aux bornes du semiconducteur à l'état fermé.
V_{peak}	Tension crête d'une tension alternative sinusoïdale.
V_R	Reverse voltage.
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse off–state Voltage.
V_{TM}	Peak forward on–state voltage (SCR). Peak on–state voltage (TRIAC).
W	Watt.
ZEQ1	Impédance équivalente d'indice 1.
ZEQ2	Impédance équivalente d'indice 2.
β	Paramètre de forme de la distribution de Weibull.
β	Facteur d'accélération de la tension.
γ	Facteur d'accélération du champ électrique.
γ	Paramètre de position de la distribution de Weibull.
ΔI_s	Variation du courant de saturation.
Δt	Intervalle de temps.
ΔT	Variation de température.
η	Paramètre d'échelle de la distribution de Weibull.
λ	Taux de défaillance.
λ	Paramètre d'échelle de la distribution exponentielle.
μA	Microampère.
μW	Microwatt.
σ	Écart-type d'une distribution normale ou log-normale.
Ω	Ohm.

Table des matières

Remerciements	3
Liste des abréviations	4
Index des notations	5
Table des matières	9
Introduction	13
I Thyristors et TRIACs : des semiconducteurs grand public	15
I.1 Introduction à l'électronique de puissance	15
I.1.1 L'électronique de puissance : une électronique de commutation.....	15
I.1.1 Domaines d'applications des semiconducteurs de puissance.....	15
I.2 Présentation du thyristor	16
I.2.1 Symbole et structure semiconductrice du thyristor	16
I.2.2 Modes d'amorçage et de conduction	17
I.2.3 Caractéristique statique du thyristor	18
I.3 Présentation du TRIAC	19
I.3.1 Commande de charge raccordée au réseau alternatif	19
I.3.2 Symbole et structure semiconductrice du TRIAC.....	20
I.3.3 Modes d'amorçage	21
I.3.4 Caractéristique statique du TRIAC.....	22
I.4 Technologie de fabrication des structures thyristors et TRIACs.....	23
I.4.1 Fabrication de la puce (Front End)	23
I.4.2 Assemblage (Back End)	24
I.5 Résistance thermique des structures thyristors et TRIACs	26
II Notions de fiabilité	28
II.1 Généralités	28
II.1.1 Définitions	28
II.1.1.1 Fiabilité.....	28

II.1.1.2	Défaillance.....	28
II.1.1.3	Mode de défaillance	28
II.1.1.4	Mécanisme de défaillance	29
II.1.2	Courbe en baignoire.....	29
II.2	Mécanismes de défaillance dépendant du temps pour les structures étudiées	30
II.2.1	Fatigue thermique	30
II.2.2	Time-Dependent Dielectric Breakdown (TDDB)	31
II.2.3	Ions mobiles.....	33
II.2.4	Corrosion	33
II.2.5	Croissance d'intermétallique	34
II.3	Facteurs d'accélération	35
II.3.1	Procédés d'accélération	35
II.3.2	Accélération en température : loi d'Arrhenius	36
II.3.3	Accélération en tension	36
II.3.3.1	Loi en E	37
II.3.3.2	Loi en 1/E	37
II.3.3.3	Loi en puissance	38
II.3.4	Accélération en température et en tension.....	38
II.4	Fonctions pour l'analyse de la fiabilité	38
II.4.1	Fonction de fiabilité R(t) et fonction de défaillance F(t).....	39
II.4.2	Densité de probabilité f(t).....	40
II.4.3	Taux de défaillance instantané $\lambda(t)$	41
II.4.4	Critères de durée de vie	41
II.4.5	Distributions utilisées en analyse de fiabilité	42
II.4.5.1	Distribution normale.....	42
II.4.5.2	Distribution log-normale	43
II.4.5.3	Distribution en exponentielle	44
II.4.5.4	Distribution de Weibull	44
III	Thyristors et TRIACs à l'état bloqué	46
III.1	Contraintes normatives	46

III.1.1	Description de l'essai de HTRB	46
III.1.2	Exigences normatives	47
III.1.3	Vers une fiabilité orientée mécanisme de défaillance	48
III.2	Impact de la température sur les paramètres du composant à l'état bloqué	50
III.2.1	Tenue en tension et retournement dynamique	50
III.2.2	Emballement thermique.....	51
IV	Expérimentation des tests de fiabilité	56
IV.1	Définitions des essais réalisés	56
IV.1.1	Description des essais réalisés.....	56
IV.1.2	Description des composants utilisés	56
IV.1.3	Définition de la matrice de test.....	56
IV.2	Protocole de test	57
IV.2.1	Montage des composants sur rack.....	57
IV.2.2	Insertion du rack dans l'étuve.....	58
IV.2.3	Vérification de l'arrivée des tensions	58
IV.2.4	Mise en chauffe de l'étuve.....	59
IV.2.5	Ajout de la contrainte tension.....	59
IV.2.6	Suivi du courant de fuite des pièces durant toute la durée du test.....	59
IV.3	Critère de défaillance.....	60
V	Influence de la température et de la tension sur la fiabilité du TRIAC	62
V.1	Préambule	62
V.2	TRIACs polarisés en tension continue (DC)	62
V.2.1	TRIACs polarisés en face arrière.....	62
V.2.2	TRIACs polarisés en face avant	66
V.3	Triacs polarisés en tension alternative (AC)	68
V.4	Synthèse.....	72
	Conclusion	74
	Bibliographie.....	76
	Table des annexes	83

Liste des figures	85
Liste des tableaux	88

Introduction

Le marché du composant de puissance se voit pourvu de nombreux segments tels que l'aéronautique, l'automobile ou le secteur du grand public. Tous ces domaines s'appuient sur les nouvelles technologies pour proposer des produits de plus en plus innovants.

À l'instar de ces innovations, l'évaluation de la fiabilité des composants de puissance connaît un essor prépondérant. Les précurseurs dans ce domaine ont été les militaires, soulevant les premiers, les questions relatives à la fiabilité de leurs systèmes. Aujourd'hui, ces interrogations ont rattrapé tous les secteurs d'activités. Que ce soit l'industriel ou le consommateur, chacun souhaite aujourd'hui connaître la durée de vie de son produit ou système. En effet un fabricant d'appareils électroménagers souhaitera connaître combien de lessives pourra faire la ménagère avec sa machine à laver. La fiabilité est au centre de toutes ces interrogations et devient aujourd'hui un moyen de comparaison mais aussi un argument de vente comme nous avons pu le constater sur de récentes publicités de fabricants automobiles. Pour STMicroelectronics, fabricant de composants de puissance, la fiabilité est également un moyen de faire évoluer les composants pour les rendre plus robustes à l'égard des contraintes et de réduire les coûts de fabrication à travers la diminution des retours clients.

STMicroelectronics doit être capable de fournir à ses clients des produits performants, dont la robustesse est éprouvée et compatibles avec les applications visées. Il est donc nécessaire de les qualifier, afin de pouvoir garantir une certaine durée de vie aux clients. Seulement cette durée de vie varie en fonction des conditions de fonctionnement des produits...

Le projet présenté dans ce mémoire a pour objectif de construire une modélisation applicable où il sera possible de prédire la durée de vie d'un TRIAC¹ adapté pour un usage général en commutation de tension alternative, utilisé dans l'application finale du client en fonction de son environnement et des essais de fiabilité effectués (dépendant de la température et de la tension).

Le premier chapitre présentera succinctement les différents composants de puissance ainsi que leur domaine d'application avant d'introduire le TRIAC que l'on peut retrouver dans de nombreuses applications domestiques. Bien que la fiabilité couvre de nombreuses situations (fiabilité d'un système complet, fiabilité d'un composant unitaire), le second chapitre introduira les notions de fiabilité dans le cadre d'un composant unitaire. Quant au troisième chapitre, il sera consacré à l'étude du TRIAC à l'état bloqué au travers des contraintes normatives, ainsi qu'à l'impact de la température sur les paramètres du composant. L'étude du vieillissement du TRIAC soumis à des essais de fiabilité passe nécessairement par la réalisation de nombreux essais expérimentaux. Le quatrième chapitre présentera les conditions dans lesquelles les essais ont été menés afin de collecter des données expérimentales. Enfin le cinquième et dernier chapitre de ce mémoire consiste à extrapoler la durée de vie du TRIAC en fonction de ses contraintes en tension et en température. Cette prédiction sera fondée sur la détermination d'une loi de vieillissement du composant.

¹ TRIAC : TRIode for Alternating Current.

I Thyristors et TRIACs : des semiconducteurs grand public

I.1 Introduction à l'électronique de puissance

I.1.1 L'électronique de puissance : une électronique de commutation

Le domaine de l'électronique concerne toutes les applications liées à l'utilisation des composants actifs. Il est nécessaire de distinguer l'électronique analogique, l'électronique numérique et l'électronique de puissance.

L'électronique de puissance permet la conversion de l'énergie électrique entre une source et un récepteur qui n'ont pas des caractéristiques adaptées. Par exemple, lorsque l'on désire recharger la batterie de son téléphone portable à partir d'une prise électrique domestique, on doit convertir la tension alternative sinusoïdale de la prise en une tension continue.

Devant les puissances mises en jeu, et dans un souci de diminuer la consommation d'énergie, il faut travailler en commutation. Le composant de base est le semiconducteur qui joue alors un rôle semblable à celui d'un interrupteur mécanique : fermé, il laisse passer le courant en provoquant le moins de chute de tension possible, ouvert, il ne laisse passer qu'un courant de fuite négligeable malgré la tension appliquée à ses bornes.

I.1.1 Domaines d'applications des semiconducteurs de puissance

Le domaine de l'électronique de puissance s'étend de quelques microwatts à quelques mégawatts. Les semiconducteurs de l'électronique de puissance travaillent jusqu'à des fréquences supérieures à la centaine de kilohertz. Dans ces domaines d'application, des interrupteurs mécaniques ne supporteraient pas les fréquences de fonctionnement, et le risque d'arc électrique serait accru. La **figure 1** présente le diagramme de puissance en fonction du type d'interrupteur et leur application.

Parmi les composants de puissance on distingue les composants électroniques à commande en courant (par exemple : transistor bipolaire, thyristor, TRIAC) des composants électroniques à commande en tension (par exemple : transistor MOSFET, transistor IGBT).

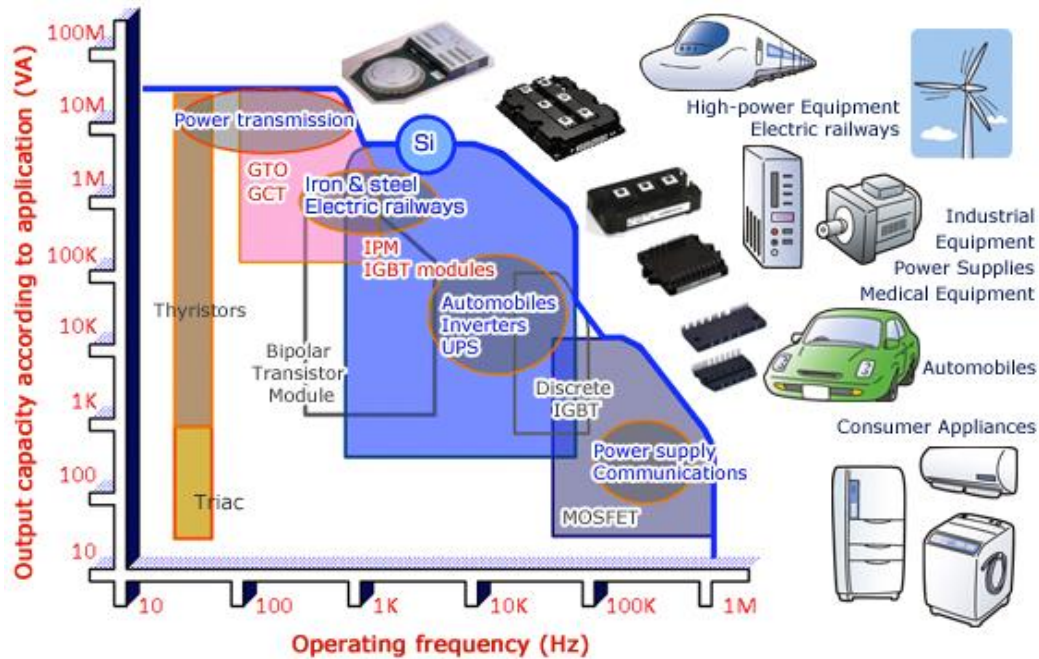


Figure 1 : Diagramme puissance en fonction de la fréquence par type d'interrupteur et leurs applications [1]

Le choix des composants peut se résumer comme suit [2] :

- MOSFET : application basse tension ($U < 100 \text{ V}$),
- IGBT : application moyenne tension haute fréquence ($100 \text{ V} < U < 1\,000 \text{ V}$),
- thyristor ou TRIAC : application moyenne tension fréquence secteur ($100 \text{ V} < U < 1\,000 \text{ V}$),
- GTO : application haute tension, basse fréquence ($> 1\,000 \text{ V}$) (forte puissance).

Dans la suite de ce rapport, nous nous intéresserons seulement au thyristor et au TRIAC qui reste indispensable en commande à faible puissance depuis le secteur, là où le marché grand public est très porteur [3].

I.2 Présentation du thyristor

I.2.1 Symbole et structure semiconductrice du thyristor

Le thyristor est un composant équivalant à deux transistors bipolaires montés « dos à dos ». Le premier transistor dont l'émetteur correspond à l'anode (A) du thyristor est un dispositif P-N-P, alors que le second transistor dont l'émetteur correspond à la cathode (K) du thyristor est un dispositif N-P-N. La gâchette (G) correspond à la base du transistor N-P-N. La **figure 2** (a) illustre le symbole du thyristor et la **figure 2** (b) présente le schéma équivalent du thyristor à base de transistors bipolaires.

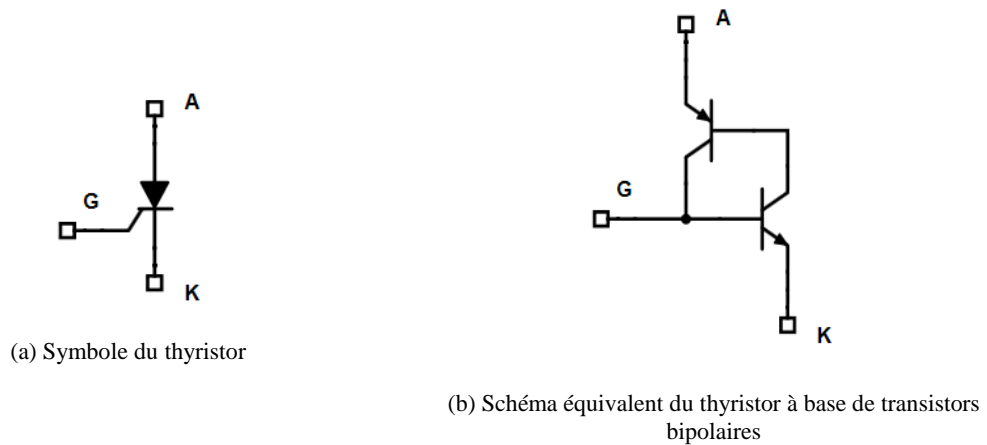


Figure 2 : Symbole du thyristor (a) et schéma équivalent du thyristor à base de transistors bipolaires (b)

Le composant P-N-P-N est fondamentalement constitué de quatre couches semiconductrices dopée alternativement P et N et séparées par trois jonctions et présentant deux électrodes de puissance : l'anode et la cathode. Il présente aussi une électrode de commande : la gâchette (**figure 3**).

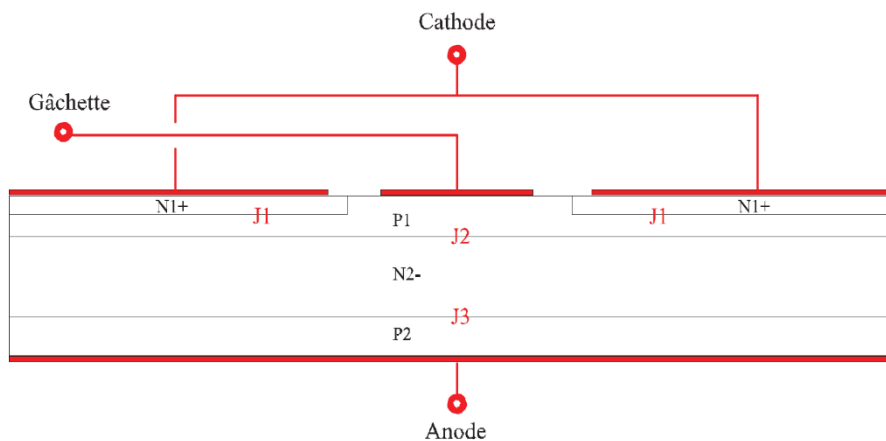


Figure 3 : Structure semiconductrice du thyristor [4]

I.2.2 Modes d'amorçage et de conduction

Dans son fonctionnement, le thyristor est assez semblable à une diode à jonction utilisée pour le redressement du courant alternatif. Tout comme la diode, il ne laisse passer le courant que dans un seul sens, de l'anode vers la cathode. Cependant, il ne pourra conduire uniquement si un courant positif est fourni à son électrode de gâchette.

L'amorçage, par le courant de gâchette, peut se faire par un courant continu ou par une impulsion de courant. À partir de ce moment, le thyristor s'amorce et reste amorcé. Le thyristor se désamorce lorsque la différence de potentiel entre l'anode et la cathode chute :

dès que le courant de puissance devient inférieur au courant de maintien, le thyristor ne conduit plus.

I.2.3 Caractéristique statique du thyristor

La caractéristique statique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'un thyristor est donnée à la **figure 4**. Les paramètres principaux qui caractérisent un thyristor sont placés sur cette même figure.

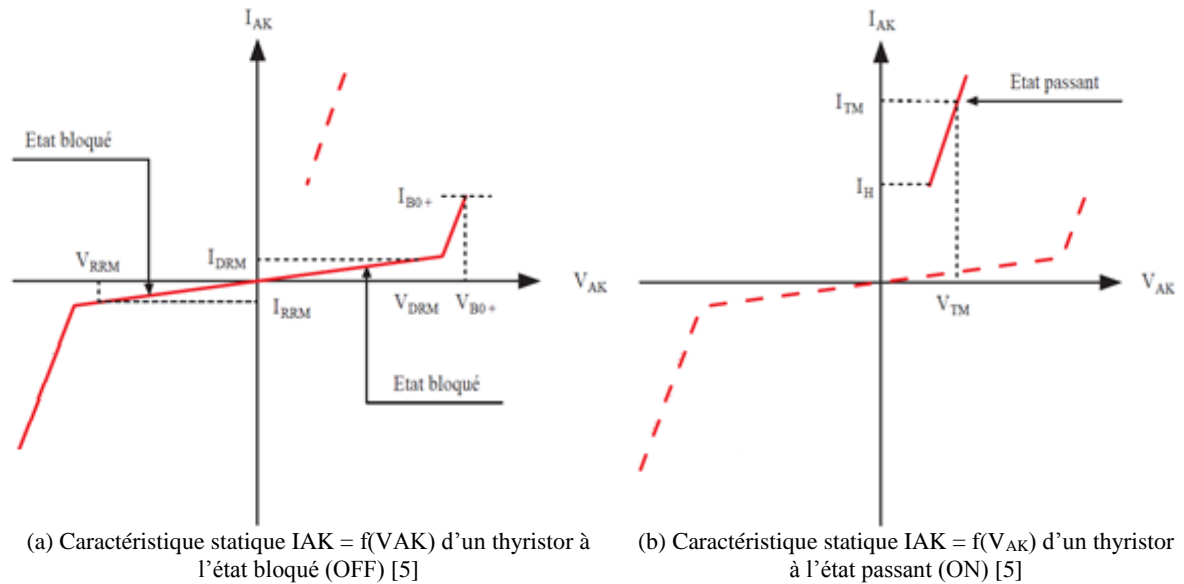


Figure 4 : Caractéristique statique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'un thyristor à l'état bloqué (a) et à l'état passant (b) [5]

La signification des paramètres notés à la figure ci-dessus se trouve dans le **tableau 1** ci-dessous.

Paramètre	Signification
V_{DRM}	Tension en direct maximum répétitive à l'état bloqué
I_{DRMM}	Courant de fuite à $V_D = V_{DRM}$ spécifié à une température donné
V_{BO+}	Tension de retournement dynamique en direct
I_{BO+}	Courant de retournement pour $V_{AK} = V_{BO+}$
V_{RRM}	Tension en inverse maximum répétitive à l'état bloqué
I_{RRM}	Courant de fuite à $V_D = V_{DRM}$ spécifié à une température donné
I_H	Courant de maintien du thyristor à l'état passant
I_{TM}	Courant crête
V_{TM}	Chute de tension pour I_{TM}

Tableau 1 : Signification des paramètres principaux du thyristor

I.3 Présentation du TRIAC

I.3.1 Commande de charge raccordée au réseau alternatif

Lorsque l'on doit faire fonctionner une charge raccordée au réseau alternatif de distribution (e.g. 230 V – 50 Hz), plusieurs solutions sont possibles [6]. Ces dernières peuvent être utilisées :

- un relais électromécanique (cf. **figure 5 (a)**),
- un pont de diodes et un transistor (cf. **figure 5 (b)**),
- deux transistors et deux diodes (cf. **figure 5 (c)**),
- un TRIAC (cf. **figure 5 (d)**).

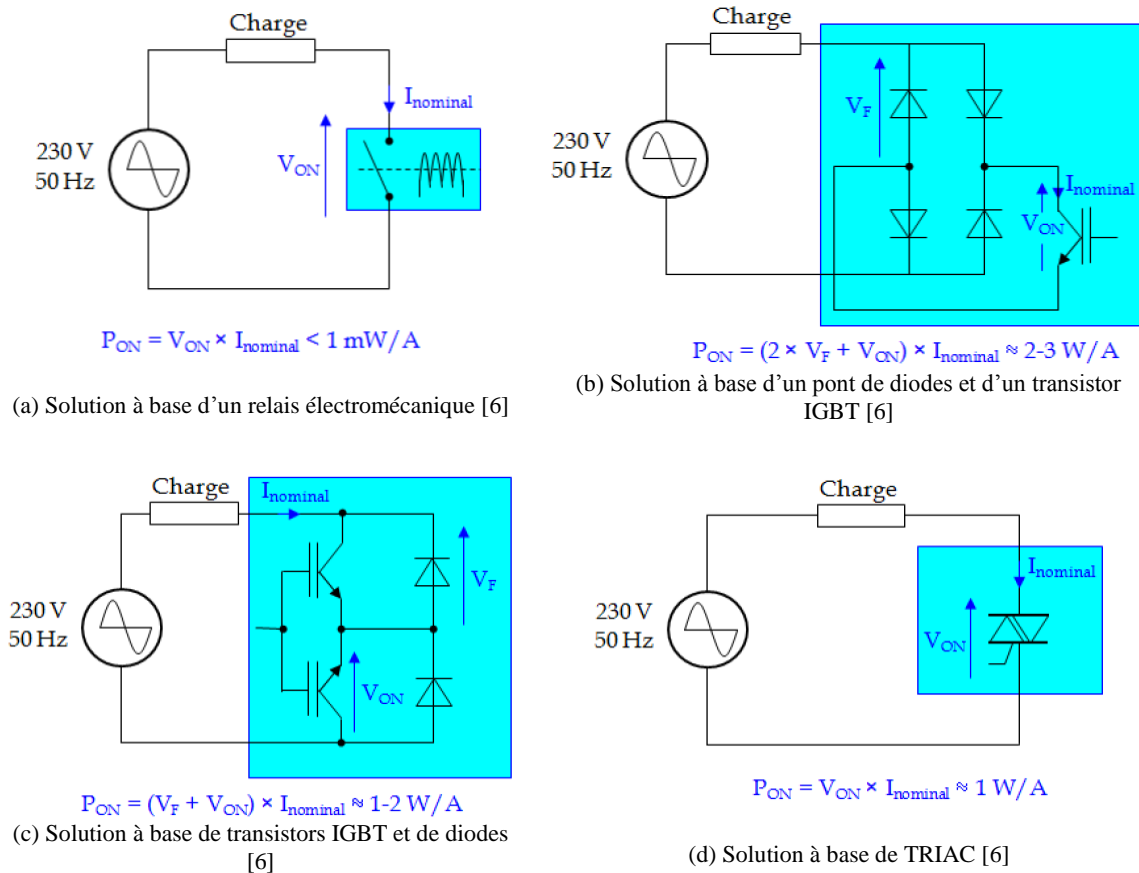


Figure 5 : Exemples de solutions pour commander une charge raccordée à un réseau alternatif [5]

Le TRIAC a donc pour mission de faire fonctionner une charge raccordée au réseau alternatif. Il est utilisé dans de nombreux domaines, notamment dans les applications domestiques (lave-linge, réfrigérateur, aspirateur, etc.), dans le milieu industriel (commande de moteur, postes à souder, etc.), ou encore dans l'éclairage [7].

Les TRIACs sont communément utilisés en raison de leurs grande durée de vie, de leurs résistance aux chocs thermomécaniques et aux vibrations, de l'absence d'étincelle et de bruit acoustique lorsqu'ils commutent. De plus, ils se caractérisent par une faible chute de tension à l'état passant, de la possibilité de les commander par des impulsions de courant et enfin de leurs tenue à la haute tension à l'état bloqué [8].

I.3.2 Symbole et structure semiconductrice du TRIAC

Le TRIAC est un composant équivalant à deux thyristors montés en anti parallèle dont la mise en conduction est assurée par une unique gâchette. La **figure 6** (a) illustre le symbole du TRIAC et la **figure 6** (b) présente le schéma équivalent du TRIAC à base de thyristor.

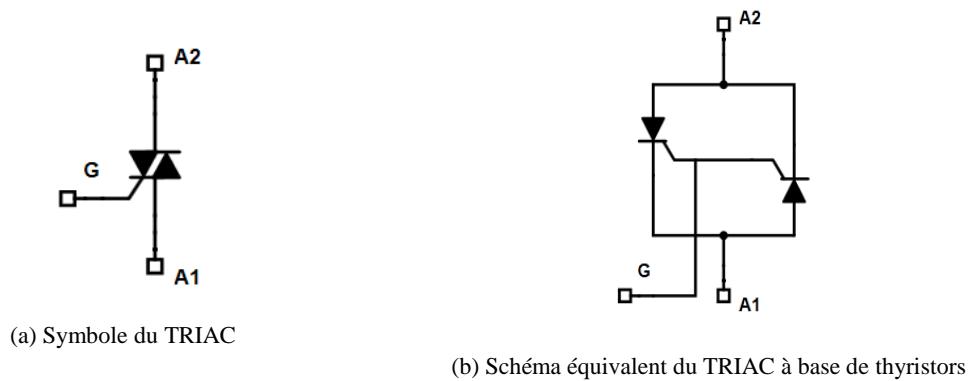


Figure 6 : Symbole du TRIAC (a) et schéma équivalent du TRIAC à base de thyristors

L'association des thyristors est réalisée physiquement à l'aide d'un empilement de quatre couches semiconductrices, dopées alternativement N et P. La structure et la géométrie décrites par F.E. Gentry et Al. [6] dans *Bidirectional triode P-N-P-N switches* sont données à la **figure 7**. Des zones N1 sont diffusées dans la couche P1 pour former le thyristor de puissance TH1 (P2-N2-P1-N1), d'anode P2 et de cathode N1. De même, des zones N3 sont diffusées dans la couche P2 pour former le thyristor de puissance TH2 (P1-N2-P2-N3), d'anode P1 et de cathode N3. La zone centrale de la structure est la gâchette commune à ces deux thyristors. Elle est équivalente à un thyristor auxiliaire (P2-N2-P1-N4). Ce dernier est appelé communément thyristor pilote.

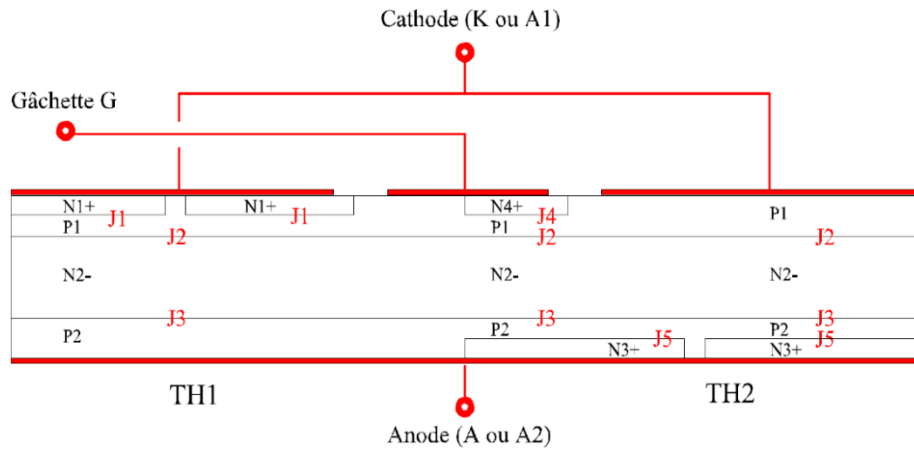
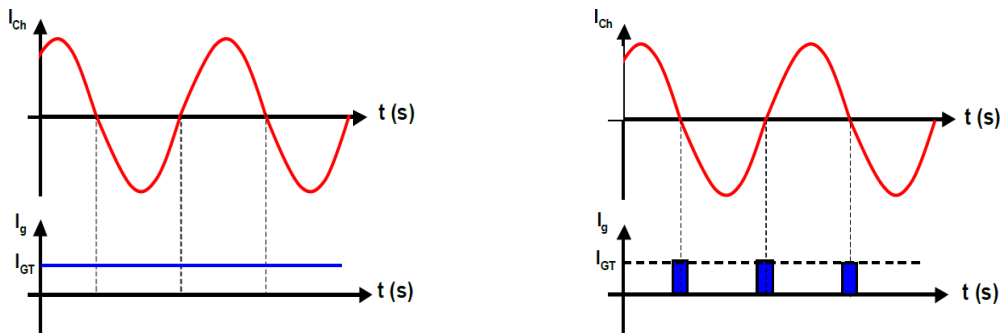


Figure 7 : Structure semiconductrice du TRIAC [4]

Il est important de remarquer qu'il n'y a qu'une gâchette pour commander les deux thyristors. La gâchette est toujours référencée par rapport à l'électrode A1 et de cette façon la symétrie de la structure des deux électrodes n'identifie pas forcément leur rôle dans le fonctionnement du TRIAC. L'électrode A1 est habituellement nommée cathode du TRIAC (même si elle joue le rôle d'anode pour le thyristor TH2) et l'électrode A2 est nommée anode du TRIAC (même si elle joue le rôle de cathode pour le thyristor TH2).

I.3.3 Modes d'amorçage

Un TRIAC est maintenu passant en injectant sur son électrode de gâchette, soit un courant continu (DC) (cf. **figure 8** (a)), soit une impulsion de courant avant chaque annulation du courant de puissance (cf. **figure 8** (b)). Notons que le courant minimal à fournir sur la gâchette pour amorcer le TRIAC est appelé I_{GT} . Le pilotage de ce composant par des impulsions de courant a l'avantage majeur de réduire son énergie de commande. Le blocage s'effectue lors de la disparition du courant de puissance I_{AK} .



(a) Commande par injection d'un courant DC [3]

(b) Commande par impulsions de courant [3]

Figure 8 : Stratégie de commande d'un TRIAC [3]

Le TRIAC peut être déclenché par une impulsion de courant sur l'électrode de gâchette, soit positive (le courant est injecté dans la gâchette), soit négative (le courant est extrait de la gâchette), quelle que soit la différence de potentiels ($V_{AK} = V_A - V_K$) entre l'anode et la cathode. On parle communément de cadrans que l'on annote de 1 à 4 selon la **figure 9**.

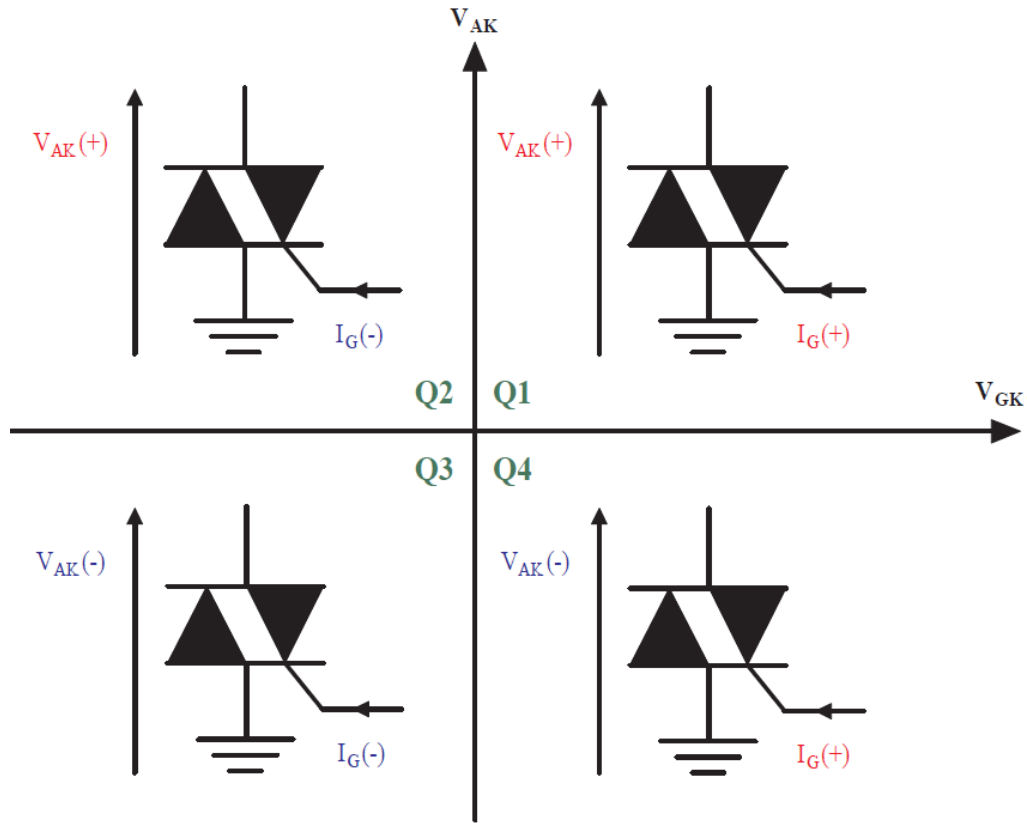
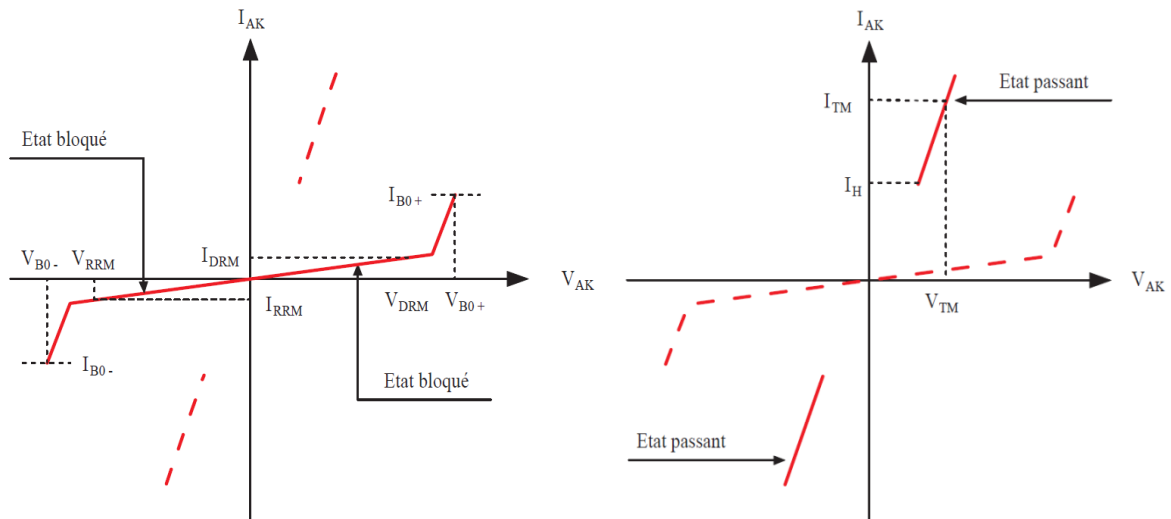


Figure 9 : Quatre cadrans d'amorçage d'un TRIAC [5]

Lorsque le composant est amorcé, il dissipe une puissance au niveau de la puce de silicium qui provient de l'effet conjoint du passage du courant électrique et de la résistivité du silicium. Pour éviter toute dégradation potentielle, cette puissance doit être dissipée afin d'assurer une température de jonction raisonnable. Cette dissipation dépend fortement des propriétés thermiques des matériaux employés et notamment de leurs résistance thermique.

I.3.4 Caractéristique statique du TRIAC

La caractéristique statique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'un TRIAC est donnée à la **figure 10**. Les paramètres qui caractérisent un TRIAC sont placés sur cette même figure.



(a) Caractéristique statique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'un TRIAC à l'état bloqué (OFF) [5] (b) Caractéristique statique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'un TRIAC à l'état passant (ON) [5]

Figure 10 : Caractéristique statique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'un TRIAC à l'état bloqué (a) et à l'état passant (b) [5]

La signification des paramètres notés à la figure ci-dessus se trouve dans le **tableau 2** ci-dessous.

Paramètre	Signification
V_{DRM}	Tension en direct maximum répétitive à l'état bloqué
I_{DRMM}	Courant de fuite à $V_D = V_{DRM}$ spécifié à une température donné
V_{B0+}	Tension de retournement dynamique en direct
I_{B0+}	Courant de retournement pour $V_{AK} = V_{B0+}$
V_{RRM}	Tension en inverse maximum répétitive à l'état bloqué
I_{RRM}	Courant de fuite à $V_D = V_{DRM}$ spécifié à une température donné
V_{B0-}	Tension de retournement dynamique en inverse
I_{B0-}	Courant de retournement pour $V_{AK} = V_{B0-}$
I_H	Courant de maintien du TRIAC à l'état passant
I_{TM}	Courant crête
V_{TM}	Chute de tension pour I_{TM}

Tableau 2 : Signification des paramètres principaux du TRIAC

I.4 Technologie de fabrication des structures thyristors et TRIACs

I.4.1 Fabrication de la puce (Front End)

La fabrication de la puce correspond à la première phase du cycle de production. Il existe actuellement trois technologies de fabrication :

- Mesa-Glass,
- Top-Glass,
- Planar.

Ces trois technologies qui coexistent sont représentées sur la **figure 11**.

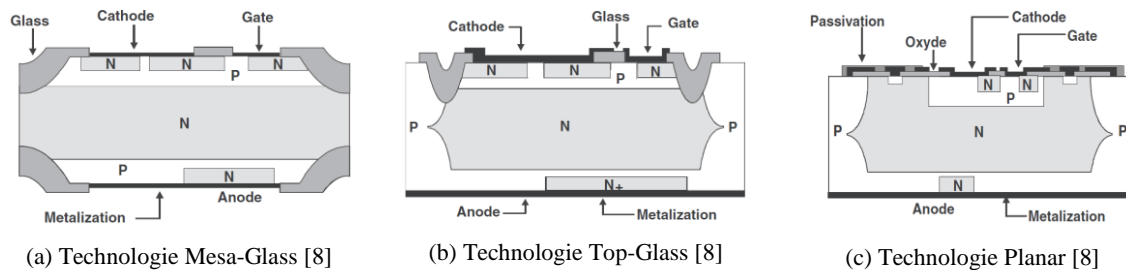


Figure 11 : Technologies de fabrication de la puce TRIAC [7]

La technologie Mesa-Glass a été la première utilisée pour la fabrication de composants électroniques à base de silicium, que ce soit en électronique de signal ou électronique de puissance. Cette technologie reste encore bien adaptée pour la fabrication des composants de moyenne puissance (pour des intensités de courant efficace comprises entre 4 A et 50 A).

Notons que la topologie Top-Glass, appelée aussi Mesa caisson, est une variante de la technologie Mesa-Glass. Elle est plutôt adaptée aux composants à faible calibre en courant (pour des intensités de courant efficace inférieures environ à 4 A).

Quant à la technologie Planar, elle est plutôt dédiée à l'intégration de fonctions logiques et de puissance (faible courant) sur une même puce de silicium.

I.4.2 Assemblage (Back End)

L'assemblage correspond à la seconde phase de la fabrication au cours de laquelle la puce de silicium est montée dans un boîtier, non seulement pour la protéger, mais également pour lui fournir des connexions externes via des fils ou des contacts préformés. Viennent ensuite le test, l'assemblage, la finition et l'emballage.

La compréhension des étapes de l'assemblage sera facilitée par le synoptique proposé sur la **figure 12**. Le lecteur souhaitant approfondir ses connaissances sur sa fabrication est invité à consulter la thèse de S. Moreau [5].

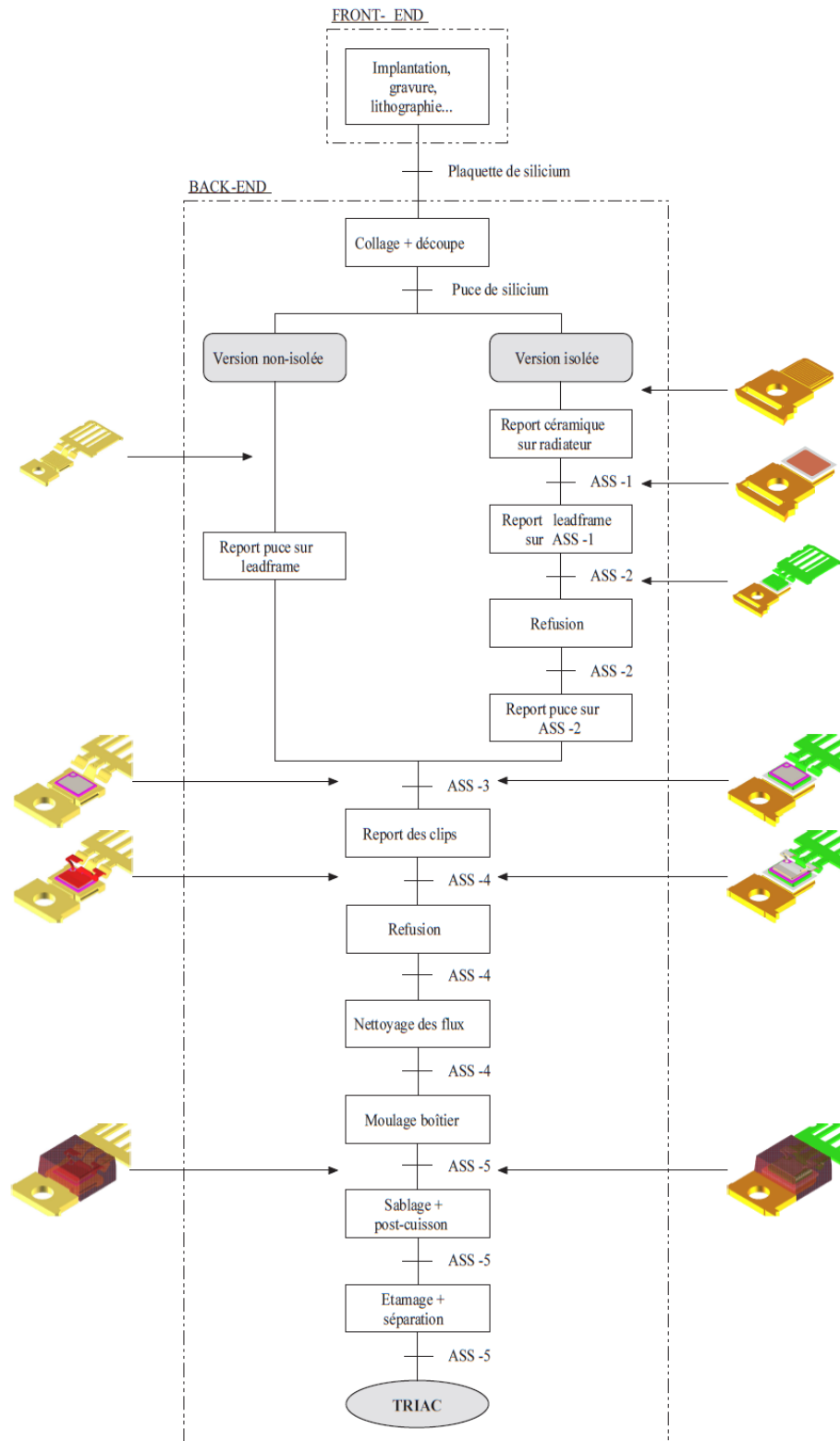


Figure 12 : Procédé d'assemblage d'un TRIAC en version isolée ou non [5]

I.5 Résistance thermique des structures thyristors et TRIACs

La résistance thermique d'un dispositif est la résistance qu'il offre à l'évacuation des calories qui lui sont apportées, ou qu'il génère. Elle est définie entre deux points qui servent de référence de température. Dans le cas d'un composant semiconducteur assemblé dans un boîtier, plusieurs résistances thermiques sont quantifiables en fonction des couches que le flux de chaleur traverse. La **figure 13** illustre ces différentes résistances pour un TRIAC, monté sur un radiateur, qui dissipe à l'état passant une puissance (P_{dis}).

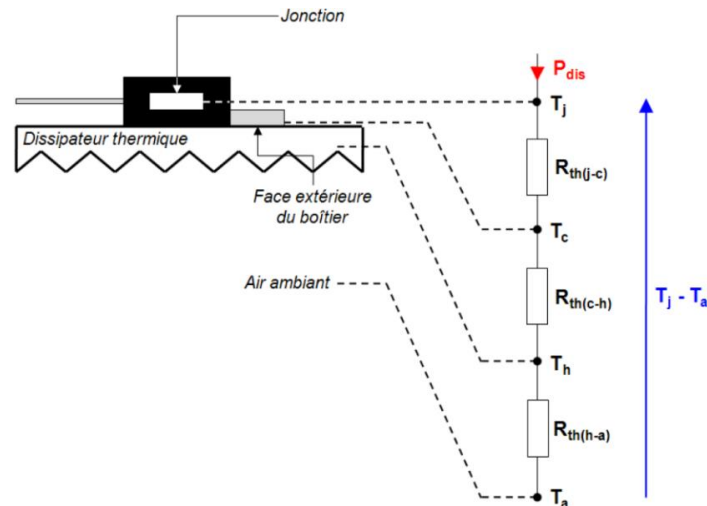


Figure 13 : Notion de résistance thermique sur un thyristor ou un TRIAC [6]

On distingue alors :

- La résistance thermique entre la jonction et le boîtier notée $R_{th(j-c)}$. Elle est définie entre la jonction (dont la température T_j doit être maîtrisée lors du fonctionnement du TRIAC) et la face arrière du boîtier (T_c) ;

$$R_{th(j-c)} = \frac{T_j - T_c}{P_{dis}} \quad \text{Équation 1}$$

- La résistance thermique entre la face arrière du boîtier et le dissipateur thermique notée $R_{th(c-h)}$. Le plus souvent, il s'agit de la résistance de l'interface d'adhésion du boîtier du TRIAC sur le dissipateur thermique (graisse thermique) ;

$$R_{th(c-h)} = \frac{T_c - T_h}{P_{dis}} \quad \text{Équation 2}$$

- La résistance entre le dissipateur thermique et l'air ambiant notée $R_{th(h-a)}$.

$$R_{th(h-a)} = \frac{T_h - T_a}{P_{dis}} \quad \text{Équation 3}$$

Le flux de chaleur, traversant ces trois milieux, voit alors toutes les résistances citées précédemment associées en série. La somme de ces trois résistances thermiques permet de définir la résistance thermique entre la jonction et l'air ambiant, notée $R_{th(j-a)}$.

$$R_{th(j-a)} = R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-a)} = \frac{T_j - T_a}{P_{dis}} \quad \text{Équation 4}$$

Une résistance thermique faible de l'assemblage permettra une meilleure évacuation de l'énergie.

II Notions de fiabilité

II.1 Généralités

II.1.1 Définitions

II.1.1.1 Fiabilité

La fiabilité peut se définir comme « l'aptitude d'une entité ou d'un système à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pour une période de temps donnée » [6]. Par exemple, un fabricant d'aspirateur souhaite que les composants électroniques qu'il contient soient garantis pendant 5 ans dans ses conditions d'utilisation.

II.1.1.2 Défaillance

Une défaillance correspond à la cessation de l'aptitude d'un composant à exercer une fonction requise. Nous pouvons classer les défaillances en trois catégories :

- les défaillances catastrophiques,
- les défaillances paramétriques,
- les défaillances intermittentes.

Dans le cas d'une défaillance catastrophique, la fonction du composant n'est plus du tout assurée.

Dans le cas d'une défaillance paramétrique, la fonction du composant est toujours assurée mais nous pouvons observer des dérives de certains paramètres électriques.

Enfin, dans le cas d'une défaillance intermittente, la fonction du composant n'est assurée uniquement que par plage de temps aléatoire. Ce type de défaillance est souvent dû à des mauvais contacts.

II.1.1.3 Mode de défaillance

Le mode de défaillance correspond alors au symptôme de cette défaillance, c'est-à-dire la façon dont le mécanisme de défaillance se manifeste dans un composant défaillant [9]. Il est intéressant de différencier le mode de défaillance électrique du mode de défaillance physique.

Le mode de défaillance électrique est une signature du défaut physique. Par exemple, ce sera un court-circuit, un circuit ouvert, un courant de fuite trop important où une tension de retournement trop faible...

Le mode de défaillance physique est une anomalie physique sur le composant. Par exemple, ce sera une fusion, une fissure, de la délamination, une rupture de fil [10].

II.1.1.4 Mécanisme de défaillance

Le mécanisme de défaillance associé au mode de défaillance est le processus physique, chimique, électrique ou autre qui a mené à la non-conformité [11]. Délamination, fatigue thermique, électromigration et corrosion sont des exemples de mécanismes de défaillance.

II.1.2 Courbe en baignoire

L'expérience a montré que pour les composants électroniques, la courbe en baignoire (cf. **figure 14**) caractérise le taux de défaillance en fonction du temps (la fraction de pièces défaillante par unité de temps) ($\lambda(t)$).

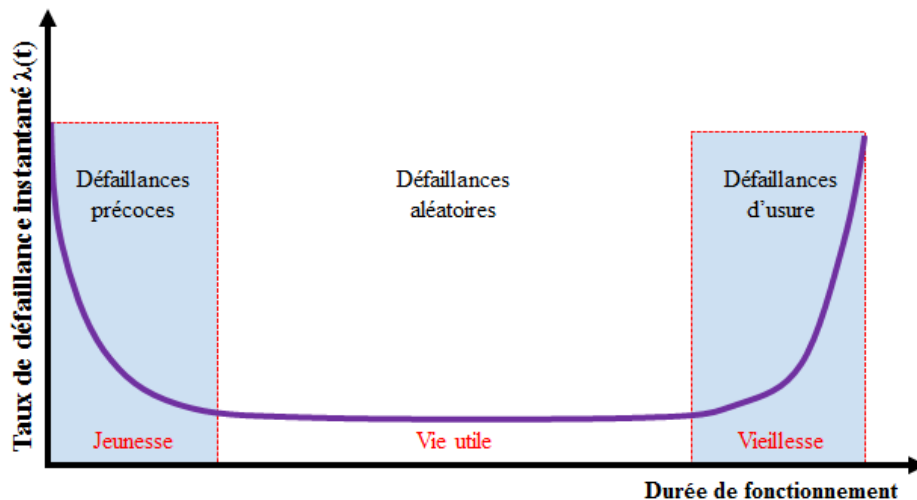


Figure 14 : Courbe en baignoire

La première partie de la courbe appelée période de jeunesse correspond aux erreurs de fabrication ou à un tri final pas assez discriminant. Ce type de défaut existe seulement au début de la durée de vie du composant, et n'est pas détectable électriquement. Dans son utilisation, le défaut peut se développer et devenir détectable électriquement. Au début de cette période, le taux de défaillance est relativement élevé et décroît avec le temps. Les fabricants de semiconducteurs tentent de réduire les défauts de jeunesse par des méthodes de tri ou par l'amélioration des procédés de fabrication.

La seconde partie constitue la période de vie utile des produits. Durant cette période, le taux de défaillance résulte de l'apparition de phénomènes aléatoires tels que des facteurs

environnementaux ou des facteurs humains. Durant la période de vie utile, le taux de défaillance est donc indépendant du temps.

La troisième et dernière partie, appelée période de vieillesse correspond à la période d'usure du composant. Ces défauts correspondent à une usure normale des matériaux employés. Durant cette période, le taux de défaillance croît de façon très rapide.

II.2 Mécanismes de défaillance dépendant du temps pour les structures étudiées

Pour les semiconducteurs, il existe de nombreux mécanismes de défaillance dont certains ont été nommés dans le paragraphe définition. Le lecteur soucieux de se documenter sur ces mécanismes de défaillance ainsi que leurs modèles associés, pourra se reporter à la norme JEP122G [11].

Dans la suite de ce rapport, nous allons nous intéresser uniquement aux mécanismes de défaillance dépendants du temps qui peuvent être concernés par une structure de type thyristor ou TRIAC.

II.2.1 Fatigue thermique

La fatigue est une croissance d'une fissure sous l'effet d'une contrainte mécanique répétée. La croissance de la fissure se réalise en trois étapes :

- initiation de la fissure : durant cette période, il n'y a pas de défaillance possible,
- propagation de la fissure : la longueur de la fissure augmente à chaque cycle,
- fracture : la fissure a atteint une taille critique.

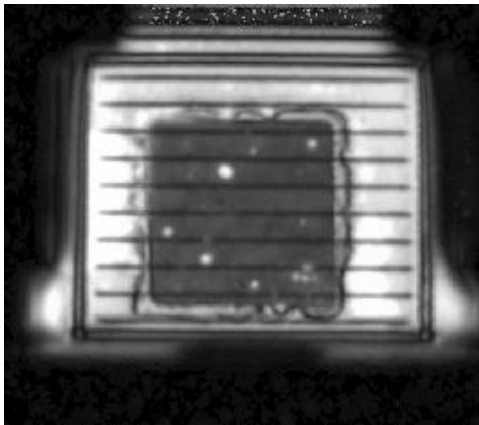
La fatigue thermique est un stress thermomécanique qui a lieu en raison des différences dans les coefficients de dilatation thermique des matériaux (puce, soudure, substrat etc.) et des contraintes répétées des variations de la température induit par l'environnement ou des cycles de puissance.

La **figure 15** illustre un exemple de fracture du talon d'un fil de connexion après 29 760 cycles de température pour une température de boîtier (T_c) de 90 °C et une température de jonction maximale ($T_{j(max)}$) de 170 °C. Dans cet exemple, la fracture du talon et la levée du fil lui-même sont apparues en même temps.

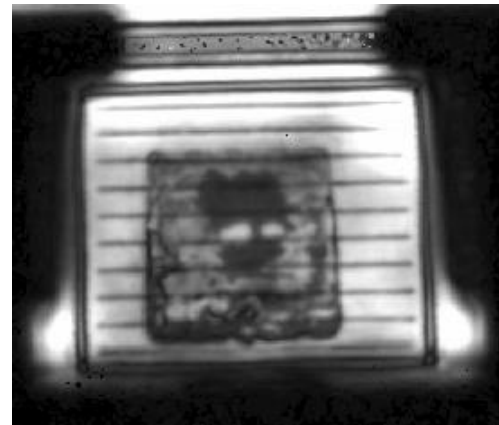


Figure 15 : Fissure du talon du fil en aluminium d'un module à MOSFET après 29 760 cycles de température ($I_0 = 150$ A, $T_c = 90$ °C, $T_{j(max)} = 170$ °C, $T_{ON} = 10$ s, $T_{OFF} = 20$ s) [12]

La **figure 16** illustre des fissures sur le joint de brasure en périphérie de la puce après 50 000 cycles de température pour une température de boîtier (T_c) de 130 °C et une température de jonction maximale ($T_{j(max)}$) de 145 °C.



(a) Pièce de référence non stressé [13]



(b) Présence de fissures sur le joint de brasure [13]

Figure 16 : Fissures du joint de brasure sur une structure TRIAC après 50 000 cycles de température ($I_0 = 18$ A, $T_c = 130$ °C, $T_{j(max)} = 145$ °C, $T_{ON} =$ Non communiqué, $T_{OFF} = 86$ s) [13]

Les surfaces les plus sombres correspondent à la surface de contact entre la puce et la face arrière du composant (cf. **figure 16**).

II.2.2 Time-Dependent Dielectric Breakdown (TDDB)

Le TDDB est un mécanisme de défaillance de plus en plus préoccupant pour les semiconducteurs fortement intégrés du fait de la réduction de l'épaisseur des diélectriques. Cette défaillance a pour origine le passage d'un courant au travers de l'oxyde de silicium susceptible de le dégrader progressivement au point d'aboutir à une rupture localisée.

La **figure 17** illustre de façon schématique le modèle de percolation de dégradation de l'oxyde.

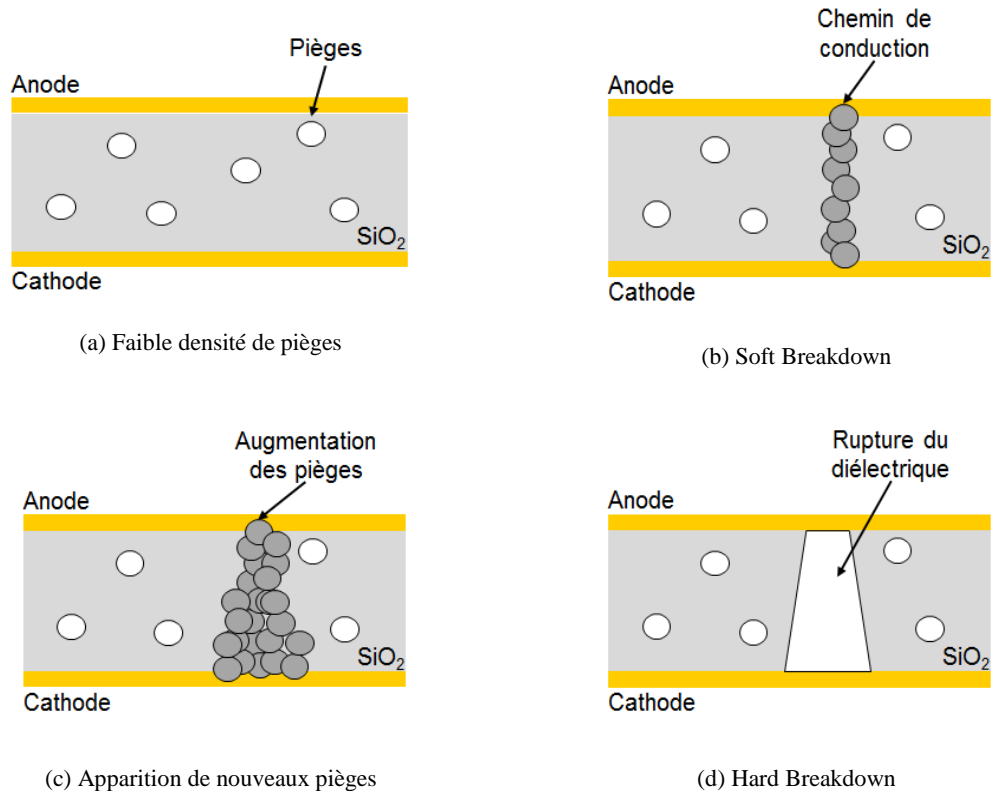


Figure 17 : Étapes de l'apparition des dégradations au niveau du diélectrique sous contraintes TDDB

Le TDDB concerne en premier lieu les couches de diélectriques. La dégradation induite par le TDDB commence quand les pièges se forment à l'interface du silicium et de l'oxyde de silicium. Cette formation de pièges dépend fortement des conditions de polarisation et de stress. Au début, la densité des pièges est relativement faible et aucun chemin de conduction ne peut exister (**figure 16** (a)). Ensuite, lorsque cette génération de pièges augmente, les pièges produits commencent à se chevaucher formant un chemin de conduction entre l'anode et la cathode, ainsi la dégradation du diélectrique commence. Ce type de dégradation est appelé Soft Breakdown (SBD) (**figure 16** (b)). Une fois le chemin de conduction formé, de nouveaux pièges sont créés par dégradations thermiques comme le montre la **figure 16** (c). Au final, la conductance augmente de façon brutale, aboutissant à une rupture localisée de l'oxyde, ce type de défaillance est appelé Hard Breakdown (HBD) (**figure 16** (d)).

II.2.3 Ions mobiles

Lors de la fabrication des composants, la contamination de la surface de la tranche de silicium affecte les caractéristiques des puces de différentes manières. Les composants de technologie MOS notamment souffrent des effets graves tels que la détérioration de la tension d'endurance ou de fluctuation de la tension de seuil si l'oxyde de grille est contaminé.

Les contaminants tels que les métaux ont pour effets de détériorer la tenue en tension des oxydes et de provoquer des fluctuations de la vitesse d'oxydation des métaux. Les métaux lourds ont la particularité, aussi, d'augmenter les fuites au niveau de la jonction. Les éléments du 3^{ème} groupe du tableau des éléments périodiques ont pour effet la conversion en matériau de type P, tandis que les éléments du 5^{ème} groupe ont pour effet la conversion en matériau de type N.

Les plaquettes de silicium résistent à divers produits chimiques et gaz qui contiennent des impuretés et peuvent provoquer une contamination. Un contrôle de la qualité par les fabricants de plaquettes est important, mais les fabricants de semi-conducteurs doivent aussi confirmer les « dires » provenant de fabricants de plaquette lorsque celles-ci sont réceptionnées.

Dans l'atmosphère des salles blanches, différents contaminants peuvent contaminer les plaquettes. En plus de la poussière, l'atmosphère elle-même peut causer de la contamination. Si des composés de phosphore et d'autres métaux sont présents dans la lumière ou l'air, les plaquettes qui sont en contact de l'air peuvent être contaminées. Les plaquettes qui sont sensibles à la contamination doivent être écartées de la production, et les effets de la contamination doivent être surveillés.

Enfin, la poussière produite par les opérateurs contient normalement du sodium, et la contamination de l'oxyde de grille produit de graves effets sur les semi-conducteurs, tels que des fluctuations de la tension de seuil. Il est nécessaire de maintenir des exigences de propreté dans le travail de manière à prévenir la contamination.

II.2.4 Corrosion

La corrosion est une altération d'un matériau par réaction avec un oxydant. La réaction est accélérée par l'application de champs électriques externes car il s'agit d'une réaction électrochimique. Les ions impliqués dans la réaction sont dans ce cas attirés par le champ

électrique et migrent d'une région anodique vers une région cathodique. La présence de certains contaminants comme le chlore, ou le fluor accélèrent le phénomène. Ce type de mécanisme de défaillance est généralement classé en deux catégories :

- la corrosion externe : elle concerne la plage de réceptions des connecteurs (fils, clip) : souvent observé car la plage de passivation ne protège pas la métallisation,
- la corrosion interne à la puce : elle peut être attribuée à la faiblesse de la filière passivation qui pourrait permettre à l'humidité d'atteindre la métallisation.

La corrosion de l'aluminium produit des circuits ouverts, tandis que les métaux lourds comme l'argent, ou l'or croissent et peuvent produire des courts-circuits d'une métallisation à une autre.

II.2.5 Croissance d'intermétallique

Lors de l'étape de soudure des fils sur la puce, une mince couche (intermétallique) peut se former entre l'or et l'aluminium. Lorsque le composant est ensuite exposé à des températures élevées, on observe une croissance de cet intermétallique. La formation d'intermétallique est considérablement accélérée par la présence de contaminants dans l'encapsulation, tels que des halogénures (chlore, brome, fluor), de l'humidité et des températures élevées.

La **figure 18** illustre un exemple de croissance d'un intermétallique or (Au) – aluminium (Al) après un stockage à 150 °C pour une durée de 1 000 heures.

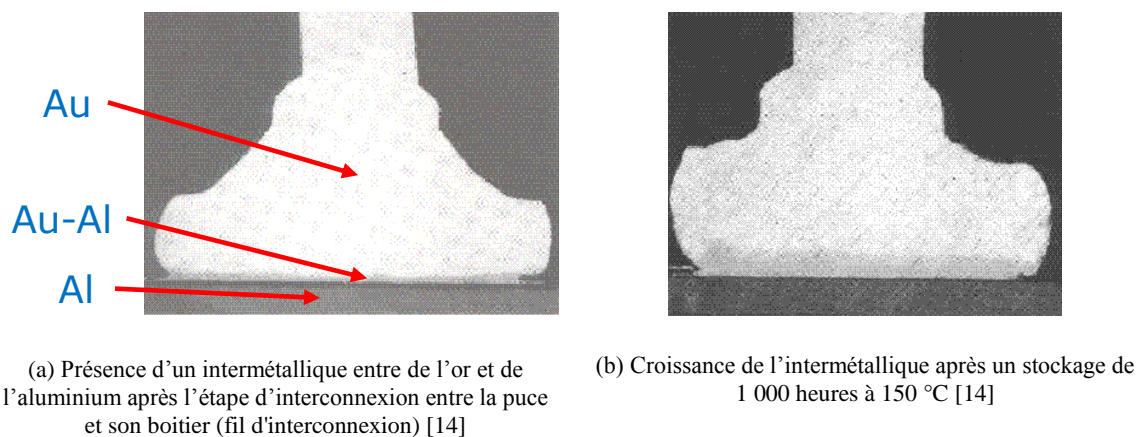


Figure 18 : Croissance d'un intermétallique apparu lors de l'étape d'interconnexion de la puce et de son boîtier après 1 000 heures de stockage à 150 °C [14]

Ce mécanisme de défaillance peut conduire à un circuit ouvert entre la puce et le boîtier en raison de fissures dans l'intermétallique.

Seuls les produits dont la puce est interconnectée avec les broches extérieures par un fil peuvent être impactés par ce mécanisme de défaillance.

II.3 Facteurs d'accélération

II.3.1 Procédés d'accélération

Dans leurs conditions d'utilisation normale, les défaillances des composants peuvent apparaître après plusieurs années d'utilisation. Il est donc inconcevable de réaliser des essais de fiabilité en conditions réelles. C'est pourquoi un des objectifs est d'accélérer le vieillissement des composants et de provoquer une défaillance plus rapidement.

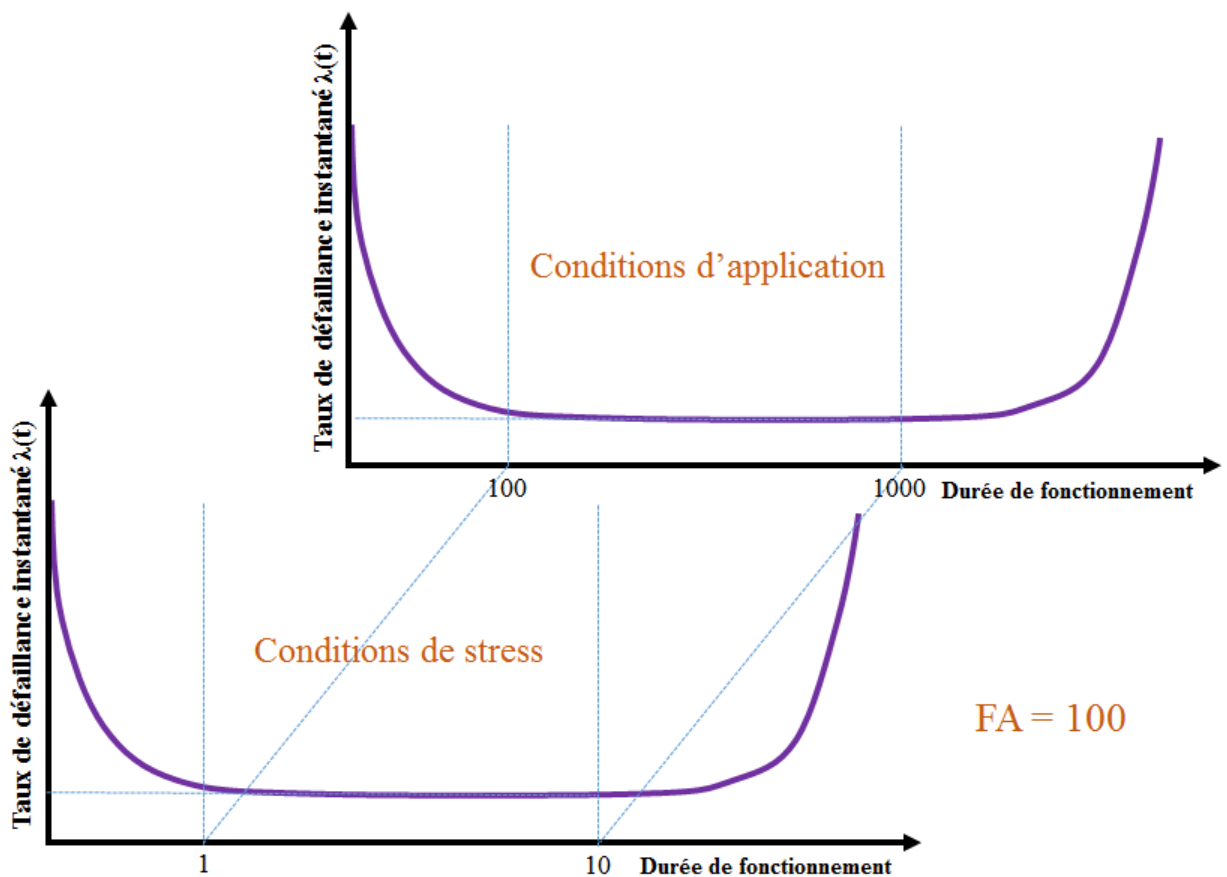


Figure 19 : Effet de l'accélération du temps sur la courbe en baignoire

La **figure 19** est une représentation de l'effet d'accélération du temps sur la courbe en baignoire. L'accélération consiste à faire apparaître des défauts plus rapidement mais en conservant le même mécanisme de défaillance.

Pour un mécanisme de défaillance donné, le facteur d'accélération noté AF ou FA est le rapport entre le temps d'utilisation du composant dans son application et le temps de stress.

Parmi les nombreux facteurs d'accélération qui existent [15], nous allons nous intéresser seulement à l'accélération en température ainsi que l'accélération en tension.

II.3.2 Accélération en température : loi d'Arrhenius

Une augmentation de température permet d'accélérer les processus de transformation chimique. La plupart des mécanismes de défaillance peuvent être accélérés grâce à la température. Le modèle d'Arrhenius est très largement employé en fiabilité lorsque l'endommagement est sensible à la température. La relation d'Arrhenius (cf. **équation 5**) permet de modéliser le temps pour atteindre la défaillance d'un composant, notée TTF, en fonction de la température.

$$TTF = A. e^{-\frac{E_a}{k.T}} \quad \text{Équation 5}$$

où A est une constante à déterminer expérimentalement, E_a est l'énergie d'activation (eV), k est la constante de Boltzmann ($8,617.10^{-5}$ eV.K⁻¹) et T la température (K). Notons que chaque mécanisme de défaillance possède sa propre énergie d'activation.

Le facteur d'accélération en température noté AF_T , entre le temps pour atteindre la défaillance TTF_1 pour une température T_1 et le temps pour atteindre la défaillance TTF_2 pour une température T_2 , est défini par l'**équation 6**.

$$AF_T = \frac{TTF_1}{TTF_2} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad \text{Équation 6}$$

II.3.3 Accélération en tension

« On peut recenser dans la littérature quatre principaux modèles mathématiques décrivant l'évolution des temps de défaillance en fonction de la tension appliquée : le modèle en E, le modèle en 1/E, le modèle en $E^{1/2}$ et le modèle en loi puissance. La plupart de ces modèles sont issus des nombreuses études historiquement réalisées sur l'oxyde de silicium (SiO_2) » [16]. On s'intéressera dans ce rapport aux modèles E, en 1/E et enfin en loi en puissance, la loi en $E^{1/2}$ restant un cas particulier de la loi en puissance.

II.3.3.1 Loi en E

En l'absence d'un modèle expérimental d'accélération en tension, il est recommandé d'utiliser le modèle en E [17]. Ce modèle prédit une évolution exponentielle des temps de défaillance avec le champ électrique appliqué selon l'**équation 7**. Il s'agit d'un modèle pessimiste pour des faibles tensions puisque ce modèle donne des durées de vie plus courtes que les autres lois. Pour des tensions élevées, ce modèle donne aussi des durées de vie plus courtes que les autres lois.

$$TTF = A. e^{-\gamma.E} \quad \text{Équation 7}$$

où A est une constante à déterminer expérimentalement, γ est le facteur d'accélération du champ électrique (en $m.V^{-1}$) et E est le champ électrique ($V.m^{-1}$). Notons que le facteur γ peut-être dépendant de la température et dépend aussi du mécanisme de défaillance.

Le facteur d'accélération en tension noté AF_V , entre le temps pour atteindre la défaillance TTF_1 pour un champ électrique E_1 et le temps pour atteindre la défaillance TTF_2 pour un champ électrique E_2 , est défini par l'**équation 8**.

$$AF_V = \frac{TTF_1}{TTF_2} = e^{\gamma(E_2 - E_1)} \quad \text{Équation 8}$$

II.3.3.2 Loi en 1/E

Le modèle en 1/E fut introduit quelques années après le modèle en E. Il décrit l'évolution des temps de défaillance, toujours selon une loi exponentielle, mais en fonction de l'inverse du champ électrique selon l'**équation 9**.

$$TTF = A. e^{\gamma \cdot \frac{1}{E}} \quad \text{Équation 9}$$

où A est une constante à déterminer expérimentalement, et γ est le facteur d'accélération du champ électrique ($V.m^{-1}$) et E est le champ électrique ($V.m^{-1}$).

Le facteur d'accélération en tension noté AF_V , entre le temps pour atteindre la défaillance TTF_1 pour un champ électrique E_1 et le temps pour atteindre la défaillance TTF_2 pour un champ électrique E_2 , est défini par l'**équation 10**.

$$AF_V = \frac{TTF_1}{TTF_2} = e^{\gamma \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)} \quad \text{Équation 10}$$

II.3.3.3 Loi en puissance

Le modèle en loi puissance est un modèle d'extrapolation souvent rencontré dans les articles traitant de la fiabilité des MOSFET [18]. Le temps de défaillance est donné à l'équation 11.

$$TTF = A.E^{-n} \quad \text{Équation 11}$$

où A est une constante à déterminer expérimentalement, E le champ électrique ($V.m^{-1}$) et n est le facteur de la loi en puissance.

Le facteur d'accélération en tension noté AF_V , entre le temps pour atteindre la défaillance TTF_1 pour un champ électrique E_1 et le temps pour atteindre la défaillance TTF_2 pour un champ électrique E_2 , est défini par l'équation 12.

$$AF_V = \frac{TTF_1}{TTF_2} = \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{-n} \quad \text{Équation 12}$$

II.3.4 Accélération en température et en tension

Il est intéressant parfois d'utiliser plusieurs variables pour accélérer les essais de fiabilité. C'est particulièrement le cas lorsqu'il est connu que deux ou plusieurs variables peuvent contribuer à une défaillance. Utiliser plusieurs variables peut aussi permettre d'accélérer la durée des essais lorsque le niveau de chacune des variables serait trop élevé pour que les essais produisent des résultats dans un temps raisonnable.

Il est d'usage de ne pas prendre en compte de multiples mécanismes de défaillance et de supposer que les facteurs d'accélération sont indépendants et donc de suivre l'hypothèse posée par Eyring [19]. Ainsi, le facteur d'accélération en température et en tension est donné à l'équation 13.

$$AF = AF_T.AF_V \quad \text{Équation 13}$$

où AF_T représente le facteur d'accélération en température et AF_V représente le facteur d'accélération en tension.

II.4 Fonctions pour l'analyse de la fiabilité

Dans cette partie, nous allons présenter les fonctions qui sont utilisées en analyse de fiabilité.

II.4.1 Fonction de fiabilité R(t) et fonction de défaillance F(t)

La fonction de fiabilité ou fonction de survie notée R(t) pour Reliability représente la probabilité qu'un composant choisi au hasard dans une population étudiée n'ait pas de défaillance avant l'instant t. L'équation 14 donne l'expression mathématique de R(t)

$$R(t) = \frac{n - r(t)}{n} \quad \text{Équation 14}$$

où n est le nombre total d'échantillons sans défaut à t = 0 et r(t) le nombre d'échantillons défaillants à la période t.

$$R(0) = 1 \text{ et } \lim_{t \rightarrow +\infty} R(t) = 0 \quad \text{Équation 15}$$

La fonction défaillance notée F(t) pour Failure représente la probabilité qu'un composant choisi au hasard dans la population étudiée ait une défaillance à l'instant t. L'équation 16 donne l'expression mathématique de F(t).

$$F(t) = \frac{r(t)}{n} \quad \text{Équation 16}$$

$$F(0) = 0 \text{ et } \lim_{t \rightarrow +\infty} F(t) = 1 \quad \text{Équation 17}$$

En outre, la relation entre la fonction de défaillance et la fonction fiabilité est définie par l'équation 18.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad \text{Équation 18}$$

En outre, comme le montre la figure 20, la fonction R(t) est une fonction monotone et décroissante et la fonction F(t) est une fonction monotone et croissante.

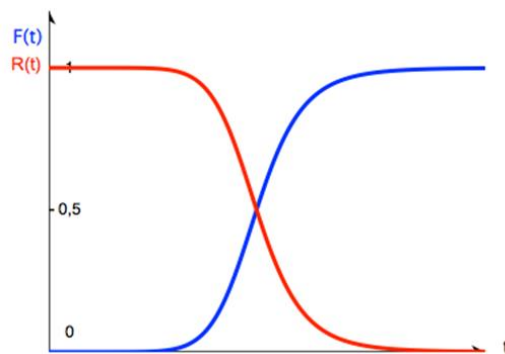


Figure 20 : Relation entre F(t) et R(t)

II.4.2 Densité de probabilité f(t)

Si tous les composants étaient fabriqués et stressés de manière identique, alors ils deviendraient tous défailant simultanément. Or les variations lors des procédés de fabrication font que les composants deviennent défailants à différents instants.

La densité de probabilité de défaillance notée $f(t)$ exprime le nombre de défauts dans un intervalle de temps. Il s'agit du rapport entre le nombre de pièces défailantes sur un intervalle de temps $t + \Delta t$ par rapport à la quantité de pièces totales.

L'équation 19 montre l'expression de la densité de probabilité $f(t)$.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad \text{Équation 19}$$

Comme on peut le voir à partir de la précédente équation, la fonction de fiabilité $R(t)$ et la fonction de défaillance $F(t)$ peuvent être calculées en prenant l'intégrale de la fonction densité de probabilité $f(t)$.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad \text{Équation 20}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{+\infty} f(t) dt \quad \text{Équation 21}$$

La figure 21, montre une représentation de la densité de probabilité $f(t)$.

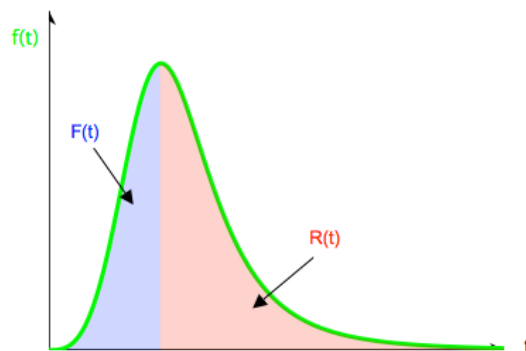


Figure 21 : Densité de probabilité $f(t)$

Un intérêt de cette fonction est de voir comment se distribuent les défaillances autour de la moyenne de tenue du composant. Si la distribution est serrée, alors tous les composants sont touchés par un défaut après une utilisation très proche de l'utilisation moyenne.

II.4.3 Taux de défaillance instantané $\lambda(t)$

Le taux de défaillance en fonction du temps, noté $\lambda(t)$ où $h(t)$ se définit comme la fraction de pièces défectueuses par unité de temps.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{Équation 22}$$

Chaque information telle que $f(t)$, $R(t)$ ou $\lambda(t)$ possède son équivalent. En utilisant les informations décrites précédemment (**équations 19, 20, 21 et 22**), il est possible de calculer $R(t)$, $f(t)$ et $\lambda(t)$.

Celui-ci est souvent utilisé pour exprimer la fiabilité des semiconducteurs. Le calcul du taux de défaillance instantané est très précis d'un point de vue théorique, mais en pratique, il n'est pas aisé de calculer le taux de défaillance à un instant précis sur une courte période.

La valeur du taux de défaillance moyen est exprimé en % par 1 000 heures de fonctionnement ou en ppm / 1 000 heures. On utilise communément le FIT (Failure In Time) pour exprimer le taux de défaillance.

$$1 \text{ FIT} = 1 \cdot 10^{-9} / \text{h} = 1 \text{ ppm} / 1\,000 \text{ h}$$

Toutefois, si le taux de défaillance est de 100 FIT, la probabilité correspondant à la défaillance est de 1 sur 10^7 heures de fonctionnement ; cela ne signifie pas que la vie d'un unique composant est de 10^7 heures.

Il est important de comprendre que le temps de fonctionnement total est égal au produit du nombre réel de composants testés par le temps réel de fonctionnement.

II.4.4 Critères de durée de vie

Tout comme le taux de défaillance, le TTF (Time To Failure), est couramment utilisé. Le TTF est défini tel que le temps jusqu'à ce qu'une défaillance se crée sur le composant à partir du moment où il a commencé à être utilisé.

De manière générale, les semiconducteurs ne peuvent pas être réparés, entretenus et réutilisés une fois qu'une défaillance survient. Par conséquent, ils peuvent être qualifiés de non réparable. Le temps moyen pour les composants non réparables à atteindre la défaillance est défini par le MTTF (Mean Time To Failure) peut être exprimé par l'**équation 23**.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad \text{Équation 23}$$

II.4.5 Distributions utilisées en analyse de fiabilité

L'analyse de survie est une méthode qui permet d'estimer la fonction de survie à partir d'échantillons. Il y a deux types de méthodes : la méthode paramétrique qui estime la fiabilité en prenant pour hypothèse la distribution et la méthode non paramétrique qui ne prend pas de distribution comme hypothèse. Cependant, les analyses de données pour les semiconducteurs utilisent la méthode paramétrique qui est plus précise. Les distributions utilisées pour analyser la survie des composants sont décrites dans les parties suivantes.

II.4.5.1 Distribution normale

La distribution normale est une distribution utilisée typiquement lors des contrôles qualité. En analyse de survie, elle est rarement utilisée, bien qu'elle puisse être appliquée en période de vieillesse, lorsque les défaillances apparaissent concentrées autour d'un certain temps. En revanche, la loi normale est idéale pour modéliser une dispersion de mesure, lors de l'analyse des paramètres électriques des composants. La densité de probabilité $f(t)$ est décrite dans l'équation 24.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Équation 24}$$

où σ est l'écart-type (variance) et μ la moyenne de la distribution.

Comme le montre la **figure 22**, la densité de probabilité $f(t)$ d'une distribution normale présente une courbe en cloche centrée autour de la valeur moyenne μ . De plus, la probabilité que la valeur t soit dans les intervalles $\pm \sigma$, $\pm 2 \sigma$ et $\pm 3 \sigma$ de chaque côté de la moyenne μ est respectivement 68,2 %, 95,4 % et 99,6 %.

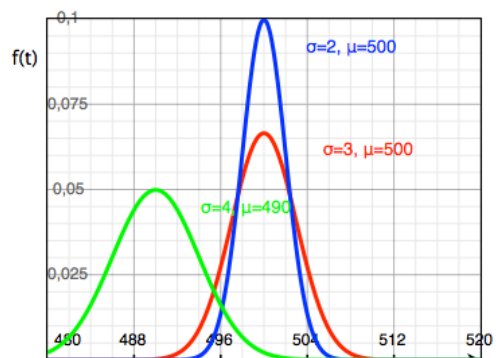


Figure 22 : Densité de probabilité $f(t)$ d'une distribution normale pour différentes valeurs de σ et de μ

Le théorème de la limite centrale suggère que toute somme de variables aléatoires indépendantes est identiquement distribuées tend vers une variable aléatoire gaussienne (comme des erreurs de mesure) ; c'est pourquoi la distribution normale est idéale pour modéliser une dispersion de mesure.

II.4.5.2 Distribution log-normale

La distribution en log-normale est une distribution fonction du logarithme népérien du temps. La densité de probabilité de défaillance $f(t)$ et la fonction de défaillance $F(t)$ s'expriment ainsi :

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2} \quad \text{Équation 25}$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma} \right)^2} dx \quad \text{Équation 26}$$

où σ est l'écart-type (variance) des logarithmes népériens des temps de défaillance, et μ la moyenne des logarithmes népériens des temps de défaillance. Le paramètre μ permet d'obtenir la durée de vie à 50 % de dégradation. σ est très important car il nous donne des indications sur la nature des défauts. Les phénomènes d'usure sont mis en évidence lorsque l'écart-type est inférieur à un. Un écart-type supérieur à un implique des défaillances de jeunesse responsables de la mortalité infantile.

La **figure 23** présente la densité de probabilité de défaillance d'une distribution log-normale pour différentes valeurs de σ et de μ .

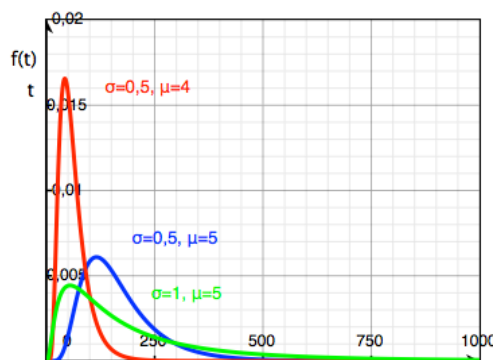


Figure 23 : Densité de probabilité $f(t)$ d'une distribution log-normale pour différentes valeurs de σ et de μ

Dans le cas d'une distribution log-normale, le paramètre μ correspond à la valeur du MTTF.

II.4.5.3 Distribution en exponentielle

La distribution exponentielle est couramment employée durant la période où le taux de défaillance est constant. La densité de probabilité de défaillance $f(t)$ et la fonction de défaillance $F(t)$ s'expriment ainsi :

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{Équation 27}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{Équation 28}$$

où λ est le paramètre d'échelle.

La **figure 24** montre la densité de probabilité de défaillance en fonction du temps d'une distribution exponentielle d'une telle distribution pour différentes valeurs du paramètre d'échelle.

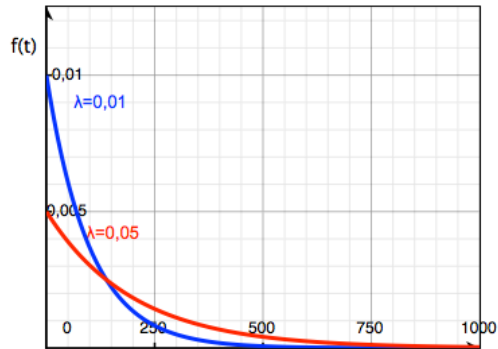


Figure 24 : Densité de probabilité $f(t)$ d'une distribution exponentielle pour différentes valeurs de λ

Dans le cas d'une distribution exponentielle, la valeur $1/\lambda$ correspond à la valeur du MTTF.

À l'aide de l'**équation 28**, on obtient l'équation suivante :

$$F(t = MTTF) = F\left(t = \frac{1}{\lambda}\right) = 1 - e^{-\lambda \frac{1}{\lambda}} = 0,632 \quad \text{Équation 29}$$

De l'**équation 29**, on déduit qu'à l'instant $t = MTTF$, 36,8 % de la population est encore bonne ou que le temps de vie moyen de défaillance est obtenue lorsque 63,2 % de la population est défaillante.

II.4.5.4 Distribution de Weibull

Dans le monde de la fiabilité, c'est la distribution Weibull qui est couramment employée en raison de sa polyvalence et de sa capacité à modéliser les 3 périodes de la vie d'un composant (cf. **figure 14**). La densité de probabilité de défaillance $f(t)$, la fonction de défaillance $F(t)$ sont exprimées respectivement dans les **équations 30** et **31**.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Équation 30}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Équation 31}$$

où β est le paramètre de forme, η est le paramètre d'échelle et γ le paramètre de position. Dans la plupart des cas, la probabilité de défaillance à $t = 0$ est nulle. On a donc $\gamma = 0$ et la probabilité de défaillance $f(t)$, et la fonction de défaillance $F(t)$ s'expriment plus simplement par les **équations 32 et 33**.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Équation 32}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Équation 33}$$

La **figure 25** montre la densité de probabilité de défaillance en fonction du temps d'une distribution exponentielle et la **figure 28** le taux de défaillance d'une telle distribution pour différentes valeurs du paramètre d'échelle.

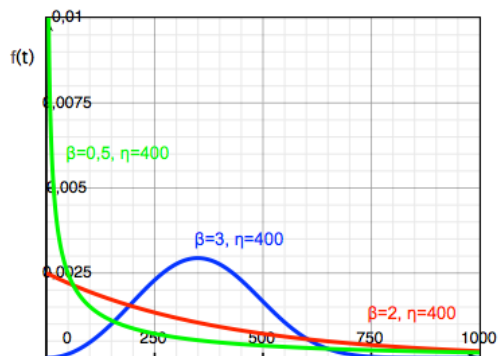


Figure 25 : Densité de probabilité $f(t)$ d'une distribution de Weibull pour différentes valeurs de β

On distingue 3 cas sur le paramètre de forme β (cf. **figures 25**) :

- $\beta < 1$: le taux de défaillance $\lambda(t)$ est décroissant. Ce cas est utilisé pour faire l'analyse de la mortalité infantile,
- $\beta = 1$: le taux de défaillance $\lambda(t)$ est constant. La loi de Weibull est réduite à une loi exponentielle,
- $\beta > 1$: le taux de défaillance $\lambda(t)$ est croissant. Ce cas est utilisé pour faire l'analyse des mécanismes de défaillances.

Quant au paramètre d'échelle η , il correspond directement à la valeur du MTTF à 63,2 % de la population défaillante.

III Thyristors et TRIACs à l'état bloqué

III.1 Contraintes normatives

III.1.1 Description de l'essai de HTRB

Le TRIAC apparait à l'état bloqué dans de nombreuses applications. Si cet état se prolonge, à des températures de jonction proches de la température maximum spécifiée par le constructeur (souvent 125 °C ou 150 °C), le courant de fuite traversant la structure peut induire une instabilité des caractéristiques électriques due à l'échauffement thermique non uniforme, entraînant une défaillance sur le composant. [20].

Pour un thyristor, lorsqu'une polarisation est appliquée entre l'anode (A) et la cathode (K), sans tension sur la gâchette (G), le composant est bloqué. Lorsque cette tension est positive, le courant traversant la structure est appelé courant de fuite et est noté I_{DL} (cf. **figure 26** (a)). Lorsque cette tension est négative, le courant traversant la structure est appelée aussi courant de fuite et est noté I_{RL} (cf. **figure 26** (b)).

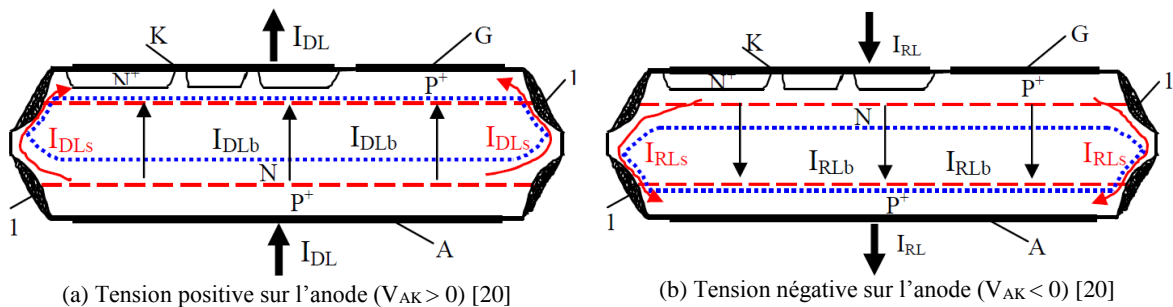


Figure 26 : Courant de fuite dans un thyristor avec passivation en verre pour V_{AK} positif et V_{AK} négatif [20]

Dans le cas d'une puce TRIAC en silicium, ce sont les deux structures thyristors qui sont traversées par le courant de fuite.

Avant d'introduire ces composants sur le marché, des essais de blocage à haute température sont réalisés de manière à évaluer la contamination ionique, le vieillissement des oxydes et éventuellement de révéler des défauts en surface de la puce [21].

Pour des TRIACs ou des thyristors, le blocage peut s'effectuer à l'aide d'une source de tension alternative sinusoïdale (cf. **figure 27**) ou à l'aide d'une source de tension continue (cf. **figure 28**).

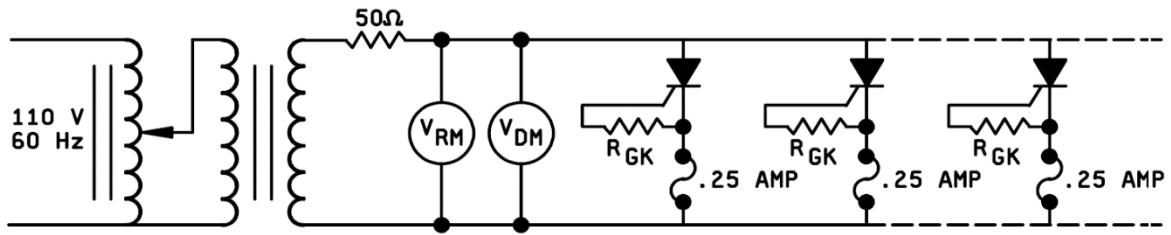


Figure 27 : Circuit de blocage alternativement en direct et en inverse en tension alternative sinusoïdale [22]

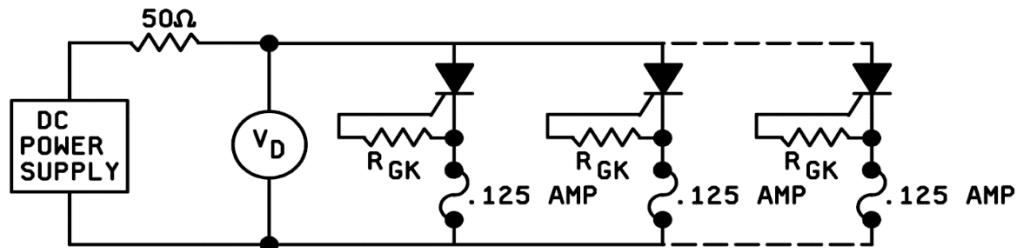


Figure 28 : Circuit de blocage en direct en tension continue [22]

III.1.2 Exigences normatives

Lorsqu'un nouveau composant électronique est introduit sur le marché, il doit répondre à une série de tests de fiabilité afin que chaque industriel s'assure que le composant remplisse tous les critères d'acceptation exigés. Les normes et standards ont l'avantage d'être acceptés communément par l'ensemble des acteurs industriels du marché du semiconducteur et de pouvoir évaluer la fiabilité des composants.

Les normes utilisées pour qualifier les composants électroniques s'appuient sur les trois systèmes de normalisation suivants :

- JEDEC (" Joint Electron Device Engineering Council "),
- MIL-STD (" Military Standard "),
- AEC (" Automotive Electronics Council ").

Des différences existent dans les procédures de qualifications, notamment sur les conditions de stress, les critères de défaillances et le nombre d'échantillons. C'est notamment le cas pour les essais de type HTRB¹ sur la manière d'effectuer les mesures électriques, sur les conditions de stress ainsi que la durée du stress.

¹ HTRB : High Temperature Reverse Bias (blocage en haute température).

De plus, pour les essais de blocage en température, les critères de défaillances varient entre les normes JESD22-A108 [23], MIL-STD750 [22] et AEC-Q101 [24]. Une compréhension approfondie des exigences et l'application de chaque norme et spécification est indispensable pour réussir un programme de qualification en fiabilité [25].

Pour qualifier ses produits et réaliser ses essais de blocage, STMicroelectronics s'appuie sur sa propre spécification [21] qui tient compte des contraintes définies par les normes JEDEC, MIL-STD et AEC. Les essais sont ainsi réalisés à la température de jonction maximum et la tension de polarisation est égale à 80 % de la tension V_{DRM} ou V_{RRM} en DC et 100 % de la tension V_{DRM} ou V_{RRM} en AC.

III.1.3 Vers une fiabilité orientée mécanisme de défaillance

La norme JESD47 [26] décrit un ensemble de bases de tests de qualification pour les composants électroniques. Cette norme précise les tests à effectuer pour la qualification de nouveaux produits, ou pour une modification d'un procédé de fabrication existant. Dans le cadre d'une requalification ou d'un changement apporté au produit, le choix des essais est fait en accord avec la table donnée en **annexe 1** [17]. La norme distingue deux grandes familles d'essais de fiabilité :

- les essais orientés puce,
- les essais orientés boîtiers.

Les échantillons retenus doivent appartenir au moins à trois lots qui sont fabriqués non consécutivement afin que ceux-ci soient représentatifs de la variabilité de chacun des lots. Chaque prélèvement de la ligne de fabrication doit être de quantité équivalente. La taille de l'échantillonnage exigée est fonction des essais. De plus, la norme précise les conditions de stress à appliquer durant l'évaluation. Tous les échantillons doivent être fabriqués et / ou assemblés sur le même site de fabrication mais également doivent utiliser le même procédé de fabrication. Pour chaque essai de fiabilité, le critère d'acceptation est d'avoir zéro défaut. Dans cette approche, les essais de fiabilité pour qualifier un produit sont réalisés de façon standard et uniforme : finalement, « le composant est pratiquement considéré comme une « boîte noire » et les essais de fiabilité sont appliqués suivant une « recette » » [27].

La fiabilité orientée stress montre donc ses limites puisqu'elle ne tient compte ni de l'application, ni des conditions environnementales où le composant va être utilisé. De plus, lorsqu'un défaut apparaît, ce type d'approche ne renseigne ni l'instant où le produit ne remplit plus correctement ses fonctions, ni sur les faiblesses d'une technologie. En

conséquence, cette méthode ne permet pas de comparer si une technologie est meilleure qu'une autre.

Une fiabilité fondée sur la connaissance des mécanismes de défaillance est une approche qui diffère de l'approche précédente. Celle-ci s'appuie sur des informations complémentaires au cours de la qualification du produit. Cette méthodologie nécessite de connaître les applications, les conditions d'utilisation, les potentiels mécanismes de défaillances et les lois d'accélération pour le mécanisme de défaillance considéré.

Dans une approche orientée mécanisme de défaillance, il n'existe pas de plan de qualification prédéfini, mais plutôt un cadre d'ensemble qui se définit au travers des normes, des publications et des documents qui contribuent aux connaissances acquises lors d'une approche orientée stress. Une procédure de qualification typique basée sur la compréhension des mécanismes de défaillance peut être résumée dans le **tableau 3**. Le lecteur soucieux d'obtenir des informations complémentaires pourra se reporter sur la norme JESD94 [28].

Étape 1	Détermination des exigences de l'application finale (gamme d'utilisation, environnement, durée de vie, conditions de fabrication).
Étape 2	Identification des risques potentiels, souvent à travers une analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC). Cette étape peut être complétée par une simulation du produit dans son environnement.
Étape 3	Identification des mécanismes de défaillance.
Étape 4	Sélection des véhicules tests. Il s'agit d'une structure qui utilise la même technologie que le produit à qualifier, sans en avoir la fonctionnalité.
Étape 5	Définition du plan de qualification de fiabilité par une sélection pertinente des essais inscrits dans norme JESD47 [26] à travers l'analyse des modes de défaillances. La taille des échantillons, les conditions de stress, la durée des stress peut être modifiée en fonction des lois d'accélération, mais aussi des exigences de l'application finale. Si nécessaire, d'autres essais peuvent être réalisés de manière à valider le modèle en cours de développement.
Étape 6	Évaluation de la performance du produit en termes de fiabilité par rapport aux exigences de l'application finale.

Tableau 3 : Résumé d'une procédure de qualification typique basée sur la compréhension des mécanismes de défaillance

Un plan de qualification orienté mécanisme de défaillance permet plus de flexibilité qu'une approche orientée stress. Celle-ci nécessite aussi la compréhension des mécanismes de défaillances, des lois statistiques, des lois d'accélération et la connaissance des boîtiers, des composants et de leurs applications. Une qualification orientée mécanisme de défaillance ne peut être réussie uniquement qu'avec une bonne connaissance de ses éléments.

III.2 Impact de la température sur les paramètres du composant à l'état bloqué

Avant de commencer des essais, il est nécessaire d'étudier le comportement des structures thyristors et TRIACs à l'état bloqué vis-à-vis de la température. En effet, « la température de fonctionnement est un paramètre fondamental dans la détermination du fonctionnement des dispositifs à semiconducteurs » [29].

D'après la littérature, trois cas sont à considérer :

- la tenue en tension et le retournement dynamique,
- l'emballement thermique,
- l'immunité aux variations rapides de tension.

Nous nous intéresserons uniquement aux deux premiers cas, puisque, lors des essais de type HTRB, au cœur de cette étude, les composants ne sont pas soumis à des variations rapides de tensions.

III.2.1 Tenue en tension et retournement dynamique

La tension aux bornes d'un thyristor ou d'un TRIAC doit toujours être inférieure à la tension maximum de blocage, que ce soit en direct (V_{DRM}) ou en inverse (V_{RRM}). La technologie de ces composants est optimisée pour fonctionner dans des conditions stables jusqu'au V_{DRM} et V_{RRM} . Au-delà de ces valeurs, des dégradations pourraient survenir.

Si la tension aux bornes du composant approche la tension V_{BO} , le composant peut devenir passant. Le composant risque alors de subir un échauffement de température incontrôlé et des points chauds pourraient alors être la cause d'une puissance instantanée très élevée, non uniformément distribuée à travers la surface de la jonction. C'est la raison pour laquelle ce phénomène pourrait causer une dégradation du thyristor ou du TRIAC.

Les tensions de retournement V_{BO+} et V_{BO-} ont été mesurées pour un TRIAC XX A à différentes températures de jonction variant de 80 °C à 160 °C. La **figure 29** montre que plus la température de jonction est élevée, moins est grande la tenue en tension (par

exemple 1 187 V à 80 °C et 911 V à 160 °C pour le V_{BO+}). Ce comportement est dû à l'augmentation du courant de fuite en fonction de la température. Cela facilite un point d'amorçage du TRIAC à des niveaux de tension inférieurs à la tension réelle d'avalanche qui elle augmente avec la température.

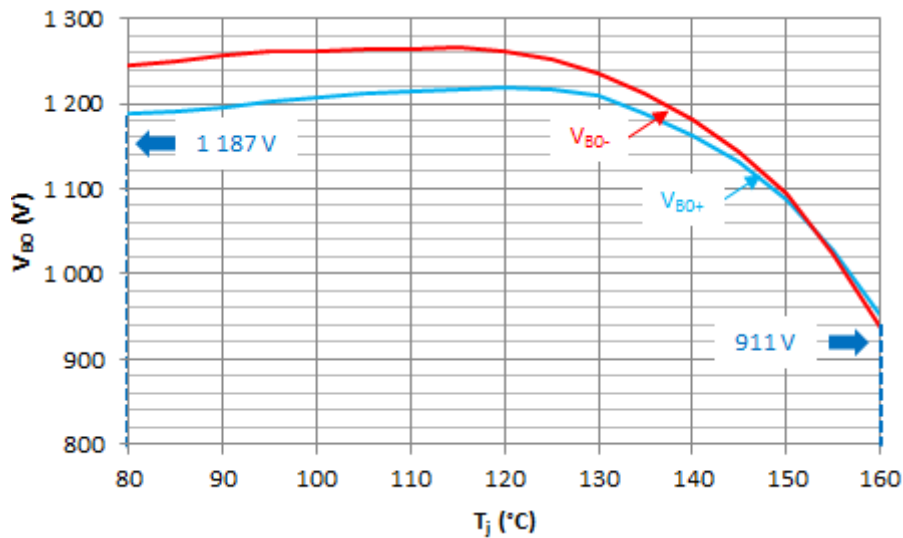


Figure 29 : Tensions de retournement V_{BO+} et V_{BO-} en fonction de la température de jonction (TRIAC XXXXX-XXXXXXX/X : XX A, XXX V, $I_{GT} = 35$ mA, $T_{j(max)} = 125$ °C, boîtier TO220 non isolé)

En conséquence, si la température de jonction devient trop élevée, le TRIAC peut devenir passant par retournement de tension ; dans le cas du XXXXX-XXXXXXX/X, ce phénomène peut apparaître, dans le cas d'une tension alternative du secteur à des températures bien supérieures à 160 °C.

Ce phénomène peut directement impacter les essais de blocage puisque la tension est appliquée sur le composant alors que le composant est enfermé dans une enceinte maintenue à haute température.

III.2.2 Emballement thermique

À l'état bloqué, le thyristor ou le TRIAC est parcouru par un courant résiduel appelé courant de fuite. Les courants de fuite en modes direct (I_{DRM}) et inverse (I_{RRM}) sont généralement spécifiés par le constructeur. Pour une simple jonction P-N au silicium polarisé en inverse, le courant de fuite noté I_s car très proche du courant de saturation, est défini par l'équation suivante :

$$I_s(T) = A \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}} \quad \text{Équation 34}$$

où A est un coefficient numérique qui dépend de la jonction [30], E_g est la bande interdite¹ (1,12 eV pour le silicium), k la constante de Boltzmann ($8,617.10^{-5}$ eV.K⁻¹) et T la température (K).

En dérivant l'équation précédente, il en vient :

$$\frac{d(I_s(T))}{dT} = \frac{I_s}{T} \left(3 + \frac{E_g}{k.T} \right) \quad \text{Équation 35}$$

ce qui donne pour le silicium, à T = 300 K, $\Delta I_s / I_s = 0,15 \Delta T$. Ainsi, l'intensité I_s est multipliée par deux tous les 7 °C environ pour une jonction P-N au silicium.

L'expression du courant de fuite en mode inverse pour le TRIAC I_R suit une loi exponentielle qui dépend de la température de jonction (T_j) pour une tension (e.g. V_R) donnée.

$$I_R(T_j) = I_{R@T_{j(max)}} \cdot e^{C \cdot (T_j - T_{j(max)})} \quad \text{Équation 36}$$

où $I_{R@T_{j(max)}}$ est le courant de fuite (A) à la température de jonction $T_{j(max)}$, $T_{j(max)}$ est la température de jonction spécifiée par le constructeur (°C) et le coefficient C est évalué empiriquement (C⁻¹).

La **figure 33** illustre, pour un XXXXX-XXXXXXX/X de calibre XX A, l'évolution du courant de fuite (échelle logarithmique) en mode inverse (I_R) en fonction de la température de jonction (T_j) et de la tenue tension (V_R). Quelle que soit la tension donnée, nous observons que le courant de fuite augmente d'environ 13,52 μ A par degré (e.g. pour une tension de 700 V, le courant de fuite à 50 °C vaut environ 1,33 μ A alors qu'à 150 °C, il est approximativement égal à 1,35 mA). Le graphique de la **figure 30** montre également que lorsque la tenue en tension augmente de 200 V (de 600 V à 800 V), le courant de fuite est multiplié en moyenne par 1,54 (e.g. à 100 °C, 32.80 μ A pour une tenue en tension de 600 V par rapport à 50,59 μ A à 800 V), sur la gamme de température mesurée (de 50 °C à 150 °C).

¹ La bande interdite est parfois aussi appelée énergie d'ionisation dans la littérature.

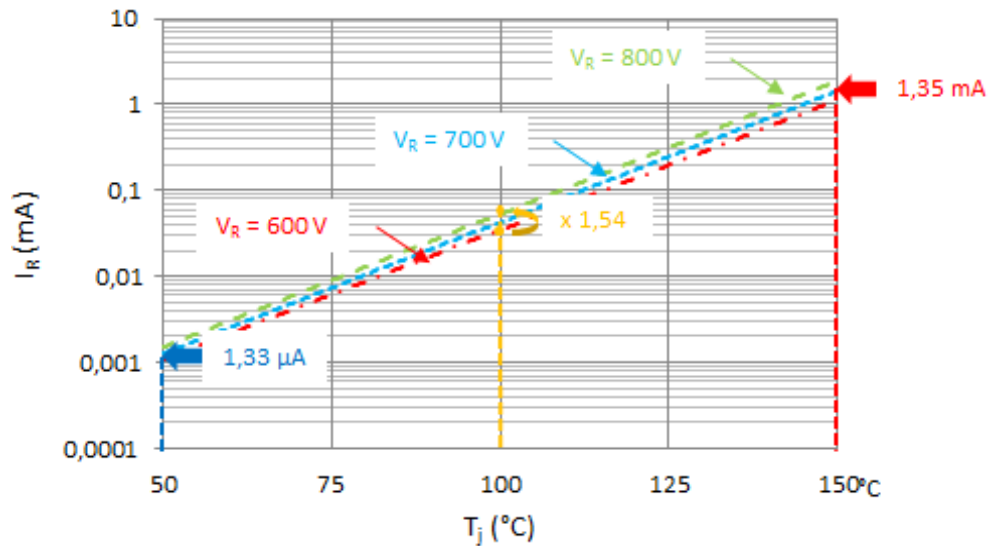


Figure 30 : Évolution des courants de fuite en fonction de la température de jonction T_j et de la tenue en tension (TRIAC XXXXX-XXXXXXXX/X: XX A, XXX V, $I_{GT} = 35$ mA, $T_{j(max)} = 125$ °C, boîtier TO220 non isolé)

Lorsque le TRIAC est bloqué, il dissipe une certaine puissance notée P_{OFF} . Cette puissance représentant les pertes du TRIAC à l'état bloqué est donnée par l'équation 37 où V_f est noté pour la tension continue inverse aux bornes du TRIAC.

$$P_{OFF} = V_R \cdot I_R(V_R, T_j) \quad \text{Équation 37}$$

Ces pertes sont responsables d'une élévation de la température de jonction (T_j) et donc d'une nouvelle élévation des courants de fuite et des pertes associées. Une réaction en chaîne peut alors apparaître (cf. **figure 33**) : c'est l'emballement thermique.

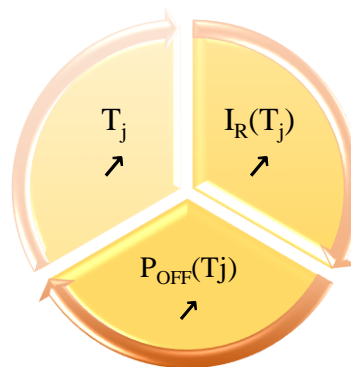


Figure 31 : Réaction en chaîne positive à l'origine de l'emballement thermique

L'équation 37 met également en évidence que les pertes dans le TRIAC à l'état bloqué (P_{OFF}) augmentent lorsque la température croît (car les courants de fuite augmentent) [31], [32]. Dans cette expression, on considère la puissance moyenne dissipée, pour une tension continue appliquée en inverse. Pour un TRIAC XXXXX-XXXXXXXX/X et pour une

tension continue de 700 V, cette puissance dissipée représente environ 803 μW à 50 $^{\circ}\text{C}$. À 125 $^{\circ}\text{C}$, les pertes à l'état bloqué sont de l'ordre de 144 mW, soit près de 180 fois plus ! Cette expression de la puissance dissipée permet ainsi de calculer l'élévation moyenne de la température de jonction (T_j) à l'état bloqué.

En utilisant l'expression de la « loi d'Ohm thermique » (cf. **équation 4**), on peut établir l'expression de la puissance dissipée (P_d) par le TRIAC (aussi bien à l'état passant que lorsqu'il est bloqué) en fonction de la température de jonction (T_j) atteinte en régime permanent, de la température ambiante (T_a) et de la résistance thermique entre la jonction et l'air ambiant ($R_{th(j-a)}$) (**équation 38**).

$$P_d = \frac{T_j - T_a}{R_{th(j-a)}} \quad \text{Équation 38}$$

Lorsque le TRIAC est bloqué, l'équilibre thermique correspond au point d'intersection des deux courbes représentatives des **équations 37** et **38** (cf. **figure 32**).

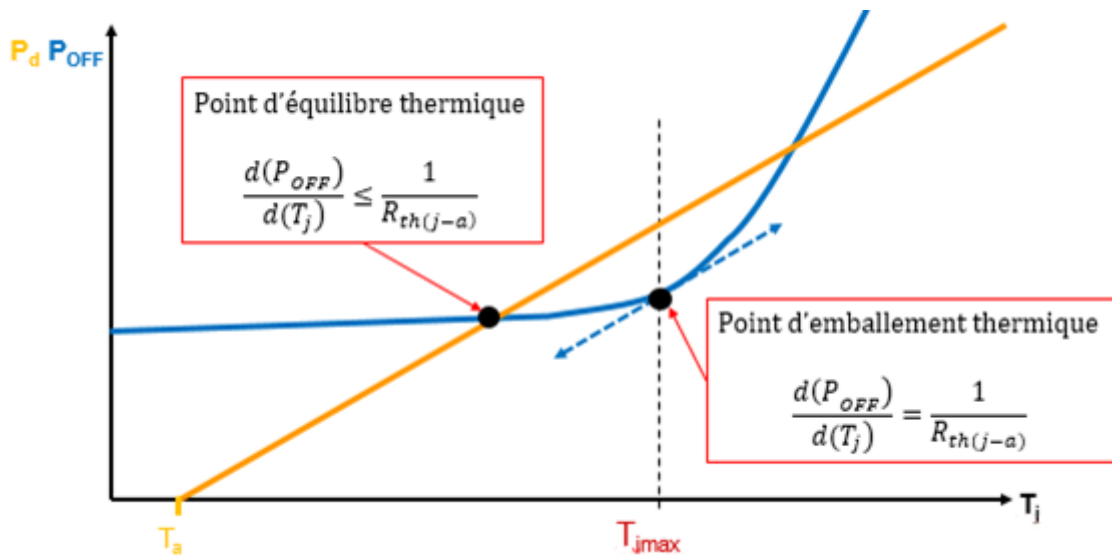


Figure 32 : Pertes du TRIAC à l'état bloqué

La limite pour éviter une réaction en chaîne d'emballage thermique est donnée par l'**équation 39** [32]. Celle-ci dépend de deux paramètres qui sont la puissance dissipée par le composant lorsqu'il est bloqué (P_{OFF}) et sa résistance thermique jonction-ambiant ($R_{th(j-a)}$).

$$\frac{d(P_{OFF})}{d(T_j)} \leq \frac{1}{R_{th(j-a)}} \quad \text{Équation 39}$$

Cette équation montre que l'emballement thermique est évité quand la température de jonction T_j conduit à une augmentation de la puissance dissipée P_{OFF} inférieure que ce que le système est capable de dissiper.

Au cours des essais, nous pourrions être confrontés au phénomène d'emballement thermique, puisque les TRIACS seront à l'état bloqué à température élevée durant plusieurs heures. L'emballement thermique conduit au retournement dynamique du TRIAC, ce qui peut être critique pour le suivi des essais, puisque le composant n'est plus contrôlable, bien que ce phénomène ne soit pas destructeur pour le composant lui-même.


IV Expérimentation des tests de fiabilité

IV.1 Définitions des essais réalisés

IV.1.1 Description des essais réalisés

Dans le cadre de cette étude, tous les essais accélérés réalisés sont des essais de blocage en haute température. Les essais de blocage en haute température sont principalement effectués par les fabricants de composant de puissance et ces tests permettent de caractériser la couche de passivation et la robustesse aux interfaces du silicium. Les dérives de courant de fuite sont la signature électrique de la dégradation des couches de passivation et / ou des interfaces de silicium.

IV.1.2 Description des composants utilisés

Chacun des essais a été réalisé sur des composants référencés chez le fabricant  XXXXX-XXXXXXXX/X.

Il s'agit d'un TRIAC adapté pour un usage général en commutation de tension alternative. Il peut être utilisé dans des applications telles que de la régulation de chauffage, des circuits de démarrage de moteur ou pour le contrôle de phase de variateur de lumière, etc.

Cette version est spécialement recommandée pour être utilisée sur des charges inductives grâce à sa haute performance en commutation.

Le XXXXX-XXXXXXXX/X est un TRIAC non isolé, conçu pour fonctionner à l'état passant avec un courant maximum de XX A efficace et retenir à ses bornes une tension maximum répétitive de XXX V. Son courant de gâchette minimum pour le déclencher est de 35 mA.

La fabrication de la puce est construite selon une technologie Double Mesa Glass.

IV.1.3 Définition de la matrice de test

Les essais sont réalisés à une température ambiante comprise entre 100 °C et 125 °C et l'amplitude de la tension comprise entre 400 V et 800 V.

Pour tous les essais réalisés, la gâchette est électriquement au même potentiel que la cathode via un court-circuit.

Lorsque la tension V_{AK} est positive, on dit que le TRIAC est polarisé en V_D , ou face avant : c'est la jonction J2 qui retient la tension (cf. **figure 7**).

Lorsque la tension V_{AK} est négative, on dit que le TRIAC est polarisé en V_R ou en face arrière : c'est la jonction J3 qui retient la tension (cf. **figure 7**).

Lorsque la tension V_{AK} est alternative, on dit que le TRIAC est polarisé en AC. Dans ce cas, la jonction J2 retient la tension durant l'alternance positive et la jonction J3 retient la tension durant l'alternance négative (cf. **figure 7**). Tous les essais réalisés à l'aide d'une tension alternative, l'ont été avec une tension sinusoïdale de fréquence 50 Hz.

Le **tableau 4** ci-dessous présente les essais réalisés.

		Température ambiante de l'étuve (°C)		
		100	110	125
Amplitude de la tension (V)	400		X	X X
	500			X
	600	X X	X	
	700		X X	X X
	800	X X	X X	X X

X : Tension continue DC – V_R – Face arrière polarisée

X : Tension continue DC – V_D – Face avant polarisée

X : Tension alternative, sinusoïdale, de fréquence 50 Hz – Faces avant et arrière polarisées

Tableau 4 : Matrice des essais de fiabilité réalisés sur des XXXXX-XXXXXXX/X

IV.2 Protocole de test

Chacun des essais définis au préalable a été lancé selon le même protocole, de manière à pouvoir assurer la reproductivité de chacun des essais.

IV.2.1 Montage des composants sur rack

Avant d'être soumis à la tension et à la température, chaque TRIAC est numéroté puis monté sur un radiateur de 10 °C/W afin de faciliter la dissipation de la chaleur. La taille de l'échantillon de 40 TRIACs par essai est conditionnée par la capacité d'accueil du rack. Chaque rack est nettoyé et contrôlé électriquement selon une procédure interne stricte avant utilisation.

Dans cette configuration, une fois monté sur rack, la gâchette est électriquement au même potentiel que la cathode via un court-circuit.

IV.2.2 Insertion du rack dans l'étuve

Une fois les composants montés sur le rack, celui-ci est inséré dans une étuve régulée en température selon la norme NF X 15-140 [34], à ± 5 °C près.

Lorsque le rack est inséré dans l'étuve, le connecteur mâle du rack s'enfiche dans un connecteur femelle se trouvant dans le fond de l'étuve de manière à faire parvenir la tension sur chacun des composants à stresser.

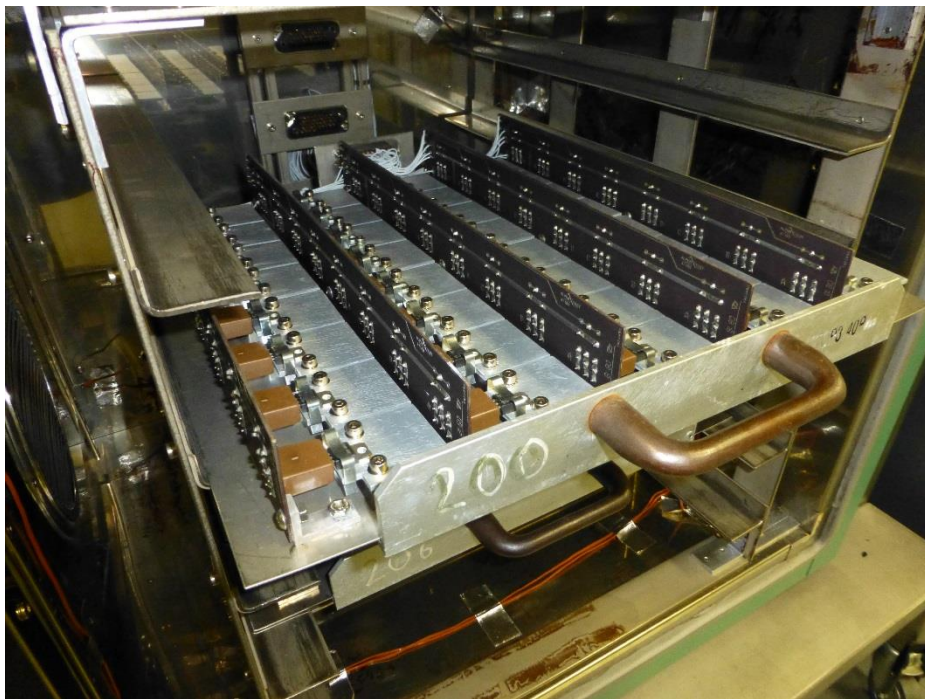


Figure 33 : Photo d'un rack dans une étuve comprenant 40 TRIACs XXXXX-XXXXXXXX/X montés sur radiateurs

IV.2.3 Vérification de l'arrivée des tensions

Une fois le rack inséré dans l'étuve, il est nécessaire de procéder à la vérification de l'arrivée de la tension sur les pièces. Pour cela, une faible tension (de l'ordre d'une centaine de volts) est appliquée sur les pièces, via une alimentation externe au travers d'un coffret de mesure. La présence de tension et le sens de polarisation des composants dans le cas d'une tension continue sont vérifiés à l'aide d'un multimètre. Une fois ces vérifications terminées, la sortie de la source d'alimentation est inhibée.

IV.2.4 Mise en chauffe de l'étuve

Une fois la vérification de l'arrivée des tensions sur les pièces effectuée, on procède à la mise en chauffe de l'étuve. Le chauffage se fait par convection et le brassage interne de l'air se fait avec une ventilation au moyen d'une turbine entraînée par un moteur électrique. Cet ensemble assure un transfert thermique rapide et une bonne homogénéité de température à l'intérieur de l'enceinte.

Le volume utile de l'étuve est caractérisé durant toute la durée de l'essai à l'aide de capteurs de température placés à une distance des parois égale au 1/10 de chacune des dimensions du volume intérieur. La caractérisation est effectuée avec 9 capteurs : un capteur situé à chacun des angles de l'espace de travail et un capteur situé au centre du volume ainsi délimité.

On considère que les pièces se trouvant sur le rack auront atteint la température de l'enceinte une heure après que la température de l'enceinte se soit stabilisée. La température de l'étuve sera contrôlée durant toute la durée de l'essai.

IV.2.5 Ajout de la contrainte tension

Une fois la température ambiante des pièces stabilisée, il est nécessaire d'appliquer la tension souhaitée sur les pièces à l'aide de l'alimentation stabilisée externe. L'amplitude de la tension en sortie de l'alimentation est ajustée à l'aide d'un multimètre certifié conforme de façon périodique à l'aide d'un étalon de référence accrédité. La tension de consigne restera toujours constante durant toute la durée de l'essai.

IV.2.6 Suivi du courant de fuite des pièces durant toute la durée du test.

Durant toute la durée de l'essai, il est possible de suivre l'évolution du courant de fuite traversant chacun des composants sous test. Ce suivi s'effectue à l'aide d'une mesure de tension aux bornes d'une impédance placée en série de chacun des composants sous contrainte thermique et électrique (cf. **figure 34**).

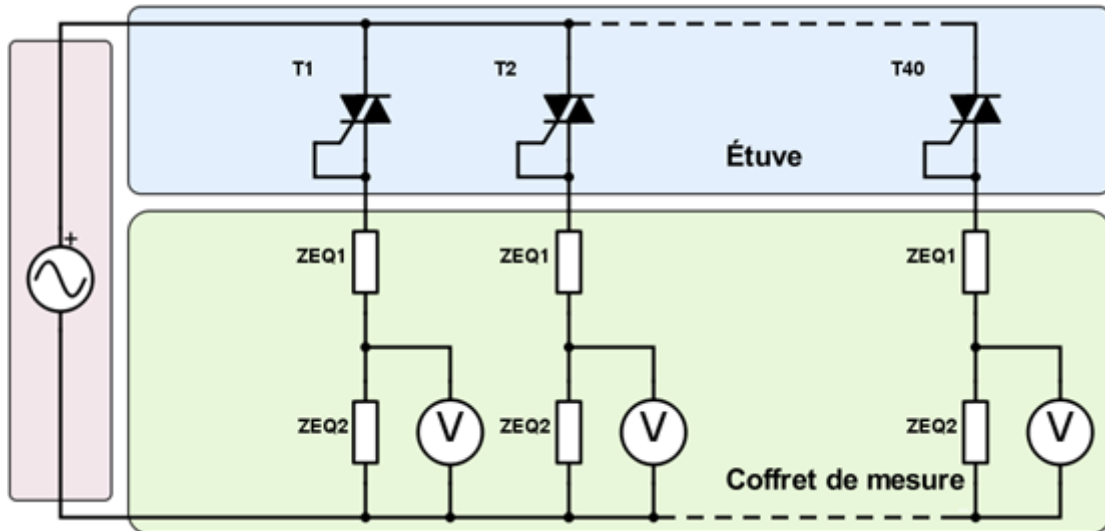


Figure 34 : Schéma de principe de la mesure du courant de fuite traversant les composants sous stress de type HTRB

Les dérives de courant de fuite sont la signature électrique de la dégradation des couches de passivation et / ou des interfaces de silicium. C'est la raison pour laquelle la valeur du courant de fuite efficace de chacun des composants sous test sera évaluée toutes les 2 minutes selon l'équation 40.

$$I_L = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} u_{ZEQ2}^2(t) \cdot dt}}{|ZEQ2|} \quad \text{Équation 40}$$

où I_L est le courant de fuite (A), T la période du signal (s), $u_{ZQ2}(t)$ est la tension instantanée mesurée (V), $ZEQ2$ est l'impédance complexe (Ω).

Enfin, la température de jonction T_j pour chacun des composants sera déterminée par la suite à l'aide de la loi d'Ohm thermique en considérant une résistance thermique entre la jonction et l'air de $12 \text{ }^\circ\text{C/W}$ dans notre configuration [34].

IV.3 Critère de défaillance

Le courant de fuite traversant chacune des pièces est mesuré durant toute la durée de l'essai.

Les valeurs de courant de fuite initiales prise en comptes sont celles mesurées une fois la tension juste établie et sont homogènes (e.g. valeur moyenne et écart-type respectivement égal à 276 nA et 24 nA pour les 40 échantillons polarisés en face arrière à 700 V et à $125 \text{ }^\circ\text{C}$ de température ambiante).

Le critère de défaillance pour chacune des pièces pris en considération est une augmentation du courant de fuite de 100 % par rapport à sa valeur initiale. Ce critère de

défaillance permet de considérer constante la température de jonction de chacun des composants sous contrainte thermique et électrique durant toute la durée de l'essai.

V Influence de la température et de la tension sur la fiabilité du TRIAC

V.1 Préambule

Dans le précédent chapitre, nous avons montré que le critère retenu était une augmentation du courant de fuite de 100 % par rapport à sa valeur initiale au début de l'essai de fiabilité. La problématique est maintenant de connaître l'état réel du TRIAC lorsque son courant de fuite a doublé par rapport à sa valeur initiale.

V.2 TRIACs polarisés en tension continue (DC)

Nous allons étudier ici l'influence de la température et de la tension sur la durée de vie des TRIACs à l'état bloqué tension continue. Le plan d'expérience choisi est résumé en bleu et rouge dans le **tableau 4**.

V.2.1 TRIACs polarisés en face arrière

Pour chacun des essais, le temps de défaillance de chacune des pièces a été relevé à partir des mesures de courant de fuite effectuées durant l'application des contraintes en tension et température.

La **figure 35** montre l'évolution du courant de fuite en fonction du temps sur l'essai polarisé en face arrière à 700 V et à température ambiante de 125 °C. Le premier défaut est apparu après 2,47 heures et le dernier défaut après 10,80 heures. Après 5,16 heures d'essai, 50 % des pièces sont défectives.

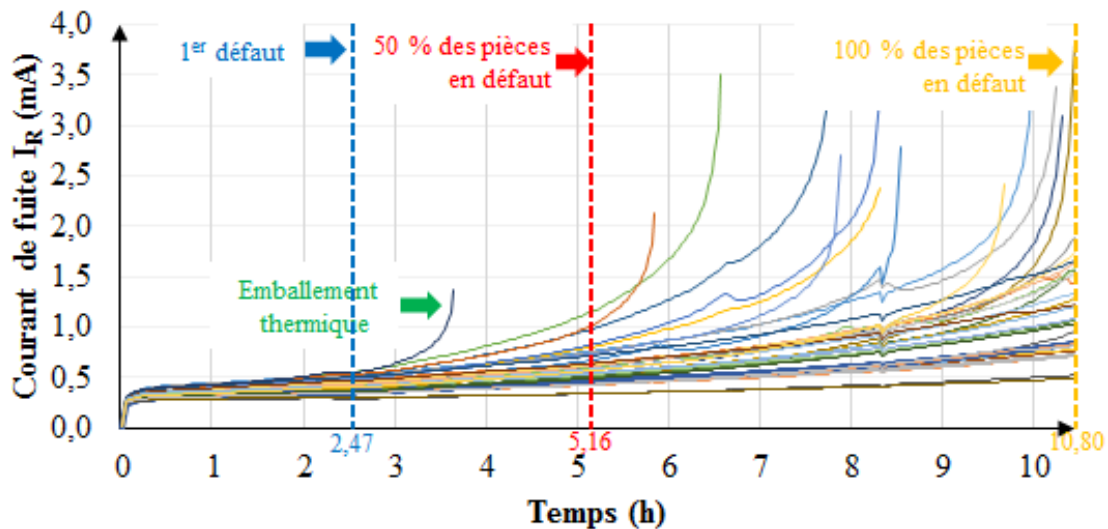


Figure 35 : Évolution du courant de fuite (mA) en fonction du temps (h) pour l'essai polarisé en face arrière à 700 V et à température ambiante de 125 °C

La **figure 36** illustre la comparaison statistique de la dégradation entre les TRIACs polarisés en face arrière.

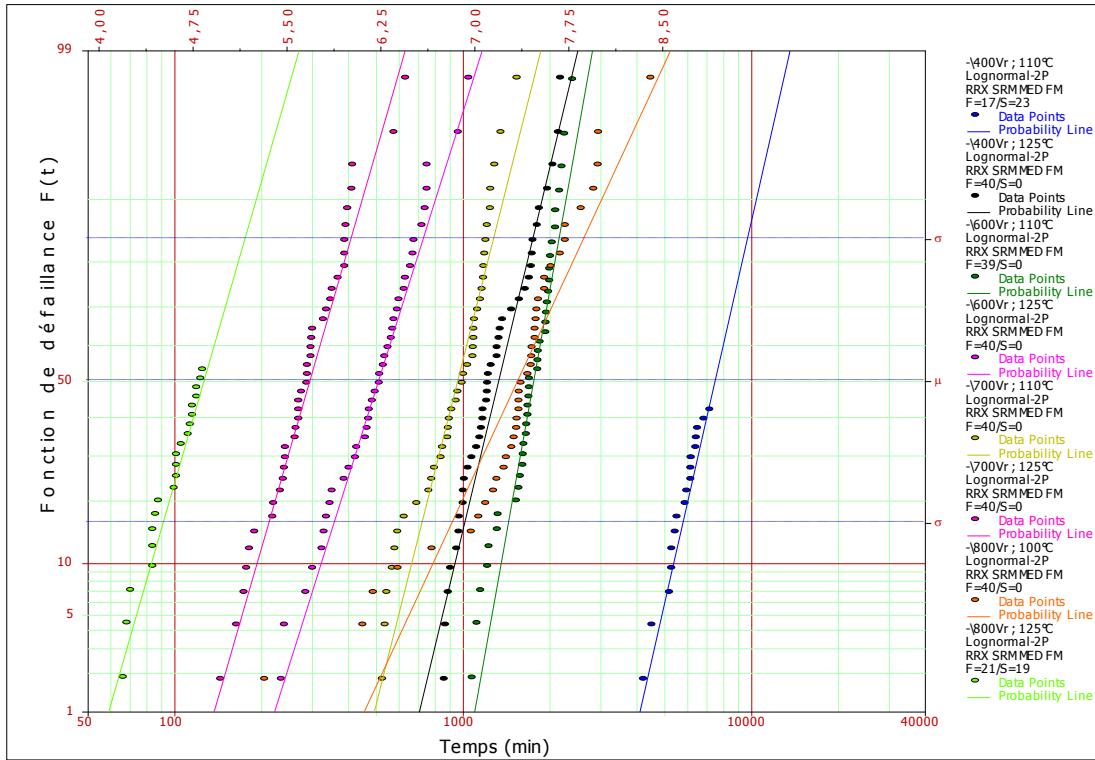


Figure 36 : Impact de la tension en DC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés en face arrière

L'ajustement des durées de vie a été réalisé avec une distribution log-normale. Le **tableau 5** synthétise, pour chacune des tensions et température, les valeurs numériques des deux paramètres clés de la loi log-normale, c'est-à-dire le facteur de forme (σ) et la durée de vie à 50 % de la défaillance cumulée (MTTF). Ces données ont été extraites à l'aide de la version 7.5.10 du logiciel Weibull++[®] édité par la société ReliaSoft. Pour chaque paramètre, nous spécifions également les intervalles de confiance sur le temps à 90 %.

		Température ambiante de l'étuve (°C)			
		100	110	125	
Amplitude de la tension (V)	400	MTTF en heures		129	22,9
		[Intervalle de confiance]		[118 ; 140]	[21,4 ; 24,6]
		σ en millièmes d'heure		4,30	4,53
		[Intervalle de confiance]		[3,92 ; 4,71]	[3,75 ; 5,48]
	600	MTTF en heures		29,8	9,02
		[Intervalle de confiance]		[28,3 ; 31,5]	[8,22 ; 9,89]
		σ en millièmes d'heure		3,37	5,94
		[Intervalle de confiance]		[2,79 ; 4,07]	[4,89 ; 7,21]
	700	MTTF en heures		16,6	5,16
		[Intervalle de confiance]		[15,4 ; 17,9]	[4,74 ; 5,62]
		σ en millièmes d'heure		4,76	5,47
		[Intervalle de confiance]		[3,95 ; 5,74]	[4,51 ; 6,63]
800	MTTF en heures	29,5	Non	2,22	
	[Intervalle de confiance]	[25,7 ; 33,8]	exploité	[2,00 ; 2,46]	
	σ en millièmes d'heure	8,76	Non	5,45	
	[Intervalle de confiance]	[7,37 ; 10,4]	exploité	[3,99 ; 7,43]	

Tableau 5 : Synthèse des valeurs des paramètres clés de l'ajustement des durées de vie des TRIACs polarisés en DC en face arrière

La température et l'amplitude de la tension sont bien des facteurs d'accélération de la défaillance du TRIAC puisque l'augmentation de leurs valeurs conduisent à une diminution de la durée de vie des composants.

Pour extraire un facteur d'accélération, la condition nécessaire et suffisante est que le mécanisme de défaillance doit rester identique lorsque l'on élève la température ou augmente l'amplitude de la tension. En d'autres termes, le paramètre de forme (σ) de la loi log-normale doit rester inférieur à un, ce qui est bien le cas quelque soit la tension de blocage (cf. **tableau 5**). Du plus, (σ) doit rester si possible constant.

L'**équation 41** donne la loi d'Eyring utilisée ici pour déterminer le MTTF dans le cas où la température de jonction et l'amplitude de la tension sont des facteurs limitant la durée de vie des TRIACs.

$$MTTF(T_a, U) = A. e^{-\left(\frac{E_a}{k.T_a} + \beta.U\right)} \quad \text{Équation 41}$$

où A est une constante à déterminer expérimentalement, E_a est l'énergie d'activation (eV), k est la constante de Boltzmann ($8,617.10^{-5} \text{ eV.K}^{-1}$), T_a la température ambiante (K), β est le facteur d'accélération de la tension (V^{-1}) et U est l'amplitude de la tension (V).

L'accélération en température est modélisée selon une loi d'Arrhenius, et l'accélération en température par une loi en E.

Les résultats statistiques décrits précédemment (cf. **figure 36** et **tableau 5**), permettent d'extraire la valeur du coefficient (A), de l'énergie d'activation (E_a) et du facteur d'accélération (β) à l'aide de la version 10.1.2 du logiciel Alta[®] aussi édité par la société ReliaSoft. Le **tableau 6** précise ces paramètres ainsi que leurs intervalles de confiance.

	A	E_a (eV)	β (V^{-1})
Valeur	$2,53.10^{-12}$	1,26	0,0063
[Intervalle de confiance]	$[5,87.10^{-13} ; 1,09.10^{-11}]$	[1,21 ; 1,31]	[0,0060 ; 0,0065]

Tableau 6 : Synthèse des valeurs des paramètres de la loi d'Eyring définissant le MTTF en fonction de la température et de l'amplitude de la tension lorsque les TRIACs sont polarisés en face arrière

À partir de ces données expérimentales, nous allons extrapoler mathématiquement la durée de vie moyenne des TRIACs en fonction de la température et de l'amplitude de tension selon la **figure 37**.

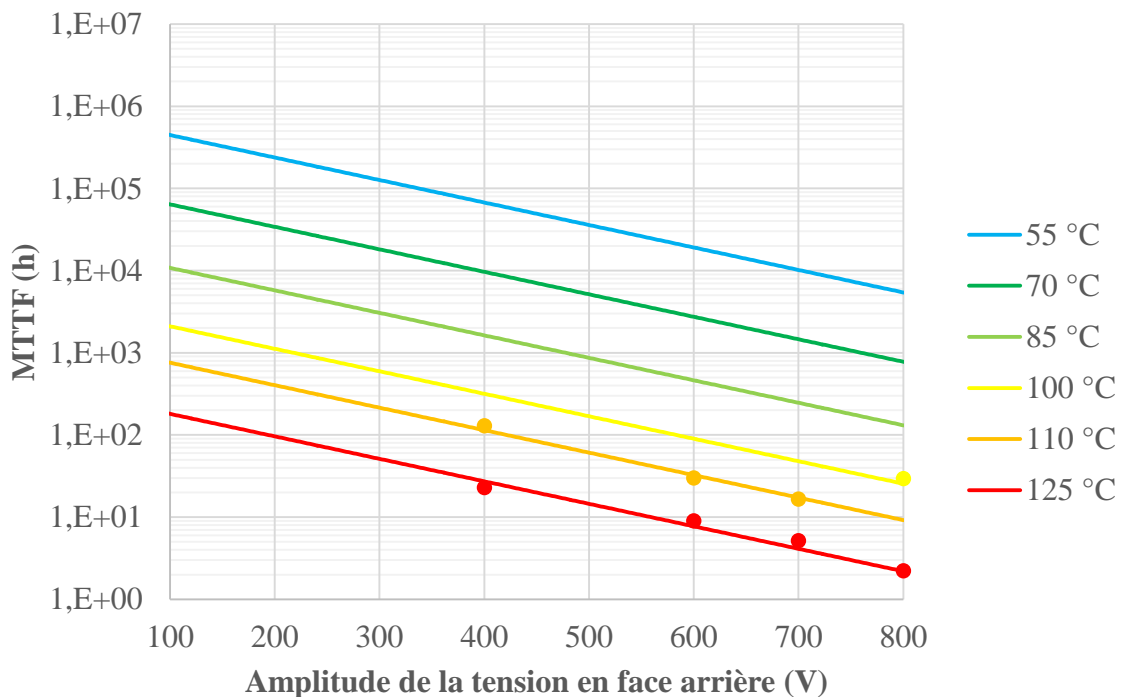


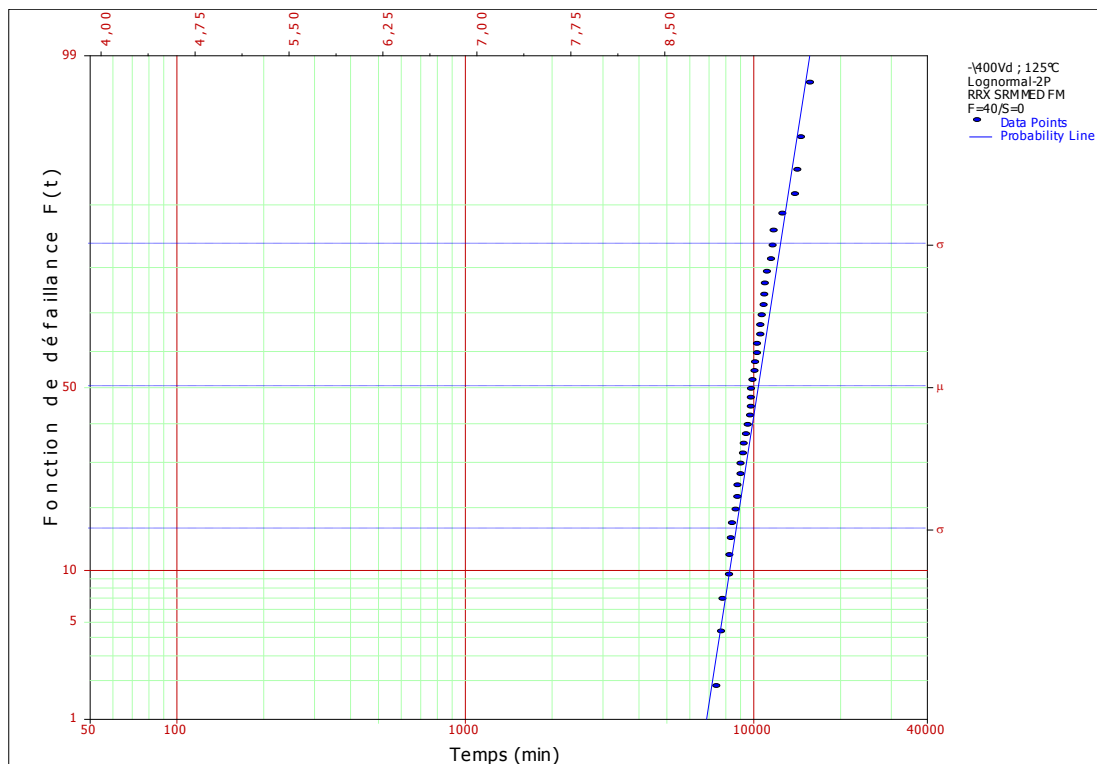
Figure 37 : Impact de la tension en DC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés en face arrière

V.2.2 TRIACs polarisés en face avant

Un seul essai a été réalisé à 125 °C et à 400 V. Le temps de défaillance de chacune des pièces a été relevé à partir des mesures de courant de fuite effectuées durant l'application des contraintes en tension et température.

Le premier défaut est apparu après 124,7 heures et le dernier défaut après 269,0 heures. Après 175,5 heures d'essai, 50 % des pièces sont défectueuses.

Le **figure 38** illustre la statistique de la dégradation des TRIACs polarisés en face avant.



L'ajustement des durées de vie a été réalisé aussi avec une distribution log-normale. Le **tableau 7** synthétise, les valeurs numériques des deux paramètres clés de la loi log-normale. Les intervalles de confiance sur le temps à 90 % sont aussi précisés dans ce tableau.

		Température ambiante de l'étuve (°C)		
		100	110	125
Amplitude de la tension (V)	400	MTTF en heures		175
		[Intervalle de confiance]		[168 ; 184]
		σ en millièmes d'heure		2,50
		[Intervalle de confiance]		[2,07 ; 3,03]

Tableau 7 : Synthèse des valeurs des paramètres clés de l'ajustement des durées de vie des TRIACs polarisés en DC en face avant

A 125 °C et à 400 V, le facteur d'accélération est environ 6,43 fois plus élevé lorsque les TRIACs sont polarisés en face avant par rapport au TRIACs polarisés en face arrière.

Si on accepte l'hypothèse que l'énergie d'activation (E_a) ainsi que le facteur d'accélération en tension (β) sont indépendants du sens de polarisation, il est possible d'extrapoler mathématiquement la durée de vie moyenne des TRIACs en fonction de la température et de l'amplitude de tension lorsqu'ils sont polarisés en face avant selon la **figure 39**.

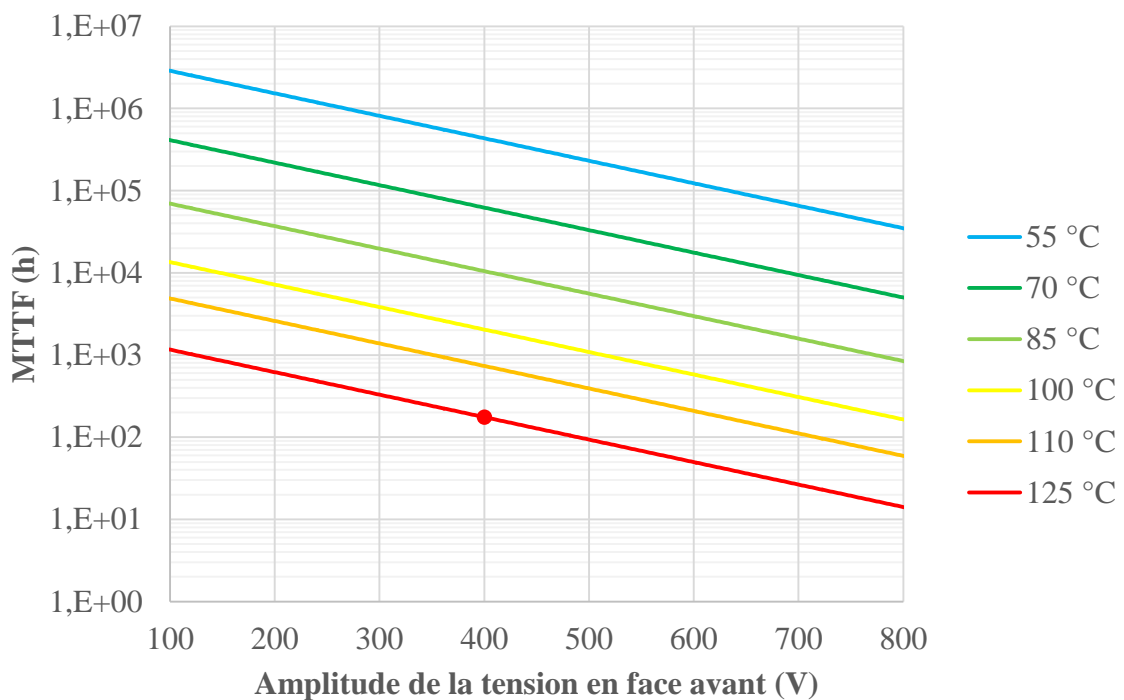


Figure 39 : Impact de la tension en DC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés en face avant

V.3 Triacs polarisés en tension alternative (AC)

Nous allons étudier ici l'influence de la température et de la tension sur la durée de vie des TRIACs à l'état bloqué en tension alternative sinusoïdale de fréquence 50 Hz. Le plan d'expérience choisi est résumé en jaune dans le **tableau 4**.

Pour chacun des essais, le temps de défaillance de chacune des pièces a été relevé à partir des mesures de courant de fuite effectuées durant l'application des contraintes en tension et température.

La **figure 40** montre l'évolution du courant de fuite en fonction du temps sur l'essai polarisé en alternatif à une tension d'amplitude 700 V et à température ambiante de 125 °C. Le premier défaut est apparu après 26,7 heures et le dernier défaut après 60,5 heures. Après 41,0 heures d'essai, 50 % des pièces sont défectueuses.

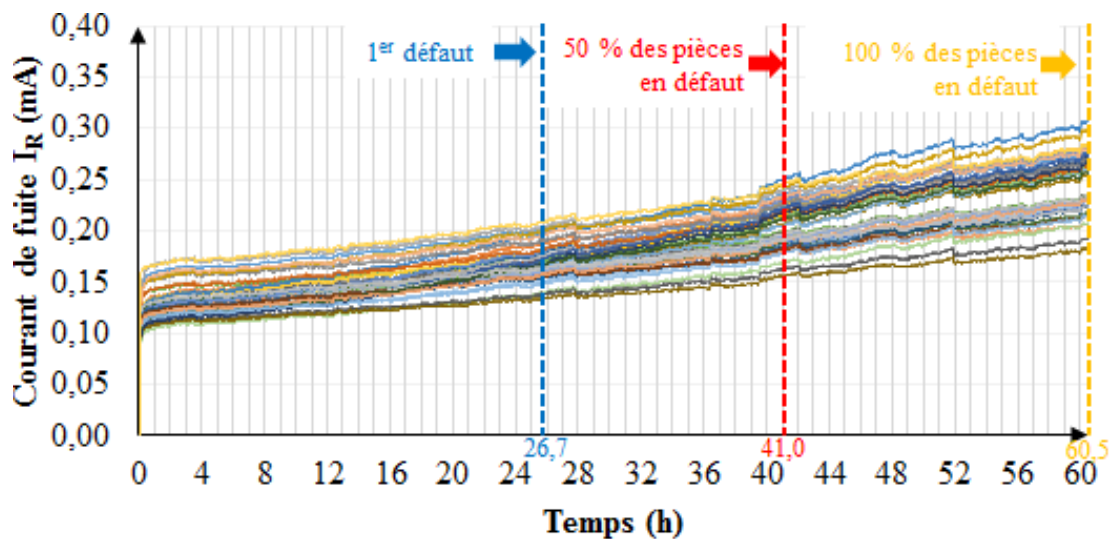


Figure 40 : Évolution du courant de fuite (mA) en fonction du temps (h) pour l'essai polarisé en alternatif à une amplitude de 700 V et à température ambiante de 125 °C

La **figure 41** illustre la comparaison statistique de la dégradation entre les TRIACs polarisés à l'aide d'une tension alternative sinusoïdale de la fréquence du secteur.

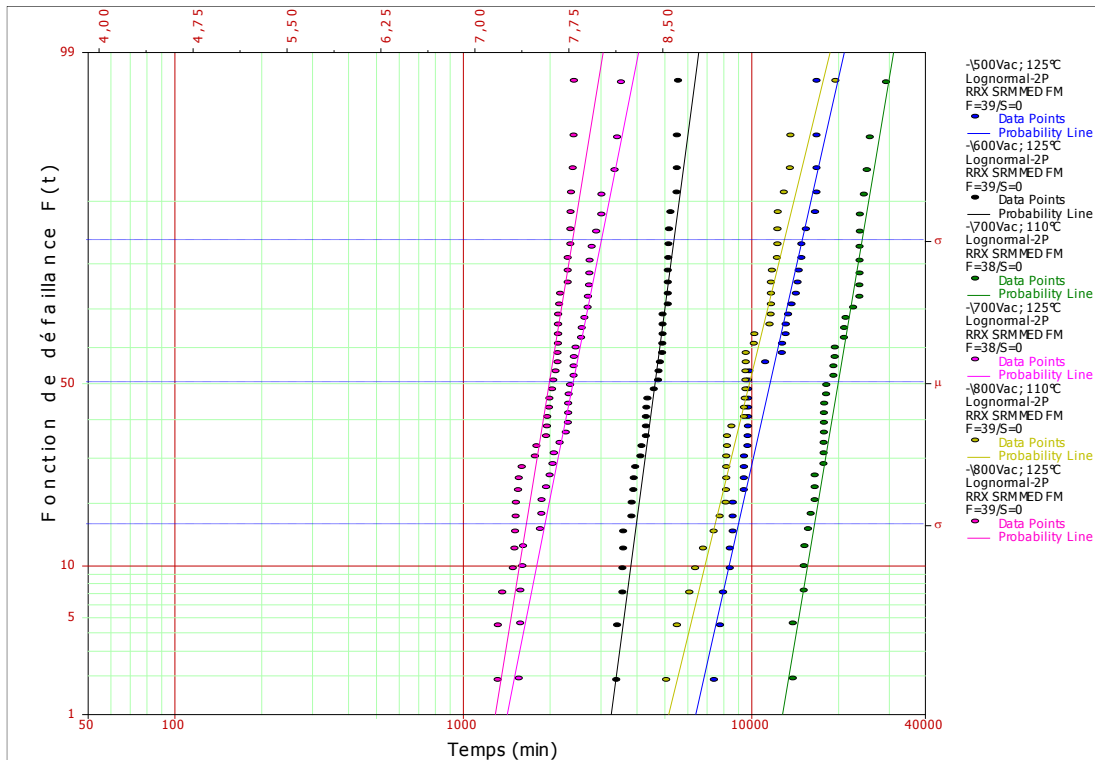


Figure 41 : Impact de la tension en AC et de la température sur la durée de vie des TRIACs

L'ajustement des durées de vie a été réalisé avec une distribution log-normale. Le **tableau 8** synthétise, pour chacune des tensions et température, les valeurs numériques des deux paramètres clés de la loi log-normale. Pour chaque paramètre, nous spécifions également les intervalles de confiance sur le temps à 90 %.

			Température ambiante de l'étuve (°C)			
			100	110	125	
Amplitude de la tension alternative sinusoïdale (V)	500	MTTF en heures			199	
		[Intervalle de confiance]			[186 ; 213]	
		σ en millièmes d'heure			4,25	
			[Intervalle de confiance]			[3,52 ; 5,12]
	600	MTTF en heures			77,9	
		[Intervalle de confiance]			[74,9 ; 81,0]	
		σ en millièmes d'heure			2,50	
			[Intervalle de confiance]			[2,07 ; 3,03]
	700	MTTF en heures		338	41,0	
		[Intervalle de confiance]		[322 ; 356]	[38,6 ; 43,6]	
		σ en millièmes d'heure		3,18	3,76	
			[Intervalle de confiance]	[2,61 ; 3,86]	[3,09 ; 4,58]	
800	MTTF en heures	Non exploité	170	33,7		
	[Intervalle de confiance]		[158 ; 183]	[32,1 ; 35,3]		
	σ en millièmes d'heure	Non exploité	4,62	3,08		
	[Intervalle de confiance]		[3,80 ; 5,60]	[2,57 ; 3,71]		

Tableau 8 : Synthèse des valeurs des paramètres clés de l'ajustement des durées de vie des TRIACs polarisés en tension alternative sinusoïdale de fréquence 50 Hz

La température et l'amplitude de la tension sont bien des facteurs d'accélération de la défaillance du TRIAC puisque l'augmentation de leurs valeurs conduisent à une diminution de la durée de vie des composants.

Pour extraire un facteur d'accélération, la condition nécessaire et suffisante est que le mécanisme de défaillance doit rester identique lorsque l'on élève la température ou augmente l'amplitude de la tension. En d'autres termes, le paramètre de forme (σ) de la loi log-normale doit rester inférieur à un, ce qui est bien le cas quelque soit la tension de blocage (cf. **tableau 8**). Du plus, (σ) doit rester si possible constant.

L'**équation 42** donne la loi d'Eyring utilisée ici pour déterminer le MTTF dans le cas où la température de jonction et l'amplitude de la tension sont des facteurs limitant la durée de vie des TRIACs.

$$MTTF(T_a, V_{peak}) = A \cdot e^{-\left(\frac{E_a}{k \cdot T_a} + \beta \cdot V_{peak}\right)} \quad \text{Équation 42}$$

où A est une constante à déterminer expérimentalement, E_a est l'énergie d'activation (eV), k est la constante de Boltzmann ($8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$), T_a la température ambiante (K), β est le facteur d'accélération de la tension (V^{-1}) et V_{peak} est l'amplitude de la tension (V).

L'accélération en température est modélisée selon une loi d'Arrhenius, et l'accélération en tension par une loi en E.

Les résultats statistiques décrits précédemment (cf. **figure 41** et **tableau 8**), permettent d'extraire la valeur du coefficient (A), de l'énergie d'activation (E_a) et du facteur d'accélération (β). Le **tableau 9** précise ces paramètres ainsi que leurs intervalles de confiance.

	A	E_a (eV)	β (V⁻¹)
Valeur	$5,31 \cdot 10^{-16}$	1,63	0,0060
[Intervalle de confiance]	$[1,00 \cdot 10^{-16} ; 2,81 \cdot 10^{-15}]$	[1,57 ; 1,69]	[0,0057 ; 0,0063]

Tableau 9 : Synthèse des valeurs des paramètres de la loi d'Eyring définissant le MTTF en fonction de la température et de l'amplitude de la tension lorsque les TRIACs sont polarisés avec une tension alternative sinusoïdale à 50 Hz

À partir de ces données expérimentales, nous allons extrapoler mathématiquement la durée de vie moyenne des TRIACs en fonction de la température et de l'amplitude de tension selon la **figure 42**.

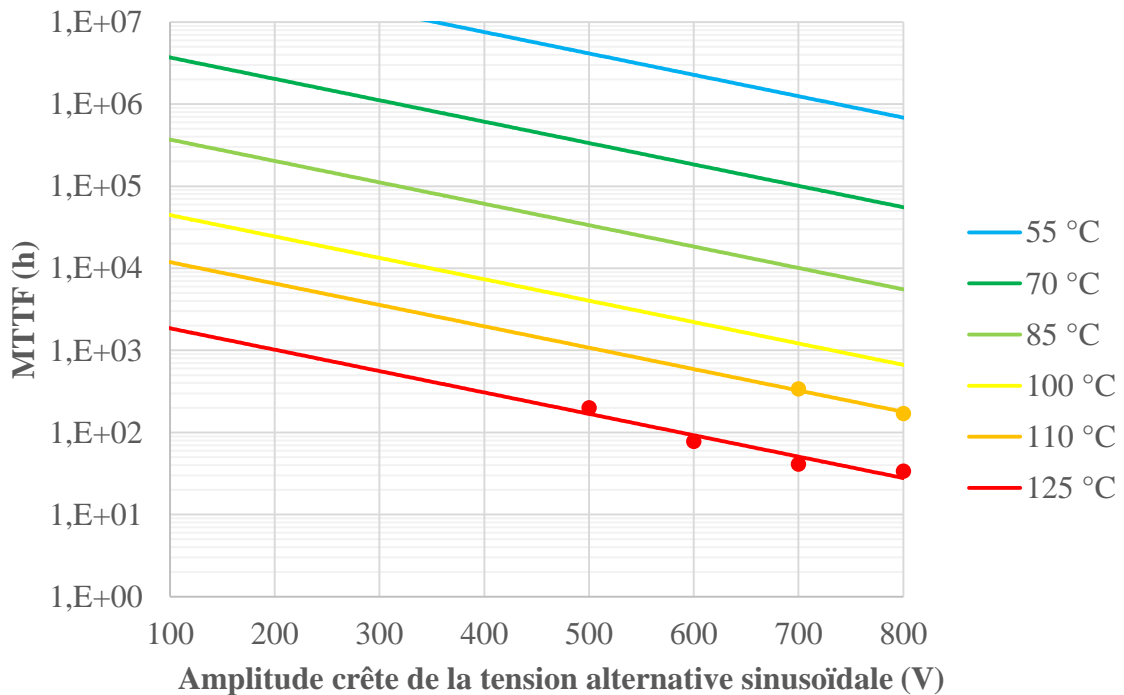


Figure 42 : Impact de la tension en AC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés avec une tension alternative sinusoïdale de la fréquence du secteur

Les fabricants de semiconducteurs ont pour habitude de communiquer des productions de durée de vie en FIT. La **figure 43** donne la durée de vie des TRIACs en FIT en fonction de l'amplitude de la tension et de la température.

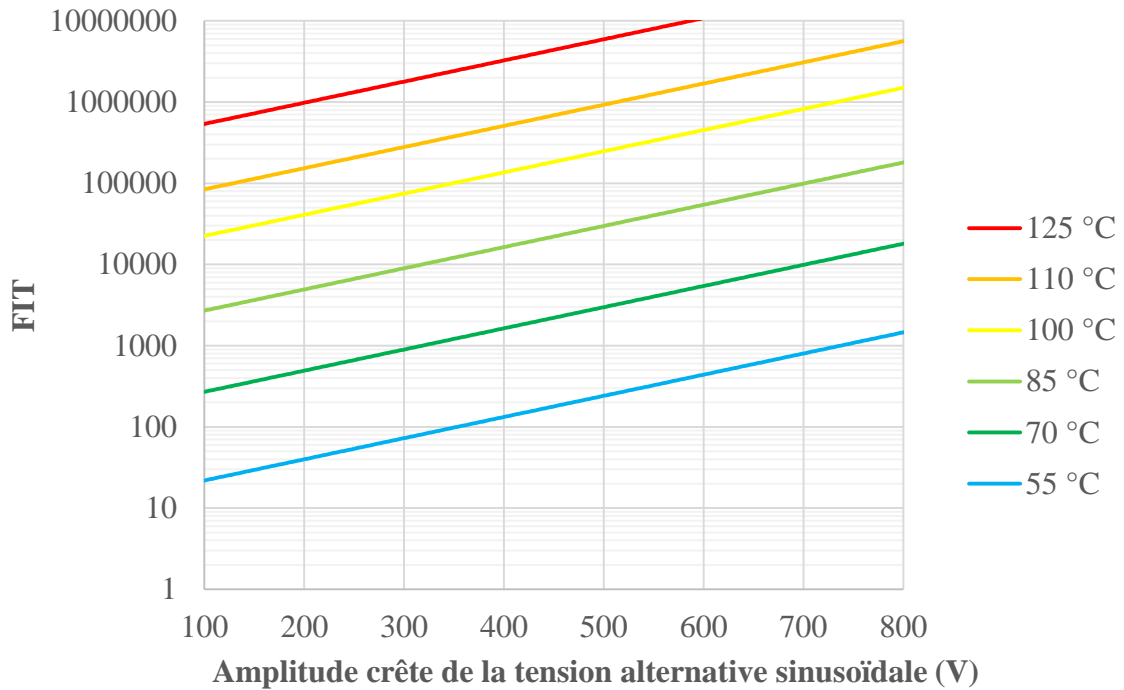


Figure 43 : Impact de la tension en AC et de la température sur la durée de vie des TRIACs exprimé en FIT polarisés avec une tension alternative sinusoïdale de la fréquence du secteur

V.4 Synthèse

Quelque soit la température et la tension où l'essai de blocage a été réalisé, les données statistiques montrent que les composants ont été dégradés par un mécanisme d'usure. En effet, le facteur de forme (σ) est toujours inférieur à un. Les différentes analyses physiques n'ont rien confirmé, ce qui laisse penser que le mécanisme de défaillance serait lié à de la contamination.

Le type de tension AC ou DC apparait comme étant un facteur important qui accélère la dégradation des TRIACs. La **figure 44** donne le facteur d'accélération entre un essai réalisé en tension alternative sinusoïdale (AC) et un essai où seule la face arrière serait polarisée avec une tension continue (DC).

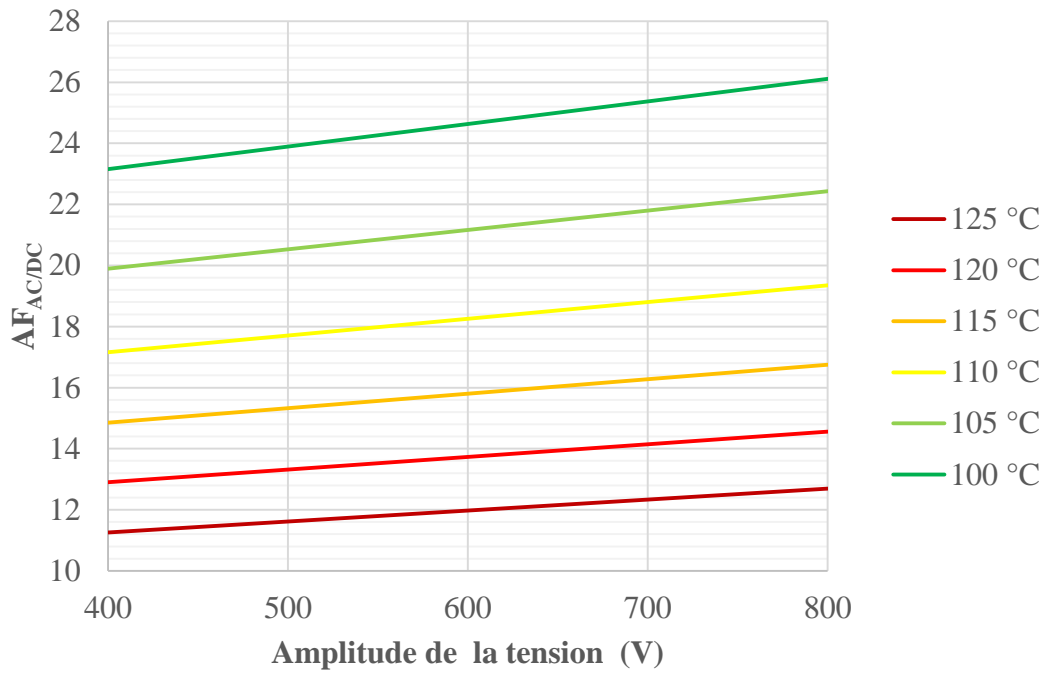


Figure 44 : Facteur d'accélération entre un essai polarisé en AC par rapport à un essai polarisé en DC (face arrière)

Ainsi, à 125 °C, un essai réalisé où les composants seraient polarisés via une source de tension alternative sinusoïdale de la fréquence du secteur et d'amplitude 800 V sur une durée de 1 000 heures pourrait être réalisé sur une durée de 78,7 heures si les composants étaient polarisés avec une tension continue de la même amplitude en face arrière.

Fort de ce constat, cette étude présente alors l'intérêt majeur pour le fabricant de TRIAC de réduire la durée de test de qualification de ses futurs produits afin d'avancer la mise sur le marché de ces produits par rapport à ses concurrents.

Conclusion

Au cours de leur fonctionnement, les TRIACs à l'état bloqué subissent un échauffement induit par les pertes. Les travaux présentés dans ce mémoire nous ont permis de mieux identifier et de comprendre les mécanismes à l'origine du vieillissement des composants. Le blocage en température permet de révéler la contamination qui s'introduit lors de la fabrication des composants.

Nous avons mis en place et suivi des campagnes d'essais de blocage en haute température sur des TRIACs grand public de calibre X A, XXX V. Ces essais de blocage visent à reproduire les contraintes électrique et thermique que subiraient les composants dans une application réelle.

Dans ces travaux, nous avons notamment analysé l'influence de deux paramètres d'un blocage des TRIACs sur la durée de vie des composants : la température de jonction, et l'amplitude de la tension (en DC et en AC). Nous avons montré que pour des températures comprises entre 100 °C et 125 °C, la température et la tension sont des facteurs qui accélèrent la dégradation des TRIACs. Nous avons traduit cette accélération des défaillances en utilisant la définition proposée par Eyring. Enfin, nous avons montré qu'une tension DC accélèrait considérablement le vieillissement des TRIACs par rapport à une tension AC. Cette information est fondamentale pour le fabricant de TRIAC. En effet, les essais normalisés de blocage en haute température, pour qualifier ses produits avant leur introduction sur le marché, s'effectuent AC pour une durée de 1 000 heures. La durée de l'essai peut alors être divisée jusqu'à 30, lorsque l'essai est réalisé en polarisant en DC la face arrière de la puce. Les résultats obtenus nous ont permis de constituer une base de données expérimentales très complète contenant des informations quantitatives sur le taux de défaillance des composants. Le suivi, au cours des essais de blocage en température des courants de fuite nous a renseigné sur le niveau de contamination des composants. Cet indicateur de défaillance permettrait le diagnostic prédictif dans le cadre d'une application réelle.

La corrélation entre les informations sur le taux de défaillance avec les profils de mission des TRIAC permettrait de prédire leur durée de vie.

Ces travaux vont permettre à terme de mettre en place des méthodes de prévision de la défaillance des TRIACs, en fonction des conditions réelles d'application. Il sera possible de valider ou non des modes extrêmes de fonctionnement de ces composants. La première perspective qui se dégage alors de cette étude est de déterminer le domaine de validité du modèle d'estimation de la durée de vie proposé.

Les résultats présentés dans ce mémoire ont aussi permis de mieux appréhender le comportement interne du TRIAC vis-à-vis de la température. Nous avons en effet étudié l'influence de la température sur les paramètres électriques du composant. De même, il serait intéressant d'analyser l'impact de la température de jonction et de la tension sur le vieillissement des TRIACs sur d'autres technologies de fabrication de la puce (Top-Glas et Planar). Ces problématiques pourraient éventuellement être traitées lors d'un prochain sujet de mémoire d'ingénieur ou d'une thèse.

Bibliographie

- [1] M. E. SEMICONDUCTORS, *Introducing Mitsubishi Electric Power Device Technologies and Product Trends Techno* [en ligne]. [Consulté le 3 juin 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/triple_a_plus/technology/01/index.html.
- [2] BERNOT, François. Composants de l'électronique de puissance. *Techniques de l'ingénieur Alimentations et électronique de puissance* [en ligne]. 2013. Vol. base documentaire : TIB283DUO., ref. article : e3960. [Consulté le 18 juillet 2015]. Disponible à l'adresse : <https://budistant.univ-orleans.fr:443/http/www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-automatique-th13/alimentations-et-electronique-de-puissance-42283210/composants-de-l-electronique-de-puissance-e3960/>.
- [3] BENABDELAZIZ, Ghafour. *Réduction de l'énergie de commande des interrupteurs de type TRIAC appliquée aux appareils ménagers* [en ligne]. Thèse de doctorat en sciences pour l'ingénieur. Tours : Université de Tours, 2006. [Consulté le 3 septembre 2015]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00677876/>.
- [4] FORSTER, Stéphane. *Fiabilité fonctionnelle des Triacs soumis aux chocs thermiques di/dt: Fiabilité fonctionnelle et mécanismes de dégradation des Triacs soumis aux chocs thermiques par di/dt à la fermeture*. Thèse de doctorat en électronique. Tours : Université de Metz, 2001.
- [5] MOREAU, Stéphane. *Fiabilité environnementale des composants de puissance : le TRIAC*. Thèse de doctorat en électronique. Tours : Université de Tours, 2005.
- [6] JACQUES, Sébastien. *Etude de la fatigue thermomécanique des composants de puissance de type triac soumis à des cycles actifs de température* [en ligne]. Thèse de doctorat en électronique. Tours : Université de Tours, 2010. [Consulté le 18 août 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.applis.univ-tours.fr/theses/2010/sebastien.jacques_3599.pdf.

- [7] GENTRY, F. E., SCACE, R. I. et FLOWERS, J. K. Bidirectional triode P-N-P-N switches. *Proceedings of the IEEE*. avril 1965. Vol. 53, n° 4, pp. 355-369. DOI 10.1109/PROC.1965.3748.
- [8] STMICROELECTRONICS COMPAGNY. *Technology performance comparison of TRIACs subjected to fast transient voltages - en.CD00266636.pdf* [en ligne]. 2010. [Consulté le 14 octobre 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/99/32/0e/7d/7d/84/4d/f7/CD00266636.pdf/files/CD00266636.pdf/jcr:content/translations/en.CD00266636.pdf.
- [9] JESD671-A. *Component quality problem analysis and corrective action requirements (Including administrative quality problems*. Rev. A, 1999.
- [10] AUBERT, Amandine. *Analyse de défaillance de nouvelles technologies microélectroniques : nouvelles approches dans la méthodologie de préparation d'échantillon* [en ligne]. Thèse de doctorat en électronique. Tours : Université de Bordeaux, 2012. [Consulté le 23 décembre 2015]. Disponible à l'adresse : http://ori-oai.u-bordeaux1.fr/pdf/2012/AUBERT_AMANDINE_2012.pdf.
- [11] JEP122G. *Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices*. Rev. G, 2011
- [12] DUPONT, L., LEFEBVRE, S., BOUAROUJ, M., KHATIR, Z., FAUGIERES, J. C. et EMORINE, F. Ageing Test Results of low voltage MOSFET Modules for electrical vehicles. In : *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. septembre 2007. pp. 1-10.
- [13] ROUSSEAU, Gilles. *La Fiabilité des composants de puissance*. Tours : Conservatoire National des Arts et Métiers, 2013.
- [14] FORSTER, Stéphane. *Reliability Training*. Tours. 2014.
- [15] ESCOBAR, Luis A. et MEEKER, William Q. A Review of Accelerated Test Models. *Statistical Science* [en ligne]. novembre 2006. Vol. 21, n° 4, pp. 552-577. [Consulté le 14 juin 2016]. DOI 10.1214/088342306000000321. Disponible à l'adresse : <http://arxiv.org/abs/0708.0369>.
- [16] BOUYSSOU, Emilien. *Fiabilité fonctionnelle de condensateurs intégrés pour la*

téléphonie mobile : cas du PZT. Thèse de doctorat en électronique. Tours : Université de Tours, 2006.

- [17] JEDEC STANDARD, *JESD74A - Early Life Failure Rate Calculation Procedure for Semiconductor Components*, 2007.
- [18] AONO, H., MURAKAMI, E., OKUYAMA, K., NISHIDA, A., MINAMI, M., OOJI, Y. et KUBOTA, K. *Modeling of NBTI degradation and its impact on electric field dependence of the lifetime*. In : Reliability Physics Symposium Proceedings, 2004. 42nd Annual. 2004 IEEE International. avril 2004. pp. 23-27.
- [19] *Semiconductor device reliability failure models*. International SEMATECH Reliability Technology Advisory Board, 2000.
- [20] OBREJA, V., MANEA, E., CODREANU, C., AVRAM, M. et PODARU, C. *The junction edge leakage current and the blocking I-V characteristics of commercial glass passivated thyristor devices*. In : [en ligne]. IEEE, 2005. pp. 447-450. [Consulté le 18 janvier 2016]. ISBN 978-0-7803-9214-4. Disponible à l'adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1558823>.
- [21] STMICROELECTRONICS COMPAGNY, *Reliability tests and criteria for qualifications - Standard Operating Procedures and Specs*, 2015.
- [22] MIL-STD-750C. *Test method standard semiconductor devices*. 23 February 1983.
- [23] JESD22-A108. *Temperature, bias, and operating life*. Rev. D, 2010.
- [24] AEC-Q101-Rev C. *Stress Test Qualification for Discrete Semiconductors*. June 17, 2005.
- [25] CRESSLER, John D. et MANTOOTH, H. Alan (éd.). *Extreme environment electronics*. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. Industrial electronics series. ISBN 978-1-4398-7430-1. TK7870.24 .E97 2013.
- [26] JESD47I. *Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits*. Rev. I, 2012.
- [27] DUTRANNOY, Gilles. *Fiabilité des composants électroniques orientée stress et mécanismes de défaillance*. Tours : Conservatoire National des Arts et Métiers, 2007.
- [28] JESD94A. *Application Specific Qualification Using Knowledge Based Test Methodology*. Rev. A, 2008.

- [29] SARI-ALI, I, BENYOUCEF, B et CHIKH-BLED, B. *Étude de la jonction PN d'un semi-conducteur à l'équilibre thermodynamique*. [en ligne]. 2007. Vol. 5, pp. 122-126. [Consulté le 14 juin 2016]. Disponible à l'adresse : <http://www.jeldev.org/5ALI.pdf>.
- [30] PÉREZ, José-Philippe, LAGOUTE, Christophe, FOURNIOLS, Jean-Yves et BOUHOURS, Stéphane. *Électronique fondements et applications: avec 250 exercices et problèmes résolus*. Paris : Dunod, 2012. ISBN 978-2-10-058115-3. OCLC: 869924009
- [31] JACQUES, Sebastien, GONTHIER, Laurent et BATUT, Nathalie. *Thermal runaway evaluation for high temperature TRIACS*. In : [en ligne]. IEEE, 2007. pp. 1-10. [Consulté le 14 juin 2016]. Disponible à l'adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4417472>.
- [32] MERCIER, S. et GONTHIER, L. *Thermal runaway evaluation for new high-temperature Triacs in steady-state operation*. In : 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. septembre 2009. pp. 1-9.
- [33] NF X 15-140. *Mesure de l'humidité de l'air - Enceintes climatiques et thermostatiques - Caractérisation et vérification*. ISSN 0335-3931, 2002
- [34] DECAESTECKER, Simon. *Étude thermique des tests de fiabilité visant une température de jonction sur les composants d'électronique de puissance*. Université de Poitiers, 2013.
- ABERNETHY, Robert. Wallodi Weibull Biography written by Dr. Robert B. Abernethy. *Dr. E. H. Waloddi Weibull 1887-1979* [en ligne]. 2003. [Consulté le 22 avril 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.barringer1.com/weibull_bio.htm.
- ALPHA AND OMEGA SEMICONDUCTOR. *Power Semiconductor - Reliability Handbook* [en ligne]. 2010. [Consulté le 17 mars 2016]. Disponible à l'adresse : <http://www.aosmd.com/media/reliability-handbook.pdf>.
- AUBERT, Amandine, JACQUES, S., PIETREMEONT, S., LABAT, N. et FREMONT, H. *Experimental power cycling on insulated TRIAC package: Reliability interpretation thanks to an innovative failure analysis flow*.

Microelectronics Reliability [en ligne]. septembre 2011. Vol. 51, n° 9–11, pp. 1845-1849. [Consulté le 30 décembre 2015]. DOI 10.1016/j.microrel.2011.07.071. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271411003362>.

BOUARROUDJ-BERKANI, Mounira et DUPONT, Laurent. *Fatigue des composants électroniques de puissance Physique de défaillance*. Techniques de l'ingénieur Composants actifs en électronique de puissance [en ligne]. 2013. Vol. base documentaire : TIB245DUO., n° ref. article : d3126. [Consulté le 23 février 2016]. Disponible à l'adresse : <https://budistant.univ-orleans.fr:443/http/www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/composants-actifs-en-electronique-de-puissance-42245210/fatigue-des-composants-electroniques-de-puissance-d3126/>.

DORKEL, Jean-Marie. *Semi-conducteurs de puissance Problèmes thermiques (partie 1)*. Techniques de l'ingénieur Composants actifs en électronique de puissance [en ligne]. 2013. Vol. base documentaire : TIB245DUO., n° ref. article : d3112, pp. 20. [Consulté le 23 juillet 2016]. Disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/composants-actifs-en-electronique-de-puissance-42245210/semi-conducteurs-de-puissance-d3112/>.

HAGGAG, Amr, FORBES, Keith, ANDERSON, Gary, BURNETT, Dave, ABRAMOWITZ, Peter et MOOSA, Mohamed. *Product failures: Power-law or exponential voltage dependence?* In : [en ligne]. IEEE, 2010. pp. 125-128. [Consulté le 14 juin 2016]. ISBN 978-1-4244-5430-3. Disponible à l'adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5488840>.

JACQUES, S., CALDEIRA, A., BATUT, N., SCHELLMANN, A., LEROY, R. et GONTHIER, L. *Lifetime prediction modeling of non-insulated TO-220AB packages with lead-based solder joints during power cycling*. Microelectronics Reliability [en ligne]. janvier 2012. Vol. 52, n° 1, pp. 212-216. [Consulté le 30 mars 2015]. DOI 10.1016/j.microrel.2011.08.017. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271411004124>.

JACQUES, Sebastien, MÉNARD, Samuel et GAUTIER, Gaël. *New Field Stopper*

Process to Strengthen Double MESA-GLASS AC Switches' Reliability During Rugged Application Environments. Microelectronic Engineering [en ligne]. 10 juillet 2015. Vol. 2, n° 3, pp. 1-8. [Consulté le 14 juin 2016]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/288822326_New_Field_Stopper_Process_to_Strengthen_Double_MESA-GLASS_AC_Switches'_Reliability_During_Rugged_Application_Environments.

JENSEN, Finn. *Electronic component reliability: fundamentals, modelling, evaluation, and assurance*. Chichester, England ; New York : Wiley, 1995. Wiley series in quality and reliability engineering. ISBN 978-0-471-95296-1. TK7870 .J46 1995.

MERCAULT, Emmanuel. *Contribution à l'intégration d'un indicateur de vieillissement lié à l'état mécanique de composants électroniques de puissance* [en ligne]. Thèse de doctorat en micro-nanoélectronique. Toulouse : Université de Toulouse, 2012. [Consulté le 21 octobre 2015]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00728764620>.

SAMPEI, M., YAMADA, T., TANABE, S., TAKEDA, H. et KOBAYASHI, S. *Secular change in characteristics of thyristors used in HVDC valve*. IEEE Transactions on Power Delivery. juillet 1997. Vol. 12, n° 3, pp. 1159-1167. DOI 10.1109/61.636928.

SGUIER, Guy, DELARUE, Philippe et LABRIQUE, Francis. *Electronique de puissance - Structures, fonctions de base, principales applications*. 9e édition. Paris : Dunod, 2011. ISBN 2-10-056701-2.

SONY. *Sony Semiconductor Quality and Reliability HandBook - Chapter 4 - Reliability test and reliability prediction* [en ligne]. août 2011. [Consulté le 7 août 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.sony.net/Products/SC-HP/tec/catalog/pdf/qr_4.pdf.

STAMATIS, D. H. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. 2nd ed., and expanded. Milwaukee, Wisc : ASQ Quality Press, 2003. ISBN 978-0-87389-598-9. TS176 .S7517 2003.

STMICROELECTRONICS COMPAGNY. *SCRs, TRIAC and AC Switches Databook*. 4. Paris, 1995.

VISHAY SEMICONDUCTORS. *Quality Information* [en ligne]. 12 mars 2008. [Consulté le 5 mars 2016]. Disponible à l'adresse : <http://www.vishay.com/docs/80119/80119.pdf>.

WINTRICH, Arendt. *Application Manual Power Semiconductors* [en ligne]. 2011. SEMIKRON International GmbH. [Consulté le 23 décembre 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.semikron.com/skcompub/en/section1_Power_Semiconductors_Basic_Operating_Principles_section2_Basics.pdf.

YAMADA, Yasushi. *Power semiconductor module using a bonding film with anisotropic thermal conduction*. *Microelectronics Reliability* [en ligne]. septembre 2012. Vol. 52, n° 9–10, pp. 2443-2446. [Consulté le 30 juin 2015]. DOI 10.1016/j.microrel.2012.06.087. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271412002843>.

Table des annexes

Annexe 1 Sélection des essais de fiabilité lors d'un changement de procédé.....	84
---	----

Liste des figures

Figure 1 : Diagramme puissance en fonction de la fréquence par type d'interrupteur et leurs applications [1]	16
Figure 2 : Symbole du thyristor (a) et schéma équivalent du thyristor à base de transistors bipolaires (b).....	17
Figure 3 : Structure semiconductrice du thyristor [4].....	17
Figure 4 : Caractéristique statique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'un thyristor à l'état bloqué (a) et à l'état passant (b) [5]	18
Figure 5 : Exemples de solutions pour commander une charge raccordée à un réseau alternatif [5]	19
Figure 6 : Symbole du TRIAC (a) et schéma équivalent du TRIAC à base de thyristors...	20
Figure 7 : Structure semiconductrice du TRIAC [4]	21
Figure 8 : Stratégie de commande d'un TRIAC [3]	21
Figure 9 : Quatre cadrans d'amorçage d'un TRIAC [5].....	22
Figure 10 : Caractéristique statique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'un TRIAC à l'état bloqué (a) et à l'état passant (b) [5]	23
Figure 11 : Technologies de fabrication de la puce TRIAC [7]	24
Figure 12 : Procédé d'assemblage d'un TRIAC en version isolée ou non [5]	25
Figure 13 : Notion de résistance thermique sur un thyristor ou un TRIAC [6].....	26
Figure 14 : Courbe en baignoire	29
Figure 15 : Fissure du talon du fil en aluminium d'un module à MOSFET après 29 760 cycles de température ($I_0 = 150 \text{ A}$, $T_c = 90 \text{ °C}$, $T_{j(\max)} = 170 \text{ °C}$, $T_{ON} = 10 \text{ s}$, $T_{OFF} = 20 \text{ s}$) [12]	31
Figure 16 : Fissures du joint de brasure sur une structure TRIAC après 50 000 cycles de température ($I_0 = 18 \text{ A}$, $T_c = 130 \text{ °C}$, $T_{j(\max)} = 145 \text{ °C}$, $T_{ON} = \text{Non communiqué}$, $T_{OFF} = 86 \text{ s}$) [13].....	31

Figure 17 : Étapes de l'apparition des dégradations au niveau du diélectrique sous contraintes TDDDB.....	32
Figure 18 : Croissance d'un intermétallique apparu lors de l'étape d'interconnexion de la puce et de son boîtier après 1 000 heures de stockage à 150 °C [14].....	34
Figure 19 : Effet de l'accélération du temps sur la courbe en baignoire	35
Figure 20 : Relation entre F(t) et R(t).....	39
Figure 21 : Densité de probabilité f(t)	40
Figure 22 : Densité de probabilité f(t) d'une distribution normale pour différentes valeurs de σ et de μ	42
Figure 23 : Densité de probabilité f(t) d'une distribution log-normale pour différentes valeurs de σ et de μ	43
Figure 24 : Densité de probabilité f(t) d'une distribution exponentielle pour différentes valeurs de λ	44
Figure 25 : Densité de probabilité f(t) d'une distribution de Weibull pour différentes valeurs de β	45
Figure 26 : Courant de fuite dans un thyristor avec passivation en verre pour V_{AK} positif et V_{AK} négatif [20].....	46
Figure 27 : Circuit de blocage alternativement en direct et en inverse en tension alternative sinusoïdale [22]	47
Figure 28 : Circuit de blocage en direct en tension continue [22].....	47
Figure 29 : Tensions de retournement V_{BO+} et V_{BO-} en fonction de la température de jonction (TRIAC XXXXX-XXXXXXXX/X : XX A, XXX V, $I_{GT} = 35$ mA, $T_{j(max)} = 125$ °C, boîtier TO220 non isolé)	51
Figure 30 : Évolution des courants de fuite en fonction de la température de jonction T_j et de la tenue en tension (TRIAC XXXXX-XXXXXXXX/X: XX A, XXX V, $I_{GT} = 35$ mA, $T_{j(max)} = 125$ °C, boîtier TO220 non isolé).....	53
Figure 31 : Réaction en chaîne positive à l'origine de l'emballement thermique.....	53
Figure 32 : Pertes du TRIAC à l'état bloqué	54

Figure 33 : Photo d'un rack dans une étuve comprenant 40 TRIACs XXXXX-XXXXXXXX/X montés sur radiateurs.....	58
Figure 34 : Schéma de principe de la mesure du courant de fuite traversant les composants sous stress de type HTRB.....	60
Figure 35 : Évolution du courant de fuite (mA) en fonction du temps (h) pour l'essai polarisé en face arrière à 700 V et à température ambiante de 125 °C	62
Figure 36 : Impact de la tension en DC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés en face arrière	63
Figure 37 : Impact de la tension en DC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés en face arrière	65
Figure 38 : Impact de la tension en DC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés en face avant.....	66
Figure 39 : Impact de la tension en DC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés en face avant.....	67
Figure 40 : Évolution du courant de fuite (mA) en fonction du temps (h) pour l'essai polarisé en alternatif à une amplitude de 700 V et à température ambiante de 125 °C.....	68
Figure 41 : Impact de la tension en AC et de la température sur la durée de vie des TRIACs	69
Figure 42 : Impact de la tension en AC et de la température sur la durée de vie des TRIACs polarisés avec une tension alternative sinusoïdale de la fréquence du secteur.....	71
Figure 43 : Impact de la tension en AC et de la température sur la durée de vie des TRIACs exprimé en FIT polarisés avec une tension alternative sinusoïdale de la fréquence du secteur.....	72
Figure 44 : Facteur d'accélération entre un essai polarisé en AC par rapport à un essai polarisé en DC (face arrière)	73

Liste des tableaux

Tableau 1 : Signification des paramètres principaux du thyristor	18
Tableau 2 : Signification des paramètres principaux du TRIAC.....	23
Tableau 3 : Résumé d'une procédure de qualification typique basée sur la compréhension des mécanismes de défaillance	49
Tableau 4 : Matrice des essais de fiabilité réalisés sur des XXXXX-XXXXXXX/X.....	57
Tableau 5 : Synthèse des valeurs des paramètres clés de l'ajustement des durées de vie des TRIACs polarisés en DC en face arrière	64
Tableau 6 : Synthèse des valeurs des paramètres de la loi d'Eyring définissant le MTTF en fonction de la température et de l'amplitude de la tension lorsque les TRIACs sont polarisés en face arrière	65
Tableau 7 : Synthèse des valeurs des paramètres clés de l'ajustement des durées de vie des TRIACs polarisés en DC en face avant	67
Tableau 8 : Synthèse des valeurs des paramètres clés de l'ajustement des durées de vie des TRIACs polarisés en tension alternative sinusoïdale de fréquence 50 Hz	70
Tableau 9 : Synthèse des valeurs des paramètres de la loi d'Eyring définissant le MTTF en fonction de la température et de l'amplitude de la tension lorsque les TRIACs sont polarisés avec une tension alternative sinusoïdale à 50 Hz	71

Vieillessement du TRIAC soumis à des essais de type fiabilité du type HTRB

Mémoire d'Ingénieur CNAM, Tours, 2016

RESUMÉ

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur l'évaluation de vieillissement des TRIACs pour des applications industrielles, grand public et d'éclairage. Nous avons cherché à évaluer la durée de vie de ces TRIACs et comprendre les mécanismes de dégradation lorsque ces derniers sont à l'état bloqué.

La première partie de ce travail a consisté à effectuer un état de l'art portant sur les TRIACs, les notions utilisées en fiabilité, et enfin les impacts de la température et de la tension sur les paramètres statiques du TRIAC. Ce travail nous a permis d'appréhender les dégradations qui peuvent apparaître pour des TRIACs à l'état bloqué.

Dans la dernière partie de ce mémoire, nous avons analysé expérimentalement l'impact de la température et de la tension (DC, AC) sur la durée de vie des TRIACs. Ce travail a permis de déterminer les facteurs d'accélération des défaillances. L'enjeu de ce mémoire est de mettre en place des outils de prédiction de durée de vie des TRIACs. Nous avons alors proposé un modèle qui s'appuie sur les tests expérimentaux.

Mots clés : blocage en haute température, contamination, courant de fuite, durée de vie, fiabilité normative, HTRB, log-normale, loi d'extrapolation, prédiction, tests accélérés, TRIAC.

SUMMARY

This work deals with the TRIACs aging, used for industrial, lighting, and home appliance. We evaluated the lifetime of these TRIACs and analysed their failure mechanisms when devices were off state.

The first part of this work consisted in carrying out a benchmark done on TRIACs, concepts used in reliability, and finally the impacts of the temperature and voltage of TRIAC static parameters. This work allowed us to understand the failure that may occur during the off state TRIACs.

In the last part of this document, we analysed experimentally the impact of the temperature and voltage (DC, AC) on the lifetime of TRIACs. This study allowed us to define the accelerations factors of failures. The challenge of this work is to build a lifetime prediction model for TRIACs. Thus, we proposed a model based on experimental results.

Key words : high temperature blocking, contamination, leakage current, duration life, normative reliability, HTRB, lognormal, extrapolation law, prediction, accelerated life tests, TRIAC.