



HAL
open science

Modélisations et méthodes numériques pour l'intégration d'une solution de suivi de vieillissement d'un assemblage de puissance

Antoine Renaud

► **To cite this version:**

Antoine Renaud. Modélisations et méthodes numériques pour l'intégration d'une solution de suivi de vieillissement d'un assemblage de puissance. Electronique. Université de Bordeaux, 2018. Français. NNT : 2018BORD0052 . tel-01830693

HAL Id: tel-01830693

<https://theses.hal.science/tel-01830693>

Submitted on 5 Jul 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.

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Bordeaux

École doctorale Sciences Physiques et de l'Ingénieur
Spécialité Électronique

par

Antoine RENAUD

Modélisations et méthodes numériques pour l'intégration d'une solution de suivi de vieillesse d'un assemblage de puissance

Sous la direction de : **Éric WOIRGARD**

Soutenue le 24 Mai 2018

Membres du jury :

Mme Geneviève DUCHAMP,	Professeur des Universités, Université de Bordeaux	Présidente du jury
M. Zoubir KHATIR,	Directeur de recherche, IFSTTAR	Rapporteur
M. Olivier PANTALÉ,	Professeur des Universités, ENI de Tarbes	Rapporteur
M. Frédéric ROTELLA ,	Professeur des Universités, ENI de Tarbes	Examineur
M. Paul-Étienne VIDAL,	Maître de conférence (HDR), ENI de Tarbes	Examineur
Mme Alexandrine GUÉDON-GRACIA,	Maître de conférence, Université de Bordeaux	Examinatrice
M. Toni YOUSSEF,	Docteur, Safran	Invité
M. Éric WOIRGARD,	Professeur des Universités, Université de Bordeaux	Directeur de thèse



« L'esprit n'use de sa faculté créatrice que quand l'expérience lui en impose la nécessité. »

Henri Poincaré



Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse ont été réalisés au sein de l'équipe «Puissance» du groupe «Fiabilité» du laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) à Bordeaux. Je souhaite donc en premier lieu remercier les directeurs successifs du laboratoire IMS, M. Claude Pellet et M. Yann Deval, pour m'avoir accueilli durant trois ans. Je tiens également à remercier M. Éric Woirgard et Mme Geneviève Duchamp qui ont dirigé successivement le groupe «Fiabilité» ainsi que M. Jean-Michel Vinassa, responsable de l'équipe «Puissance», pour leur accueil dans le groupe.

Un grand merci à mon directeur de thèse, M. Éric Woirgard, pour m'avoir offert cette opportunité d'expérience passionnante et pour avoir su m'accompagner et me guider dans ces travaux. Nos échanges ont toujours été très enrichissants et j'ai beaucoup appris grâce à lui durant ces trois années.

Je tiens également à remercier tous les membres du jury de thèse : merci aux rapporteurs, M. Zoubir Khatir et M. Olivier Pantalé, d'avoir accordé du temps à l'évaluation de mon travail. Merci aux examinateurs, Mme Alexandrine Guédon-Gracia, Mme Geneviève Duchamp, M. Frédéric Rotella et M. Paul-Étienne Vidal, ainsi qu'à M. Toni Youssef, d'avoir accepté de prendre part à ce jury.

Tous mes remerciements aux collègues de l'IMS, permanents, ingénieurs, post-docs, doctorants ou stagiaires. Loïc, Jean-Michel, Olivier, Alexandrine, Hélène, Jean-Yves, Isabelle, Simone, Mohammed, Andrii, Raphael, Toni, Mickael, Fédia, Faiçal, Maxime, Issam, Omar, Yuanci, Romain, Pierre, Cyril et Giap, ces années passées ensemble ont été aussi agréables qu'enrichissantes. Un merci tout particulier à Jean-Yves Deletage pour sa disponibilité et son aide en de nombreuses circonstances, ainsi qu'à Toni, sans qui rien de tout cela ne serait arrivé.

Merci à John, Anthony, Jérémie, Valentin, pour la bonne humeur partagée au cours de nos aventures. Merci à Joëlle et Patrick, qui dans leur gentillesse infinie ont cherché la moindre faute dans ce document.

Enfin, j'adresse ma plus grande reconnaissance à ma famille. À mes parents d'abord, qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager. À mes sœurs ensuite, pour leur écoute et leur compréhension. À mes beau-frères bien sûr, grands frères de cœur que j'adore. À Julie, pour son calme, son soutien discret mais sans faille, et surtout sa patience. Je ne vous remercierai jamais assez pour tout ce que vous m'avez apporté et ce que vous continuerez de m'apprendre à l'avenir.

Table des matières

Remerciements	v
Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Introduction générale	1
1 État de l'art : modules de puissance et mécanismes de défaillance	5
1.1 Introduction	6
1.2 Le projet CAPTIF	6
1.3 Les assemblages en électronique de puissance	7
1.4 Les mécanismes d'endommagement des modules de puissance	15
1.5 Gestion de la durée de vie et suivi de vieillissement	18
1.6 Conclusion	23
1.7 Références	24
2 Modèles et indicateur de vieillissement	29
2.1 Notions de mécanique : lois de comportement des matériaux	30
2.2 Définition et choix d'un indicateur de vieillissement	37
2.3 Définition du véhicule de test	42
2.4 Positionnement et intégration des capteurs	49
2.5 Construction du lien entre mesure et indicateur	52
2.6 Conclusion	64
2.7 Références	67
3 Modélisations pour le suivi de vieillissement	71
3.1 Généralités sur la mise en place de la démarche	72
3.2 Première application	77
3.3 Évolution de la démarche	92
3.4 Suivi de vieillissement	104
3.5 Capteurs de température	109
3.6 Conclusion	115

3.7 Références	117
Conclusion générale	119

Liste des figures

1.1	Coupe d'un module de puissance	8
1.2	Structure d'un semi-conducteur de type diode	8
1.3	Procédé de frittage en phase solide (haut) et évolution de la structure granulaire lors du frittage (bas)	10
1.4	Substrat Métallique Isolé (gauche) et <i>Direct Bonded Copper</i> (droite)	11
1.5	Substrat <i>Active Metal Brazed</i>	12
1.6	Module IGBT avec fils de câblage	12
1.7	Procédure de <i>wedge bonding</i>	13
1.8	Procédure de <i>ball bonding</i>	13
1.9	Diodes avec rubans de câblage	13
1.10	Assemblages 3D avec billes	14
1.11	Coulage du gel encapsulant dans un boîtier	14
1.12	Boîtier et semelle d'un module Infineon	15
1.13	Module vissé sur un dissipateur à air	15
1.14	Fissuration de la passivation supérieure d'une puce	16
1.15	Fissure et décollement du pied de fil	16
1.16	Joint intact (gauche), avec vacuole (milieu) et avec fissure (droite)	17
1.17	Fissure dans la céramique d'un substrat	17
1.18	Anticipation de panne à l'aide d'un dispositif fusible	19
1.19	Principe de la méthode LCM	21
2.1	Réponse d'un matériau élastique linéaire (a) et non linéaire (b) à une charge-décharge	30
2.2	Courbe caractéristique d'un matériau avec plasticité	31
2.3	Exemple de charge-décharge simple sur matériau plastique	32
2.4	Fluage et relaxation : deux effets d'un même phénomène	32
2.5	Exemple de rupture fragile (a), ductile (b) et complètement ductile (c)	33
2.6	Solide en traction uniaxiale	34
2.7	Réponse type d'un matériau quelconque à une sollicitation en traction uniaxiale	35
2.8	Charge-décharge monotone d'un matériau élastoplastique	35
2.9	Chargement cyclique [7]	36
2.10	Dimensions de l'IGBT de test (mm)	42

2.11	Vue en coupe de l'assemblage	43
2.12	Modèle quart de puce : modélisation simplifiée de la géométrie de l'assemblage	44
2.13	Modèle quart de puce : plans de symétrie	44
2.14	Chargement thermomécanique du modèle éléments finis	49
2.15	Distribution de la densité d'énergie de déformation plastique dans un joint fritté après 5 cycles	50
2.16	Positions potentielles de capteurs sur coupe de l'assemblage	51
2.17	Coupe d'un joint de frittage (à g.) et d'un joint de brasure (à d.)	52
2.18	Matrice des corrélations linéaires	54
2.19	Diagramme des coefficients normalisés	55
2.20	Illustration de quatre méthodes d'échantillonnage	56
2.21	Exemple d'un plan factoriel 3^3	57
2.22	Exemple d'un plan 3^3 factoriel	58
2.23	Exemple d'un plan composite centré	58
2.24	Exemple d'un plan de type hypercube latin	59
2.25	Exemple d'un plan de type hypercube latin optimisé	60
2.26	Exemple d'une surface de réponse avec courbe isovaleur et extrema locaux	61
2.27	Exemple d'histogramme de résidus centrés réduits en fonction des observations	63
2.28	Exemples de graphes prédictions-observations	64
3.1	Méthode des surfaces de réponse classique	73
3.2	Méthode des surfaces de réponse adaptée à notre application	73
3.3	Exploitation d'une surface de réponse pour le suivi de vieillissement	73
3.4	Éléments utilisés pour le calcul de la DED moyenne	74
3.5	Chargements utilisés dans les simulations comparatives	76
3.6	Influence de l'ordre des opérations sur la DED finale	77
3.7	Premier plan d'expériences	78
3.8	Evolution de la DED au cours du temps lors d'un cyclage en température	79
3.9	Périodicité de la déformation	79
3.10	Intégrale de la différence $ T_{ref} - T(\tau) $	80
3.11	Formes intégrées de la température et de la déformation au cours du temps	81
3.12	Intégration par la méthode des trapèzes	81
3.13	DED et I_c : nuage de points	82
3.14	Régression linéaire par I_c	83
3.15	Régression linéaire sur une série de données tronquée	83
3.16	Régression logarithmique par I_c	84
3.17	Graphe des prédictions-observations	84
3.18	Régression linéaire par I_c	85
3.19	Graphe des prédictions-observations	85
3.20	DED et $I_{\Delta T}$: nuage de points	86

3.21 Régression linéaire par $I_{\Delta T}$	86
3.22 Régression logarithmique par $I_{\Delta T}$	87
3.23 Coefficients α et β : nuage de points	88
3.24 Régressions bilinéaires pour les coefficients α et β	89
3.25 Contributions des températures aux modèles des coefficients α et β	90
3.26 Graphes des prédictions-observations	90
3.27 Second plan d'expériences	92
3.28 Données regroupées selon la phase du cyclage	94
3.29 DED et $\Delta \int T_{ref} - T(\tau) d\tau$: nuages de points	96
3.30 Régression non linéaire sur $\Delta \int T_{ref} - T(\tau) d\tau$	96
3.31 Régression non linéaire sur le logarithme de $\Delta \int T_{ref} - T(\tau) d\tau$	97
3.32 Matrices des corrélations	97
3.33 Matrices des corrélations	98
3.34 Graphe des prédictions-observations	99
3.35 DED et $\Delta \int T_{ref} - T(\tau) d\tau$: nuages de points	99
3.36 Graphe des prédictions-observations	100
3.37 Matrices des corrélations	100
3.38 Suivi de vieillissement à l'aide de capteurs embarqués	108
3.39 Capteur à nanoparticules	109
3.40 Les véhicules de test avant vieillissement	110
3.41 Enceinte climatique utilisée Excal 1423-TE	110
3.42 Centrale d'acquisition Keysight 34970A	111
3.43 Température imposée aux capteurs durant le vieillissement	111
3.44 Cyclage de capteurs à $5^\circ / \text{min}$	112
3.45 Signaux de véhicules de test défaillants	112
3.46 Dérive des véhicules de test	113
3.47 Dérive sur 20 jours	113
3.48 Dérive des véhicules de test	114
3.49 Cyclage de capteurs à $10^\circ / \text{min}$	114
3.50 Principe d'un suivi de vieillissement à l'aide de capteurs embarqués	123

Liste des tableaux

1.1	Propriétés physiques de quelques alliages de brasure [8, 9]	9
1.2	Propriétés de l'argent fritté et de brasures courantes [10]	10
1.3	Module d'Young de l'argent fritté en fonction de la température[11]	10
1.4	Propriétés des céramiques utilisées pour la réalisation de substrats de puissance [13]	11
1.5	Propriétés physiques des semelles de puissance [18, 19]	12
1.6	Exemples de chargements rencontrés par un module	20
2.1	Propriétés physiques du monocristal de silicium [29]	45
2.2	Paramètres du modèle d'Anand pour l'argent fritté [33]	47
2.3	Propriétés physiques de l'argent fritté [29]	47
2.4	Module d'Young de l'argent fritté en fonction de la température [33]	47
2.5	Propriétés physiques des métallisations cuivre [29]	48
2.6	Modèle de Chaboche du cuivre [34]	48
2.7	Propriétés physiques de la céramique Si_3N_4 [35]	48
3.1	Coefficients de régression – Palier haut	102
3.2	Coefficients de régression – Palier bas	103
3.3	Coefficients de régression – Transition croissante	103
3.4	Coefficients de régression – Transition décroissante	103

Introduction générale

Contexte

L'évolution des besoins et des contraintes des industries du transport (aérien, automobile et ferroviaire) en constante recherche d'améliorations de performance ou de diminution des émissions polluantes, conduit à une utilisation généralisée des systèmes électriques et électroniques. Les programmes européens *Clean Sky* et *Clean Sky 2* encourageant par exemple le concept d'avion "plus électrique" et le remplacement des systèmes non propulsifs reposant sur des organes hydrauliques ou sur l'utilisation des moteurs (commandes de vol, roulage des appareils) par des équivalents électriques (actionneur de surfaces ou roulage électrique). Le développement croissant de la voiture électrique implique également une utilisation massive de systèmes électriques, en particulier pour assurer les fonctions motrices du véhicule. Les systèmes de conversion d'énergie permettant de transformer l'énergie électrique stockée dans une batterie en une puissance motrice sont des acteurs majeurs dans les performances d'un véhicule électrique.

Pour répondre aux objectifs des industries, les systèmes de conversion d'énergie électrique sont confrontés à une forte demande de miniaturisation malgré des applications de plus en plus exigeantes. En conséquence, les niveaux de températures et d'énergie augmentent drastiquement, ce qui renforce la criticité de leur fiabilité. La gestion de la fiabilité permet de diminuer les coûts de maintenance, de limiter le risque de défaillance critique et donc d'augmenter la sécurité d'exploitation. C'est pourquoi les comportements en vieillissement et les mécanismes d'endommagement intervenant au cours de la vie des dispositifs de conversion d'énergie électrique font l'objet d'études spécifiques.

Ces dispositifs reposent sur des structures permettant d'exploiter les fonctionnalités d'un composant et que l'on appelle *assemblages de puissance*. Lors de son utilisation, un assemblage de puissance est soumis à d'importantes contraintes thermomécaniques générées par la sollicitation de sa fonction électrique et les conditions imposées par son environnement. Les milieux confinés ou les environnements extrêmes (températures très élevées ou très basses, humidité, vibrations) ont un impact direct sur l'endommagement des assemblages de puissance.

La directive européenne RoHS (Restriction of Hazardous Substances) visant à limiter l'usage de certaines substances, présentes notamment dans les assemblages de puissance, de nouveaux matériaux (brasure or-étain ou argent fritté par exemple) sont régulièrement introduits pour respecter cette réglementation et pour contribuer à l'amélioration continue des performances des dispositifs de conversion d'énergie. Ce renouvellement de matériaux, associé à des conditions d'utilisation toujours plus sévères, conduit à la réalisation de nombreuses études de caractérisation en vieillissement pour augmenter la fiabilité des dispositifs d'électronique de puissance.

Enjeux et objectifs

L'étude de la fiabilité d'un module d'électronique de puissance fait traditionnellement intervenir des modèles de prédiction de durée de vie pour déterminer un nombre de cycles avant défaillance. Ces modèles reposent sur l'utilisation d'un profil de mission. La justesse des prédictions émises dépend donc de l'adéquation de ces profils de mission par rapport aux conditions réelles d'utilisation, ainsi que de la dispersion des sujets (homogénéité des propriétés des matériaux et des procédés de fabrication). Une fois la prédiction formulée, seul un décompte de cette durée de vie prévisionnelle permet d'évaluer le potentiel de service d'un module. Aucune adaptation aux conditions d'usage n'est possible au cours de la vie de l'assemblage (un changement de profil de mission ou la prise en compte de conditions imprévues, par exemple) pour assurer en continu la fiabilité du système.

L'objectif de ces travaux de thèse est de proposer une solution de gestion de la fiabilité qui permette de suivre le vieillissement d'un module d'électronique de puissance tout au long de sa vie. Une telle approche a pour ambition d'anticiper la fin de vie d'un composant. Nous nous intéressons à des outils de modélisation et à des méthodes numériques afin de proposer une démarche de suivi de l'état de santé d'un assemblage d'électronique de puissance.

En caractérisant un endommagement plutôt qu'une durée de vie prévisionnelle, l'objectif est double. En premier lieu, le risque d'une panne critique est considérablement réduit puisque l'état d'usure du module est connu en temps réel, ce qui permet d'intervenir avant l'apparition d'une défaillance. Une solution de suivi d'endommagement s'adapte mieux à des conditions d'utilisation réelle qu'une prévision de durée de vie basée sur un cycle d'utilisation type. La possibilité de connaître l'état d'endommagement d'un équipement permet de planifier sa maintenance de manière plus efficace et de réduire les interventions hors plan. D'autre part, le suivi de vieillissement permet de maximiser l'utilisation des ressources matérielles en évitant le remplacement d'un équipement arrivé au terme de sa durée de vie prévisionnelle mais dont le potentiel de service n'a pas été pleinement atteint. Le suivi de vieillissement est donc un moyen de contenir les coûts de fonctionnement tout en valorisant au maximum les performances et la durée de vie d'un module de puissance.

Plan du manuscrit

Ces travaux de thèse s'organisent en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à la présentation de notre support de travail : le module d'électronique de puissance. Les éléments qui le composent et les principales sources de défaillance sont introduits. Nous y présentons également les différentes approches de gestion de la fiabilité et leurs spécificités respectives.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons aux modèles utilisés pour caractériser les matériaux qui constituent un assemblage de puissance, ainsi qu'à ceux destinés à évaluer la durée de vie d'un module. Les modèles les plus couramment utilisés pour réaliser des prédictions de durée de vie en électronique de puissance sont présentés et comparés, afin d'identifier les hypothèses fondatrices de chacun d'entre eux. Les mécanismes impliqués dans le vieillissement d'un assemblage d'électronique de puissance nous permettent alors de suggérer un indicateur de vieillissement pertinent, sur lequel s'appuie la

suite de notre étude. Finalement, les méthodes et outils mathématiques utilisés dans le cadre de ces travaux de recherche sont également présentés.

Enfin, le troisième et dernier chapitre est consacré à l'exploitation de ces outils et à la construction des modélisations nécessaires au suivi de vieillissement. Deux itérations successives nous permettent de développer les concepts introduits au chapitre précédent ainsi que de formaliser une approche pour observer l'évolution de notre indicateur de vieillissement à partir de mesures issues de capteurs embarqués. Les bénéfices et limitations d'une telle approche sont analysés pour identifier les points clés pour améliorer notre démarche. En dernier lieu, dans le cadre d'une étude collaborative, deux essais de vieillissement ont également été menés afin de caractériser des capteurs de température, dans l'optique de les intégrer à un assemblage.

Chapitre 1

État de l'art : modules de puissance et mécanismes de défaillance

1.1 Introduction

L'électronique de puissance désigne l'ensemble des applications de conversion d'énergie électrique : redresseurs, onduleurs, gradateurs, hacheurs, cyclo-convertisseurs et éléments de stockage (batteries et capacités) sont des exemples de dispositifs d'électronique de puissance. L'alimentation d'un système électrique ou électronique quel qu'il soit est confiée à des circuits d'électronique de puissance. La conception de ces systèmes fait appel à des techniques et méthodes pluri-disciplinaires (chimie et physique des matériaux, thermique, mécanique, modélisation et simulation numérique) dont le présent document est un exemple.

L'un des enjeux majeurs de l'électronique de puissance est la fiabilité des systèmes de conversion d'énergie, et l'étude de leur vieillissement à des fins de gestion de durée de vie. C'est la raison d'être du projet CAPTIF, présenté dans la section suivante, et l'axe central de ces travaux de thèse. Ce premier chapitre s'articulera autour de trois points : la présentation générale d'un dispositif d'électronique de puissance et les technologies associées, les types de défaillances rencontrées et leurs origines, et enfin les différentes méthodes utilisées pour gérer leur apparition au cours de la vie du produit.

1.2 Le projet CAPTIF

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été menés dans le cadre du projet CAPTIF (CAPTeurs innovants Intégrés et logiciels au cœur d'un dispositiF d'électronique de puissance), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Ce projet a pour but de proposer une solution avancée de gestion de la durée de vie d'un assemblage d'électronique de puissance, basée sur l'intégration de capteurs et le traitement de leurs mesures.

1.2.1 Contexte de la thèse

L'apparition conjointe des matériaux semi-conducteurs grand gap (SiC, GaN) et des techniques d'assemblages hybrides 3D améliore significativement les performances des modules de puissance, qui doivent fonctionner dans un environnement sévère : haute température, densité d'intégration et de puissance, haute fréquence de commutation.

Le but final du projet CAPTIF est de concevoir un démonstrateur permettant, par le traitement de données multi-physiques obtenues à partir de capteurs intégrés, d'effectuer un suivi de l'état de santé d'un module en temps réel, pendant son fonctionnement. Ce suivi doit permettre le diagnostic de l'état de santé des modules, l'anticipation des pannes et l'optimisation de la maintenance.

1.2.2 Partenaires du projet

Le consortium du projet est composé de cinq partenaires : deux entités académiques, et trois industriels. Le **Laboratoire Génie de Production** (LGP) est en charge de la coordination et de la gestion du projet. Il est aussi reponsable du développement de capteurs électromagnétiques et des méthodes de traitement des données de mesures. Le **laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système** (IMS) au sein duquel cette thèse s'est déroulée, est en charge des modélisations thermomécaniques et des méthodologies né-

cessaires à la corrélation entre les mesures et les indicateurs du vieillissement de l'assemblage de puissance.

La société **aPSI^{3D}** définit les besoins du marché et s'assure que les technologies et concepts développés dans le cadre du projet sont intégrables aux assemblages de puissance actuels. La société **Nanolike** conçoit et fabrique des capteurs de température et des jauges de déformation. Elle fournit les capteurs qui seront jugés utiles pour remplir les objectifs du projet CAPTIF. Enfin, la **Plateforme d'innovation Mécatronique de puissance et Management de l'Énergie** (PRIMES) est une plateforme de mutualisation de moyens pour industriels. Elle est le support de développement du démonstrateur et permet de mettre au point le procédé d'assemblage d'un module instrumenté.

Les différentes définitions techniques du véhicule de test (choix de la puce, du substrat, de la technologie d'assemblage) ont été décidées en consultations avec les partenaires, et ont évolué selon les avancées réalisées et les contraintes qui se sont imposées au cours du projet. Ces choix seront présentés dans le chapitre suivant.

1.2.3 Enjeux et objectifs

Pour des raisons économiques ou de sécurité, les différentes maintenances des systèmes de conversion d'énergies sont planifiées pour remplacer à intervalles réguliers certains éléments, afin de maximiser la disponibilité opérationnelle des équipements et limiter les phases de maintenances imprévues. Dans ce processus, des modules de puissance fonctionnels sont remplacés par leur équivalent neuf, lorsqu'un seuil de temps d'utilisation est atteint. Ce seuil est calculé sur la base d'un profil de mission moyen, qui n'est pas nécessairement en adéquation parfaite avec les conditions d'usage réel rencontrées par un module en exploitation. Par conséquent, selon l'importance des variations de ces conditions, un certain potentiel de fonctionnement est sacrifié, au profit de la disponibilité d'un équipement mais au détriment de l'efficacité économique.

Le projet CAPTIF a pour objectif de changer ce compromis, en proposant une solution permettant à l'opérateur de tels systèmes de n'effectuer un remplacement que lorsqu'un module est réellement arrivé en fin de vie. Cela présuppose un changement d'approche dans la gestion de cette durée de vie : il n'est plus questions de déterminer une durée de vie moyenne du module pour un panel large de profil de missions, mais de prendre en compte l'endommagement subi en conditions réelles pour ajuster le potentiel de fonctionnement restant. Ce projet s'inscrit donc dans une démarche de réduction de coût et d'économies de ressources autant que d'augmentation de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes.

1.3 Les assemblages en électronique de puissance

1.3.1 Généralités

Un module de puissance est un dispositif constitué de composants semi-conducteurs (diode, transistor, thyristor) interconnectés dans un boîtier et destinés à réaliser des conversions d'énergie. Ces conversions sont à l'origine d'un échauffement des composants, que l'architecture du module a pour but d'évacuer. La section 2.3.1 introduit la structure générale d'un module de puissance et détaille ses différents éléments constitutifs ainsi que les différentes technologies et matériaux couramment utilisés pour leur fabrication.

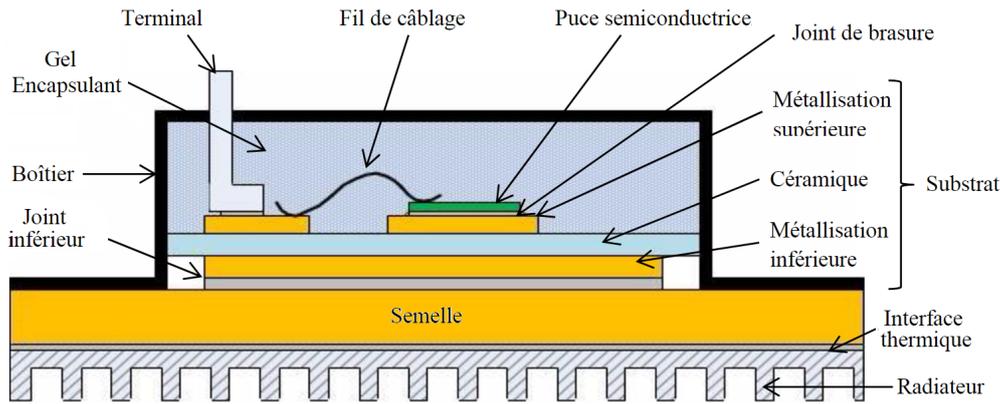


FIGURE 1.1 – Coupe d'un module de puissance

La figure 1.1 représente les différents éléments d'un assemblage de puissance avec composant unique (on parle alors de composant discret). La **puce** est reportée via un **joint d'attache** (brasé ou fritté) sur un **substrat**, lui-même attaché à une **semelle**. Les **connexions électriques internes** sont réalisées ici par des fils jusqu'aux terminaux électriques externes, puis noyés dans un **gel de protection**. Le **boîtier** protège les composants du milieu extérieur et est vissé sur un **système de refroidissement**.

1.3.2 Puces semi-conductrices et joint d'attache

Les **puces semi-conductrices** sont les éléments actifs d'un module de puissance et définissent son comportement électrique. Elles sont fabriquées à partir d'un matériau semi-conducteur, dopé pour lui conférer des propriétés électriques en adéquation avec la fonctionnalité finale souhaitée. Une surface de métallisation inférieure couvrant toute sa surface permet le report de la puce sur un substrat (cf. 1.3.3) tandis qu'une métallisation supérieure, présente sous forme de plots de soudure (ou *pads*), permet de réaliser les autres connexions nécessaires (cf.1.3.4). Une couche de passivation est ajoutée pour prévenir les fuites de courant en surface de puce [1]. Les puces présentent une structure verticale, dont un exemple est illustré en figure 1.2. Si différents matériaux (GaN, SiC, GeSi et même diamant [2–4]) sont utilisés pour conférer des propriétés spécifiques aux puces, la majorité d'entre-elles sont constituées de silicium.

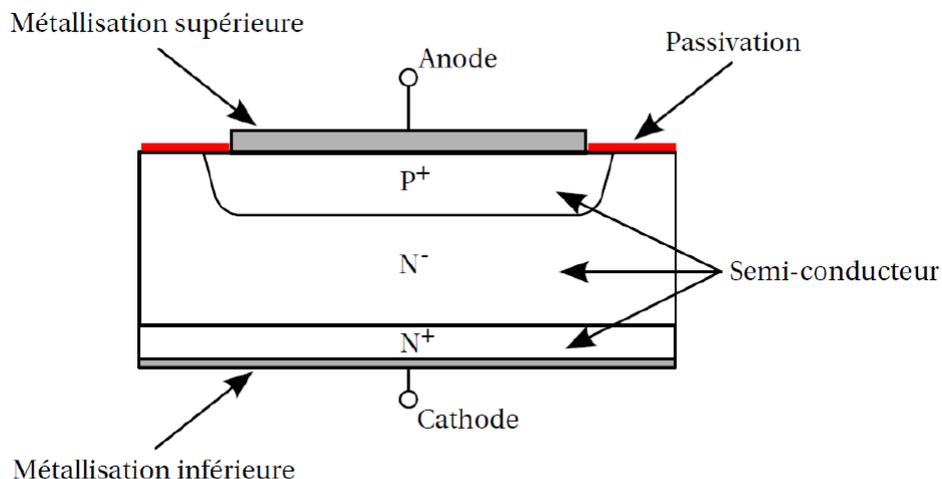


FIGURE 1.2 – Structure d'un semi-conducteur de type diode

Le joint d'attache fait le lien entre la face inférieure de la puce et le substrat. Son rôle est donc triple : effectuer une connexion électrique, garantir la tenue mécanique de la puce sur son support et dissiper les calories dégagées par la puce vers le substrat et la semelle (cf. 1.3.3). Son épaisseur et sa composition varient et les deux principaux types de joints d'attache sont le joint brasé, et le joint fritté [5].

Le joint brasé est constitué d'un alliage métallique. Avant brasure, il se présente sous forme de pâte ou de préforme, contenant des particules métalliques et des additifs destinés à favoriser le mouillage des surface à joindre et à empêcher l'oxydation des matériaux, qui nuit à la qualité de l'assemblage. Le procédé de brasure débute par une mise en place de la pâte ou de la préforme sur le substrat, sur laquelle on vient placer le composant. S'en suit une refusion de la brasure, à une température adaptée aux matériaux utilisés, puis un refroidissement jusqu'à température ambiante. Plusieurs alliages sont utilisés pour la brasure en électronique de puissance :

- Les alliages à base d'étain-plomb sont les plus répandus en électronique de puissance. La directive européenne RoHS limitant l'usage du plomb, ces alliages ne seront à terme plus utilisés (seule l'obtention d'une dérogation permet leur usage industriel)[6]. Cela conduit à la recherche d'alternatives, dont les alliages suivants sont des exemples.
- Les alliages à base d'or comme l'AuSn ou l'AuGe sont des alliages à haute température de fusion (respectivement 278°C et 356°C), destinées à des applications industrielles haute température.
- D'autres alliages, aux propriétés thermiques et mécaniques variées, sont présentés par V.R. Manikam et K.Y. Cheong [7].

Le tableau 1.1 regroupe les propriétés de quelques alliages de brasure destinées à des applications d'électronique de puissance (hautes ou basses températures).

TABLEAU 1.1 – Propriétés physiques de quelques alliages de brasure [8, 9]

Composition de l'alliage	Température de fusion (°C)	Module d'Young (GPa)	CDT (ppm/K)	Conductivité thermique (W/m.K)	Résistivité ($\mu\Omega.cm$)
63Sn/37Pb	183	40	25	51	14,7
58Bi/42Sn	195	42	15	19	35
52In/48Sn	215	23	20	34	15
95,5Sn/4Ag/0,5Cu	216	30	23	55	15
96,5Sn/3,5Ag	221	50	20	30-40	15
99,3Sn/0,7Cu	227	-	23	2	15
95Pb/5Sn	315	20	28,7	35	-

Le frittage en phase solide est un procédé de fabrication consistant à chauffer une poudre (avec ou sans compression) sans la mener jusqu'à la fusion pour obtenir la cohésion de particules en un solide. Cette méthode est exploitée dans certaines technologies de fabrication additive ainsi que pour la fabrication des céramiques, et est également utilisée en électronique de puissance pour reporter une puce sur un substrat (c.f. figure 1.3).

Le matériau à fritter se présente sous forme de pâte ou de film. Après une étape de mise en place intervient le déliantage : les additifs qui enrobent les particules à fritter sont évaporés lors d'une chauffe à leur température de vaporisation. On procède alors au frittage,

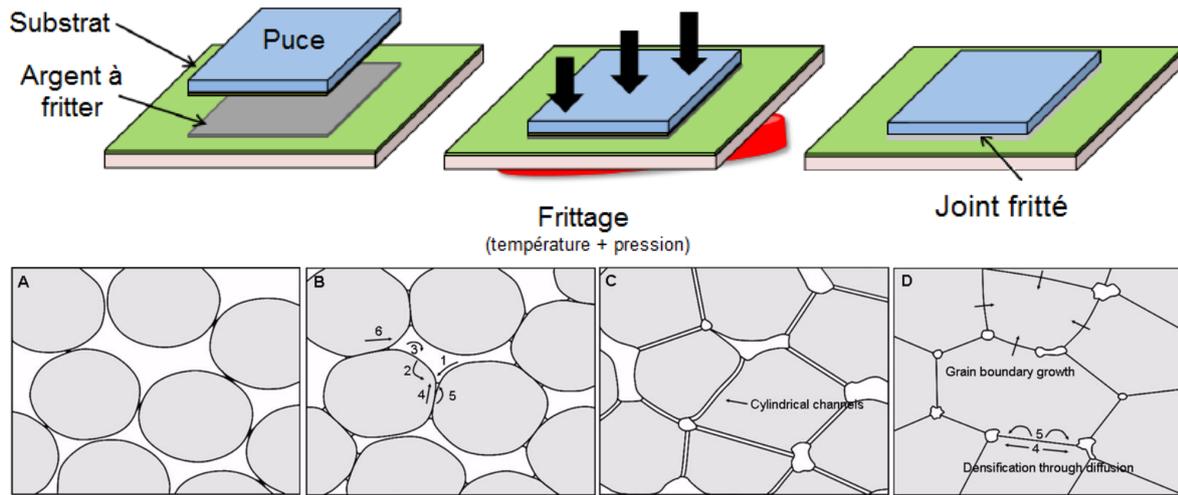


FIGURE 1.3 – Procédé de frittage en phase solide (haut) et évolution de la structure granulaire lors du frittage (bas)

en augmentant la température et, s'il y a lieu, en appliquant une pression. Sous l'effet de la chaleur, les grains se joignent les uns aux autres pour former un solide. La qualité d'un frittage est alors mesurée par la porosité résiduelle (que l'on cherche à minimiser) de ce solide résultant. Les durées et températures des étapes de déliantage, de frittage et de refroidissement post-frittage sont fonction des matériaux et volumes en jeu.

Les tableaux 1.2 et 1.3 regroupent les propriétés physiques de l'argent fritté ainsi que celles de quelques alliages de brasure, pour référence.

TABLEAU 1.2 – Propriétés de l'argent fritté et de brasures courantes [10]

Composition de l'alliage	Température de fusion (°C)	Module d'Young (GPa)	CDT (ppm/K)	Conductivité thermique (W/m.K)	Résistivité ($\mu\Omega.cm$)
63Sn/37Pb	183	40	25	51	14,7
96,5Sn/3,5Ag	221	50	20	30-40	15
99,3Sn/0,7Cu	227	-	23	2	15
95Pb/5Sn	315	20	28,7	35	-
Argent fritté	960	Tableau 2.4	19,5	160	1,55

TABLEAU 1.3 – Module d'Young de l'argent fritté en fonction de la température[11]

Température (°C)	-40	0	25	60	120	150
Module d'Young (GPa)	9,01	7,96	6,28	4,52	2,64	1,58

1.3.3 Substrats et semelles

Le **substrat** est l'élément de l'assemblage de puissance sur lequel sont reportées les puces. Il assure l'isolation électrique et la conduction thermique entre la puce et le système de refroidissement du module. Un substrat est constitué de trois couches :

- Une métallisation supérieure, sur laquelle la puce est reportée
- Un diélectrique, qui peut être céramique ou organique [12]
- Une métallisation inférieure, permettant la brasure de la semelle

Les métallisations sont généralement en cuivre, avec ou sans flash d'or ou de nickel, pour des raisons de compatibilité avec les matériaux de brasure ou de frittage. Les diélectriques céramiques tels que l'alumine ou le nitrure de silicium sont actuellement les plus utilisées. Le tableau 1.4 présente leurs propriétés physiques. Les trois types de substrats les plus utilisés sont le substrat métallique isolé, le *direct bonded copper*, et l'*active metal brazed*.

TABEAU 1.4 – Propriétés des céramiques utilisées pour la réalisation de substrats de puissance [13]

Céramique	Conductivité thermique (W/m.K)	CDT (ppm/K)	Ténacité (MPa.m ²)	Résistance à la flexion (MPa)
Si ₃ N ₄	58	2,7	5	850
AlN	170	4,5	2,7	400
Al ₂ O ₃ (96%)	20	7,1	3,3	350

Le substrat métallique isolé (ou SMI) consiste en une plaque métallique d'aluminium ou de cuivre de 1 à 3mm d'épaisseur. Un diélectrique organique, d'épaisseur comprise entre 50 et 100µm vient s'intercaler entre cette plaque et un flash de cuivre de 35µm d'épaisseur électro-déposé, dans lequel seront gravées les pistes du circuit électrique. Ce type de substrat est peu utilisé pour les applications haute température en raison de la tenue limitée du diélectrique dans ces environnements [14].

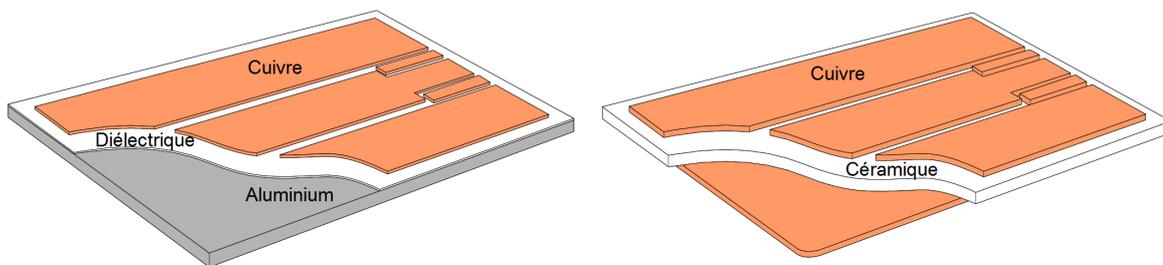


FIGURE 1.4 – Substrat Métallique Isolé (gauche) et *Direct Bonded Copper* (droite)

Le SMI est apprécié pour sa couche métallique épaisse qui joue le rôle d'une semelle, favorisant ainsi la miniaturisation des packagings de puissance. Il est très utilisé comme substrat pour les circuits d'éclairage à LED.

Le *direct bonded copper* (ou DBC) désigne un procédé d'assemblage de la céramique (nitrure d'aluminium ou oxyde d'aluminium de 300 à 700 µm) et des métallisations (cuivre de 150 à 300 µm) sans métal d'apport [15]. Ce type de substrat présente de bonnes propriétés thermiques et un coefficient de dilatation thermique (CDT) proche de celui du silicium, ce qui le rend particulièrement intéressant pour un usage avec des puces silicium [16].

L' *active metal braze* (ou AMB) est constitué d'une céramique (nitrure de silicium) sur laquelle deux métallisations (aluminium ou cuivre) ont été brasées. À la différence du DBC, un alliage TiAgCu est utilisé comme métal d'apport pour braser la couche métallique au Si_3N_4 à haute température.

Ce substrat démontre une bonne résistance au vieillissement par cyclage thermique[17], ce qui le rend particulièrement adapté aux applications à haute température en environnement sévère.

La *semelle* joue un rôle essentiel dans l'évacuation des calories produites par les semi-conducteurs lors de leur fonctionnement. Elle constitue la liaison entre l'assemblage puce-substrat et le refroidisseur. Les semelles sont généralement composées d'alliages de cuivre (CuW, CuMo), d'Al-SiC ou de Kovar (Fe-Ni-Co), pour leur bonne conductivité thermique (cf. 1.5).

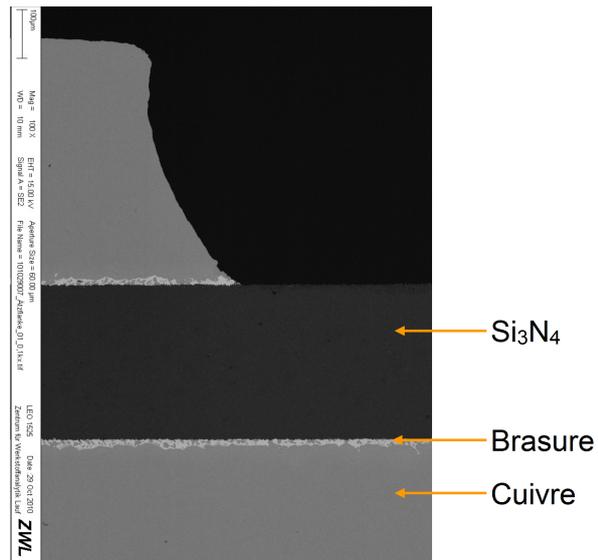


FIGURE 1.5 – Substrat *Active Metal Brazed*

TABEAU 1.5 – Propriétés physiques des semelles de puissance [18, 19]

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	CDT (ppm/K)	Masse volumique (g/m^3)
CuW / CuMo	160 - 200	6,5 - 8,3	10 - 17
AlSiC	180	7,5 - 12	3
Kovar	11 - 17	5,2	8,36

1.3.4 Interconnexions et gels d'encapsulation

Le **câblage** permet de réaliser la connexion électrique entre la face supérieure de la puce et les connecteurs externes du module. Il existe plusieurs techniques pour effectuer ces connexions : le câblage filaire, à l'aide de rubans, ou l'assemblage double face.

L'utilisation de **fils de câblage** est la méthode la plus répandue en électronique de puissance. Pour diminuer la résistivité des interconnexions, de nombreux fils sont utilisés en parallèle (cf. figure 1.6).

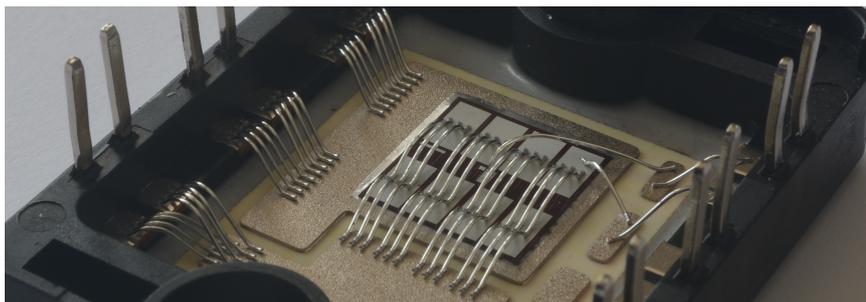


FIGURE 1.6 – Module IGBT avec fils de câblage

Deux méthodes existent pour attacher les fils à la puce. Le **wedge bonding** est réalisé à température ambiante, et combine une pression et des vibrations ultrasonores pour souder le fil sur un plot [20]. Il permet l'utilisation de fils de gros diamètre, le plus souvent en aluminium.

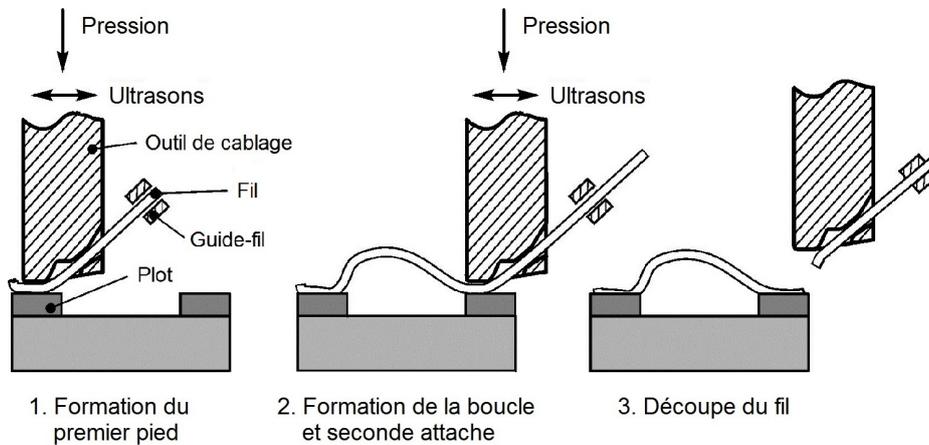


FIGURE 1.7 – Procédure de *wedge bonding*

Le **ball bonding** s'utilise sur des fils d'or de petit diamètre. Il est réalisé à chaud (de 100 à 500°C), et consiste à former une boule à l'extrémité du fil, que l'on vient presser sur le plot de la puce. L'attache est formée par thermocompression ou par brasure thermosonique. La figure 1.8 présente la procédure de *ball bonding* [21].

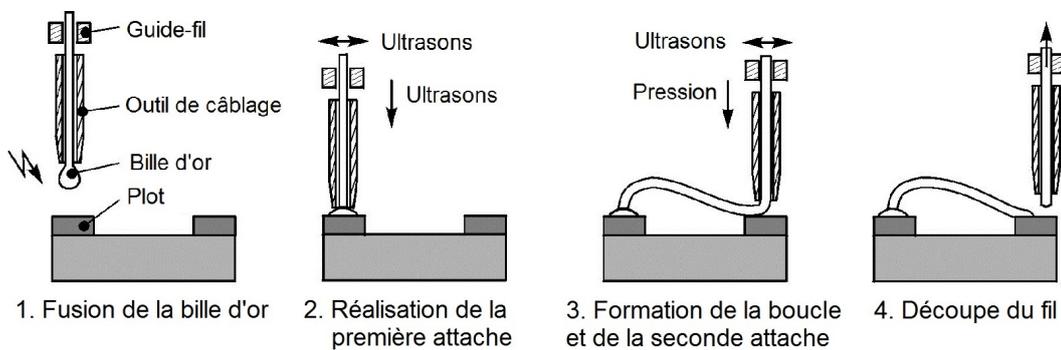


FIGURE 1.8 – Procédure de *ball bonding*

Le **câblage par rubans**, illustré par la figure 1.9, est une alternative au câblage par fils. En termes de conduction électrique, un ruban de $2 \times 0,2$ mm est équivalent à cinq fils de diamètre 0,4 mm (à longueur identique) [22]. Les travaux de S. Jacques et collab. montrent que les rubans d'aluminium sont plus robustes et présentent une durée de vie 2,3 fois supérieure à câblage par fils [23]. Toutefois, il est nécessaire que la métallisation des puces et les rubans soient faits du même matériau pour obtenir une bonne attache.

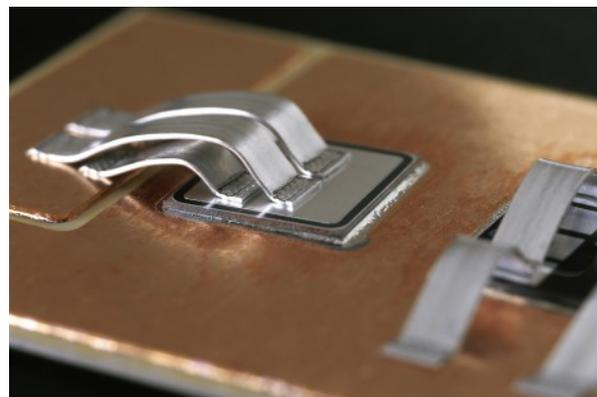


FIGURE 1.9 – Diodes avec rubans de câblage

L'**assemblage double face**, ou assemblage 3D, est une solution d'interconnexions qui ne fait pas appel à des fils ou des rubans. Elle repose sur l'utilisation d'un second substrat en face supérieure de la puce. Pour parvenir à ne toucher que les plots de connexions sans provoquer de court-circuits, il est possible d'intercaler des billes ou des cylindres brasés entre ceux-ci et le substrat supérieur [24, 25]. L'utilisation d'usinages directement dans la métallisation du substrat est également possible [26]. Ces solutions permettent de mieux évacuer les calories dissipées par la puce, tout en assurant des niveaux de courant, tension de claquage et tension de seuil équivalents [27, 28].

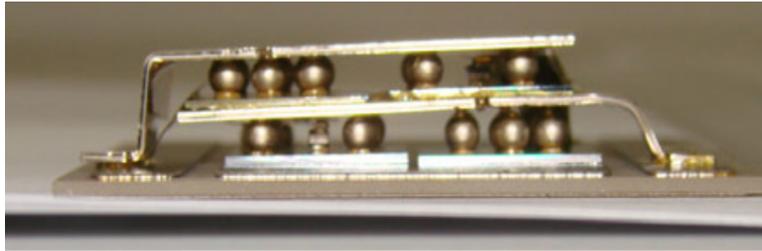


FIGURE 1.10 – Assemblages 3D avec billes

L'**encapsulant** est un gel polymère présent dans le boîtier (*cf.* 1.3.5) destiné à protéger les différents éléments de l'assemblage d'éventuelles contaminations chimiques, de l'humidité et de la poussière. Il prévient également la formation d'arcs électriques et de courants de surface pouvant apparaître dans l'air, en raison des hautes tensions appliquées.

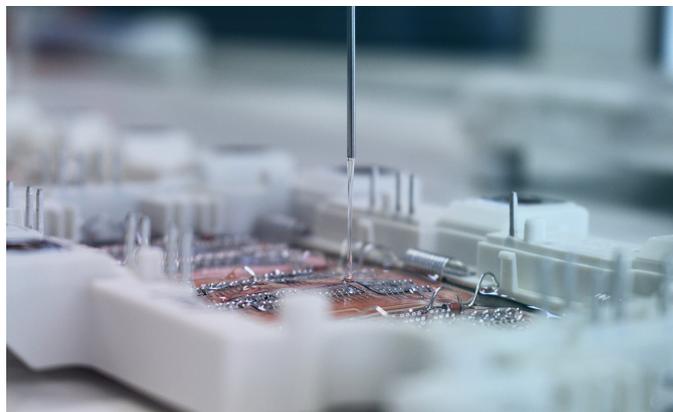


FIGURE 1.11 – Coulage du gel encapsulant dans un boîtier

Les propriétés de ces matériaux sont étudiées pour se conformer aux différents besoins de l'industrie. Parmi les encapsulants les plus répandus, nous pouvons citer le silicone, le parylène, l'acrylique l'époxy ou le polyuréthane, [29].

1.3.5 Boîtiers et systèmes de refroidissement

Les boîtiers et systèmes de refroidissement sont les éléments externes d'un module de puissance. Le **boîtier** est autant destiné à protéger les composants des contraintes extérieures (chocs, contaminations diverses) qu'à faciliter l'intégration dans un système (fixations et raccordement électriques, système de refroidissement). Il peut être réalisé en métal ou en matériaux plastiques.



FIGURE 1.12 – Boîtier et semelle d'un module Infineon

Une face du boîtier laisse apparaître la semelle pour l'utilisation d'un **système de refroidissement**. Ce peut être un radiateur ou un système à circulation d'eau. Il est vissé sur la semelle (avec une interface thermique) pour maintenir la température du module de puissance en dessous de sa température de jonction critique.



FIGURE 1.13 – Module vissé sur un dissipateur à air

1.4 Les mécanismes d'endommagement des modules de puissance

Lors du vieillissement d'un module de puissance, les différentes parties de l'assemblage présentées dans la section précédente subissent des dommages qui conduisent à la défaillance du module. La compréhension de ces mécanismes est un enjeu majeur de l'électronique de puissance, puisqu'elle contribue à assurer la fiabilité des systèmes dans lesquels les modules sont utilisés. Cette section présente les défaillances les plus couramment rencontrées et les plus critiques dans un module de puissance : au niveau des joints d'assemblage, du substrat et des interconnexions. Les défaillances des autres éléments composant le module ne seront pas traitées, ces travaux se concentrant sur l'assemblage de puissance.

1.4.1 Endommagement de la puce

Les matériaux qui constituent la puce sont sujets aux variations de température liées à son fonctionnement (cycles de fonctionnement, chocs thermiques liés à l'environnement). Ces variations de température peuvent générer des dommages par fatigue mécanique [30]. Ces dommages s'accumulent et peuvent entraîner des défaillances, illustrées par la figure 1.14 : fissuration de la puce (apparition de court-circuit), fissuration des couches de passivations de surface (possibles fuites de courant).

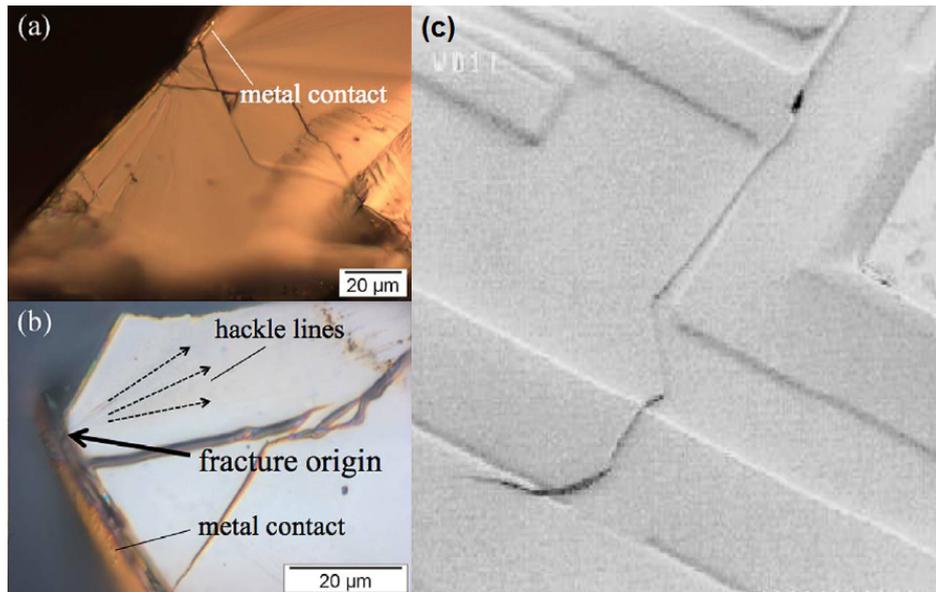


FIGURE 1.14 – Fissuration de la passivation supérieure d'une puce

1.4.2 Décollement et rupture du câblage

Cette section ne traitera pas des assemblages 3D, en raison de leur complexité et de leur faible maturité industrielle. De plus, le câblage filaire reste à ce jour la méthode d'interconnexion la plus utilisée dans les assemblages de puissance. Une défaillance au niveau du câblage interne diminue les performances d'un module de puissance, jusqu'à empêcher totalement son fonctionnement. Des essais de cyclage thermique combinés à une micrographie au microscope à balayage électronique (MEB) révèlent l'apparition de fissures et de décollement des fils (*cf.* figure 1.15) [31].

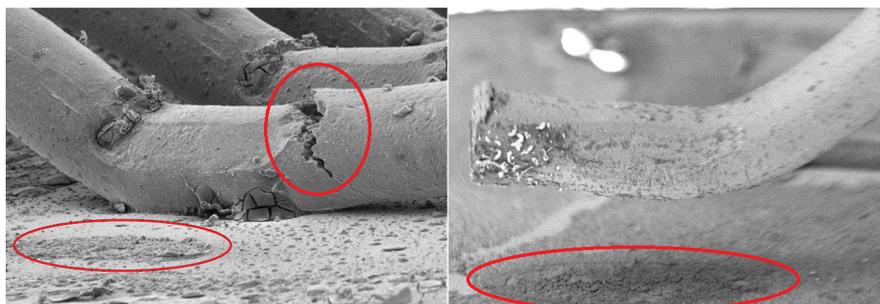


FIGURE 1.15 – Fissure et décollement du pied de fil

Les dommages au niveau de fils de connexion (avec ceux liés au joint d'attache) restent l'une des causes majeures de défaillance d'un module de puissance [32, 33]. Ils résultent de leurs faibles dimensions et de leur forte exposition aux effets thermiques. Malgré cela, ils sont toujours utilisés pour des raisons d'efficacité et de facilité d'intégration.

1.4.3 Endommagement du joint d'attache

La fatigue des joints d'assemblage est, avec la rupture des fils de câblage, le phénomène majeur impactant la fiabilité des assemblages de puissance. Il découle de la différence de coefficient de dilatation thermique des matériaux qui composent un assemblage

[34]. Lors du fonctionnement d'un module, la chaleur dégagée par la puce génère un gradient de température dans l'assemblage, qui varie avec son utilisation. Ces variations de température entraînent des variations de volume des différents matériaux, en plus d'une alternance de dilatation-compression. Des contraintes apparaissent dans l'assemblage, ce qui conduit à une rupture par fatigue. Cette rupture peut intervenir dans le joint lui-même, ou aux interfaces avec la puce semi-conductrice ou la métallisation du substrat. Elle est favorisée par la présence de défauts de fabrication dans le joint — par exemple, une vacuole comme illustré en figure 1.16.

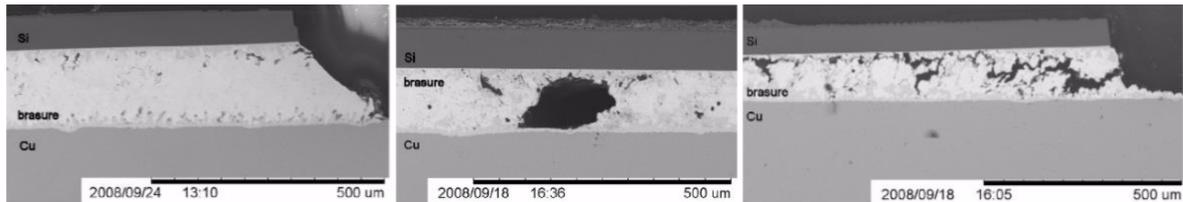


FIGURE 1.16 – Joint intact (gauche), avec vacuole (milieu) et avec fissure (droite)

Un environnement vibratoire intense peut, par des phénomènes de résonance, également favoriser la rupture de l'assemblage [35, 36]. Notons qu'une fissure ou un décollement du joint diminuent la capacité de l'assemblage à évacuer les calories du semi-conducteur et entraîne un emballement thermique qui accélère la défaillance du composant.

Le joint d'attache étant un élément central de l'assemblage, il s'en trouve très contraint et son vieillissement est critique pour la fiabilité des modules de puissance. C'est pourquoi la suite de ces travaux se concentre sur l'étude du joint d'assemblage plutôt que sur les fils de câblage, trop fragiles pour être instrumentés et à la géométrie trop variable pour être convenablement modélisée.

1.4.4 Rupture et décollement de substrat

Les grandes amplitudes de variations thermiques entraînent également un phénomène d'écaillage des métallisations en cuivre du substrat. En raison des différences de coefficients de dilatation thermique entre les matériaux, il en résulte une mise en contrainte de la céramique au cours des cycles de températures. Ceci conduit à sa rupture et contribue au décollement des métallisations [37, 38].

Là encore, ces décollements dégradent les performances thermiques de l'assemblage et précipitent le phénomène d'emballement thermique conduisant à la défaillance de l'assemblage.

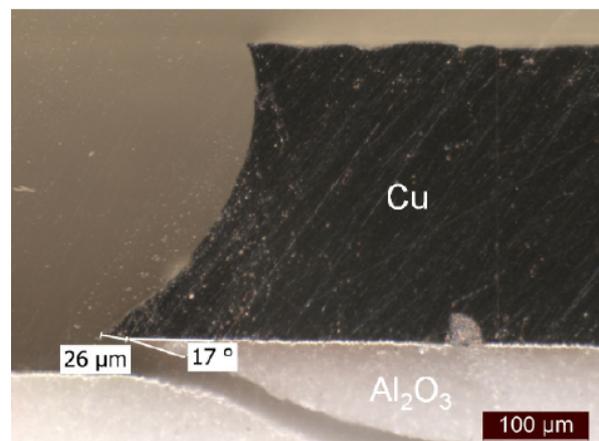


FIGURE 1.17 – Fissure dans la céramique d'un substrat

1.5 Gestion de la durée de vie et suivi de vieillissement

Nous désignons ici par "suivi de vieillissement" la caractérisation en temps réel de l'état d'usure d'un système, c'est à dire de l'accumulation de dommages subis depuis un état de référence. Évaluer l'étendue de la déviation ou de l'endommagement d'un système par rapport à son état nominal permet d'atteindre plusieurs objectifs de performance, parmi lesquels figurent : l'anticipation des pannes, la minimisation de la maintenance non planifiée, l'allongement des cycles de maintenance, la réduction du coût de fonctionnement et l'optimisation de la disponibilité opérationnelle d'un équipement. Le suivi de vieillissement d'un module d'électronique de puissance constitue donc un enjeu majeur pour un industriel à la recherche de fiabilité autant que de performance économique.

Les systèmes mécaniques et structurels dont l'intégrité est critique pour la sécurité de leurs usagers — véhicules, avions, œuvres de génie civil — intègrent de plus en plus de capteurs destinés à surveiller leur état de fonctionnement et prévenir une défaillance. La gestion de l'état de santé et le pronostic de fonctionnement des systèmes mécaniques est donc une problématique connue qui a donné lieu à de nombreux travaux visant à identifier les facteurs menant à la défaillance et ses signes avant-coureurs.

Ce n'est toutefois pas le cas pour les systèmes d'électronique de puissance. En raison de l'échelle micro à nanoscopique des phénomènes concernés et de la complexité de l'architecture des systèmes électroniques, leur endommagement est plus difficile à diagnostiquer. Les précurseurs de défaillances sont également moins bien connus [39].

La gestion de la durée de vie d'un équipement peut être implémentée selon quatre catégories d'approches :

1. Les méthodes de diagnostic embarqué.
2. Les fusibles, ou méthodes "canaries".
3. Les approches basées sur la surveillance de précurseurs de défaillance.
4. Les solutions de suivi d'état de santé.

Ces différentes méthodes sont détaillées dans les sections suivantes puis comparées pour identifier laquelle est la plus à même de répondre à la problématique introduite dans le cadre du projet CAPTIF.

1.5.1 *Built-il tests* ou diagnostics embarqués

Les solutions de diagnostics embarqués (ou BIT, pour *Built-In Test*) constituent l'une des premières propositions pour la détection et la localisation automatisée de pannes. Un BIT est un ensemble matériel-logiciel embarqué et destiné à détecter les défaillances et erreurs au sein d'un système [40]. Les BIT permettent par exemple à l'utilisateur de vérifier des fonctionnalités ou de faciliter le dépannage.

Il existe plusieurs niveaux de BIT : au niveau circuit pour enregistrer les erreurs de fonctionnement et réaliser le diagnostic d'un circuit, au niveau module ou assemblage de plusieurs circuits et au niveau système pour des tests opérationnels de l'ensemble du système électronique.

Deux concepts de BIT sont utilisés en électronique : les BIT continus (C-BIT) et BIT interruptif (I-BIT). Ces derniers requièrent l'arrêt des fonctions de l'équipement pour s'effectuer. De tels BIT sont généralement mis en place lors des phases de démarrage du

système, ou sont initiés manuellement par l'opérateur (par exemple dans un mode débogage). À l'inverse, les C-BIT fonctionnent en continu, en parallèle du système principal. Les BIT périodiques (P-BIT) sont des I-BIT qui s'exécutent selon des cycles, afin de réaliser une détection pseudo continue, lorsqu'un C-BIT n'est pas réalisable [41].

1.5.2 Fusibles et méthodes "canaries"

Les dispositifs jetables tels que les fusibles sont des solutions traditionnelles de protection des circuits électriques. Ils fonctionnent en isolant l'élément qu'ils protègent du reste du circuit, avertissant ainsi d'un incident ou d'une panne du système. Les disjoncteurs ou thermostats sont d'autres exemples d'engins destinés à ouvrir un circuit électrique. Dans ce cas, ils sont réamorçables : soit manuellement dans le cas du disjoncteur, soit lorsque la température est retombée sous la valeur de consigne pour le thermostat. De tels éléments ont pour but de détecter des conditions anormales de fonctionnement et d'éviter la propagation des dommages dans le système électrique.

Les méthodes dites "canaries" tirent leur nom d'un système d'avertissement ancien, utilisé dans les mines de charbon. Il s'agit d'une référence à l'oiseau, plus sensibles au gaz dangereux que l'humain, que les mineurs emportaient avec eux : des signes de faiblesse ou la mort du canari signifie la présence de gaz intoxicants, et indiquent aux mineurs la présence d'un danger. Il s'agit d'un signe simple à interpréter, précurseur d'un danger imminent (c.f. figure 1.18) .

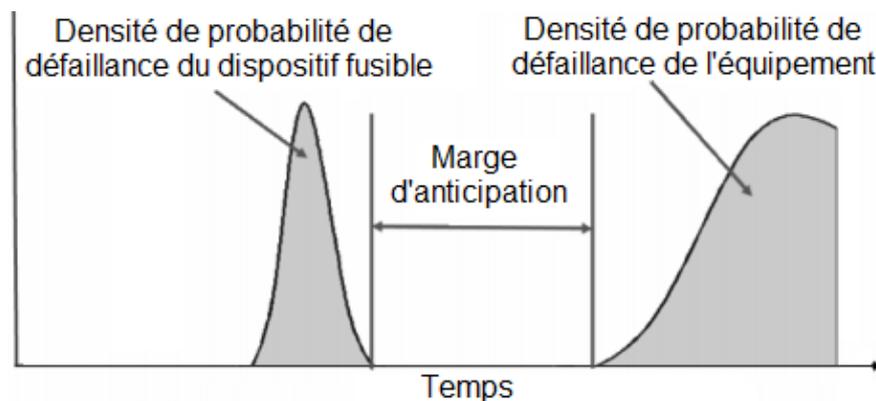


FIGURE 1.18 – Anticipation de panne à l'aide d'un dispositif fusible

Reprenant ce principe, les systèmes canaris sont des éléments fusibles placés sur le système à surveiller et destinés à faillir avant ce dernier pour avertir de l'évolution des mécanismes de défaillance en jeu.

1.5.3 Surveillance des précurseurs

Un précurseur est un évènement qui prévient d'une défaillance à venir. Il s'agit en général d'une variation dans une grandeur mesurable (augmentation de la R_{th} , diminution de la tenue en cisaillement) associée à une panne subséquente. Les défaillances peuvent alors être anticipées par la relation de causalité qui les lie à la variable dont on mesure une déviation.

Le protocole SMART (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology) est un exemple répandu de surveillance des précurseurs de défaillance. Les paramètres de fonctionnement critiques du disque dur tels que le taux d'erreur de lecture/écriture, le nombre de

secteurs réalloués ou le nombre de démarrage du disque, sont corrélés et permettent de signaler les signes avant-coureurs d'une panne.

Le choix du précurseur à étudier peut être fait de différente manière, selon que l'on cherche à éviter une défaillance critique, à assurer la capacité du système à achever sa mission une fois endommagé ou à prévenir une longue immobilisation du système pour maintenance. Il est aussi possible d'utiliser des méthodes telles que l'analyse des modes de défaillances et leurs effets (FMMEA — *Failure Mode Mechanisms and Effect Analysis*) [42] pour identifier les paramètres de surveillance.

Born et Boenning [43] proposent des précurseurs pour des circuits intégrés CMOS, des alimentations à découpage ou encore des diodes. Lall et associés [44, 45] proposent une solution basée sur l'observation de microstructure du joint de brasure d'un composant pour prévenir la défaillance avant l'apparition de dommages macroscopiques. Ainsi, l'endommagement microscopique observé, par exemple le taux de croissance des intermétalliques ou la contrainte de cisaillement à l'interface, couplé à un modèle d'endommagement permettrait de calculer la durée de vie résiduelle de l'assemblage. Une telle approche élimine le besoin de connaître l'historique de chargement (thermique, électrique ou autre) pour être capable de prévenir une défaillance.

1.5.4 Suivi de l'endommagement

Le cycle de vie d'un module comporte plusieurs phases (fabrication, manipulation, stockage, utilisation) auxquelles correspondent des conditions pouvant entraîner une dégradation des performances et contribuer à la réduction de sa durée de vie opérationnelle. L'impact de ces phases sur la durée de vie du module dépend de l'intensité et de la durée d'exposition à ces conditions. Par conséquent, si l'on est capable de mesurer ces conditions ainsi que de construire un modèle d'endommagement, il est en théorie possible de caractériser cette dégradation, causée par une accumulation de chargements (utilisation et environnement) [39].

TABLEAU 1.6 – Exemples de chargements rencontrés par un module

Type de chargement	Nature du chargement
Thermique	Température (paliers, variations, gradients, cycles et taux de variation), dissipation thermique
Mécanique	Pression, gradient de pression, vibration et chocs, niveaux accoustiques, contrainte et déformation
Chimique	Agressivité du milieu, taux d'humidité, contamination et pollution
Physique	Radiation, perturbations électromagnétiques
Électrique	Courant, tension, puissance

Ramakrishnan et Pecht [46] ont introduit une méthodologie pour combiner mesures et modèle d'endommagement, afin de déterminer la durée de vie résiduelle d'un composant électronique (*Life Consumption Monitoring method*). La méthode LCM comporte six étapes (cf. figure 1.19).

Étapes préliminaires :

1. Analyse des mécanismes de défaillance et de leurs impacts sur le système
2. Étude de fiabilité pour déterminer le mécanisme le plus critique

Durant le fonctionnement de l'équipement :

4. Surveillance des paramètres de suivi
5. Traitement des mesures pour la compatibilité avec le modèle d'endommagement
6. Calcul de l'endommagement subi
7. Détermination de la durée de vie restante de l'équipement

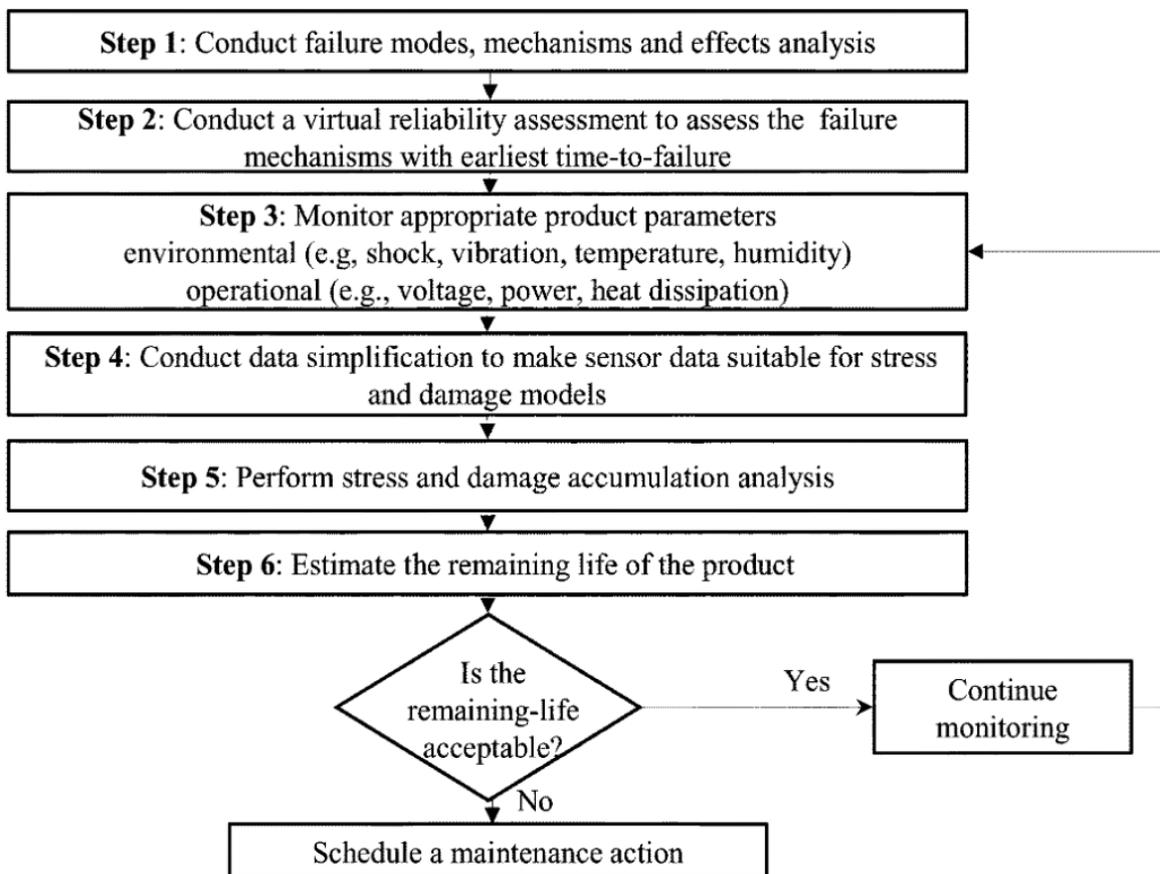


FIGURE 1.19 – Principe de la méthode LCM

Cette méthode a été appliquée à une carte électronique dans un contexte d'utilisation réelle pour une application automobile [46, 47] et a permis de mettre en évidence que les défaillances sont majoritairement liées à l'endommagement du joint de brasure. Des mesures de température et de vibration ont été réalisées sur la carte pour alimenter un modèle d'endommagement et ainsi estimer une durée de vie résiduelle.

En outre, Vichare et collab. [39] suggèrent l'intégration des solutions de traitement et d'analyse de données de mesures pour assurer un suivi de l'endommagement de façon continue, et un calcul réaliste de la durée de vie résiduelle du dispositif considéré.

1.5.5 Choix de l'approche pour le projet CAPTIF

Les principales approches de gestion de la durée de vie d'un équipement ont été présentées dans les sections ci-avant. Cette section traite des points forts et des limitations de chacune d'entre elles.

1. Built-in test :

Avantages :

La mise en œuvre est simple, et donne une information sur le fonctionnement du dispositif équipé. Il est également possible de mettre en place des BIT pour plusieurs éléments d'un même système, et ainsi de localiser précisément une panne. Cette solution est le plus souvent majoritairement logicielle, d'où une certaine simplicité d'implémentation.

Limitations :

Les informations fournies par un BIT sont binaires (fonctionnement ou non) mais ne disent rien sur l'état d'usure du composant, et donc sur la probabilité d'une future défaillance.

2. Dispositifs fusibles

Avantages :

La défaillance est anticipée puisque le dispositif "canari" informe sur la proche fin de vie du système qu'il équipe.

Limitations :

Cette solution repose sur un approche probabiliste. Elle est donc sensible aux irrégularités du chargement imposé à l'équipement au cours de son cycle de vie et exige que le "canari" et l'équipement protégé vieillissent de la même façon pour que la marge de sécurité soit fiable. Le procédé de calibration du fusible est potentiellement complexe

3. Surveillance des précurseurs de défaillance

Avantages :

Les défaillances peuvent être anticipées puisque cette méthode repose sur une interprétation de précurseurs de défaillance. Par conséquent, la sensibilité aux irrégularités du cycle de vie est faible.

Limitations :

Les précurseurs ne donnent qu'une indication de la fin de vie du produit, et ne caractérisent pas précisément une durée de vie résiduelle.

4. Suivi des dommages

Avantages :

La connaissance de l'endommagement permet de déduire la durée de vie résiduelle du produit, et donc d'anticiper une défaillance.

Limitations :

L'identification des mécanismes de dégradation et des paramètres de suivi ainsi que la construction du modèle d'endommagement permettant de les lier est complexe, et nécessite une étape de calibration importante.

La définition du projet CAPTIF précisant le besoin de prévenir une défaillance exclut *de facto* les méthodes de diagnostics embarqués ainsi que les dispositifs fusibles. Puisque l'on souhaite également connaître l'état de santé du module en temps réel tout au long

de la vie du module (et non pas uniquement vers sa fin de vie), seule une approche de type suivi d'endommagement correspond au cahier des charges du projet CAPTIF. Par conséquent, c'est cette solution qui a été choisie pour la suite de l'étude.

1.6 Conclusion

Dans une optique d'amélioration de la fiabilité des modules d'électronique de puissance, le projet CAPTIF a pour but d'assembler un démonstrateur technologique d'une solution pour maîtriser la fiabilité et gérer la durée de vie. Afin de répondre à cette problématique, ce premier chapitre a introduit les notions de base relatives aux modules de puissance et à leurs défaillances ainsi qu'aux approches de gestion de durée de vie.

Les différents éléments qui composent un module de conversion d'énergie ont été exposés. Ces travaux se concentrent sur l'assemblage de puissance dans un souci de simplification, et les principaux mécanismes de défaillance associés à chaque élément de l'assemblage ont été présentés. La bibliographie révèle que les interconnexions câblées et le joint d'assemblage sont les défaillances les plus couramment rencontrées. La fragilité des fils de câblage ainsi, que leur géométrie difficile à caractériser, conduisent à se concentrer sur l'étude du joint d'attache pour réaliser un suivi de vieillissement de l'assemblage. L'hypothèse faite ici est que le vieillissement à l'intérieur du module est homogène, donc les dommages subis par le joint d'attache sont représentatifs de ceux subis par tous les autres éléments de l'assemblage.

De plus, un bilan des différentes approches de gestion de durée de vie basées sur des dispositifs de mesures embarqués a été dressé. Pour parvenir à anticiper une défaillance, des solutions telles que les diagnostics embarqués ou les dispositifs fusibles ne conviennent pas, et il est préférable de s'orienter vers des méthodes reposant sur l'observation et la caractérisation de signes précurseurs de défaillance ou le suivi d'évolution des dommages. Puisque seule cette dernière approche permet à la fois de prévenir une défaillance et de connaître la durée de vie résiduelle d'un système, c'est vers ce type de méthode que ces travaux de recherche se sont orientés.

Dans les chapitres suivants, nous nous intéresserons plus spécifiquement à la mise en place d'une solution pour réaliser ce suivi d'endommagement. En premier lieu, il est nécessaire de définir un indicateur de vieillissement, c'est-à-dire une grandeur nous permettant de caractériser l'état d'usure d'un assemblage. Nous nous intéresserons également au lien à établir entre cet indicateur et les mesures issues de capteurs à intégrer. Pour ce faire, une modélisation d'un assemblage de puissance nous permettra de déterminer la nature et le positionnement de ces capteurs, compte tenu des exigences technologiques d'un module de puissance et des capteurs eux-mêmes. Enfin, une méthodologie sera finalisée et appliquée à un assemblage démonstrateur, dont les spécifications auront été définies par les partenaires du consortium du projet CAPTIF.

1.7 Références

- [1] S. Zemat. *Etude des propriétés électriques d'un matériau polyimide à haute température : application à la passivation des composants de puissance en carbure de silicium*. PhD thesis, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2006. 8
- [2] J.B. Casady and R. W. Johnson. Status of silicon carbide (sic) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications : A review. *Solid-State Electronics*, 39(10) :1409–1422, 1996. 8
- [3] S. Kako, C. Santori, K. Hoshino, S. Götzinger, Y. Yamamoto, and Y. Arakawa. A gallium nitride single-photon source operating at 200 k. *Nature materials*, 5(11) :887, 2006.
- [4] G. Civrac. *Vers la réalisation de composants haute tension, forte puissance sur diamant CVD. Développement des technologies associées*. PhD thesis, Toulouse, INPT, 2009. 8
- [5] L. Ménager, B. Allard, and V. Bley. Conditionnement des modules de puissance. *Article E3385 des Techniques de l'ingénieur*, 2010. 9
- [6] S. Menon, E. George, M. Osterman, and M. Pecht. High lead solder (over 85%) solder in the electronics industry : Rohs exemptions and alternatives. *Journal of Materials Science : Materials in Electronics*, 26(6) :4021–4030, 2015. 9
- [7] V. R. Manikam and K. Y. Cheong. Die attach materials for high temperature applications : A review. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 1(4) :457–478, 2011. 9
- [8] F. Le Henaff. *Contribution à l'étude, la mise en oeuvre et à l'évaluation d'une solution de report de puce de puissance par procédé de frittage de pâte d'argent à haute pression et basse température*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2014. xiii, 9
- [9] T. Youssef. *Modélisation multiphysique d'un assemblage de puissance haute température destiné à l'environnement aéronautique*. PhD thesis, Bordeaux, 2016. xiii, 9
- [10] C. Göbl. Sinter technology enhances power-module robustness, 2009. xiii, 10
- [11] D. Yu, X. Chen, G. Chen, G. Lu, and Z. Wang. Applying anand model to low-temperature sintered nanoscale silver paste chip attachment. *Materials & Design*, 30(10) :4574–4579, 2009. xiii, 10
- [12] AI Technology. Manufacturer of adhesives, thermoplastic, thermal management material and specialty materials serving the semiconductor and electronic packaging industry. 11
- [13] Kyocera. Amb cu-bonded ceramic substrates for power modules. xiii, 11
- [14] W. Sheng and R. Colino. *Power electronic modules : design and manufacture*. CRC press, 2004. 11
- [15] J. Schulz-Harder. Advantages and new development of direct bonded copper substrates. *Microelectronics Reliability*, 43(3) :359–365, 2003. 11

- [16] Tong Hsing Electronic Industries. Dbc (direct bonded copper) substrates. 11
- [17] A. Fukumoto, D. Berry, K. Ngo, and G. Lu. Effects of extreme temperature swings (-55 c to 250 c) on silicon nitride active metal brazing (si3n4-amb) substrates. 12
- [18] M. Occhionero, R. Adams, and K. Fennessy. A new substrate for electronic packaging : aluminum silicon carbide (alsic) composites. In *Proceedings of the Forth Annual Portable by Design Conference, Electronics Design*, pages 398–403, 1997. xiii, 12
- [19] S. Dimitrijevic and P. Jamet. Advances in sic power mosfet technology. *Microelectronics reliability*, 43(2) :225–233, 2003. xiii, 12
- [20] G. Harman and J. Albers. The ultrasonic welding mechanism as applied to aluminum-and gold-wire bonding in microelectronics. *IEEE Transactions on parts, hybrids, and packaging*, 13(4) :406–412, 1977. 13
- [21] F. Farassat and W. Birgel. Ball bonding method and apparatus for performing the method, 1990. US Patent 4,925,083. 13
- [22] N. Marengo, M. Kontek, W. Reinert, J. Lingner, and M. Poech. Copper ribbon bonding for power electronics applications. In *Microelectronics Packaging Conference (EMPC), 2013 European*, pages 1–4. IEEE, 2013. 13
- [23] S. Jacques, R. Leroy, and M. Lethiecq. Impact of aluminum wire and ribbon bonding technologies on d 2 pak package reliability during thermal cycling applications. *Microelectronics Reliability*, 55(9) :1821–1825, 2015. 13
- [24] M. Mermet-Guyennet. New structure of power integrated module. In *Integrated Power Systems (CIPS), 2006 4th International Conference on*, pages 1–6. VDE, 2006. 14
- [25] P. Lasserre, C. Duchesne, and E. Batista. Technologie d’interconnexions par bumps pour semi-conducteurs de puissance. In *14ème Édition de la Conférence Electronique de Puissance du Futur*, number 60, 2012. 14
- [26] M. Barrière, S. Azzopardi, R. Roder, I. Favre, E. Woïrgard, S. Bontemps, and F. Le Henaff. Silver sintered double-sided cooling power package process for controlled si power semiconductor devices with aluminum top-metallization. In *Integrated Power Packaging (IWIPP), 2015 IEEE International Workshop on*, pages 103–106. IEEE, 2015. 14
- [27] A. Masson, S. Azzopardi, F. Le Henaff, J.-Y. Deletage, E. Woïrgard, S. Bontemps, and J. Joguet. Processing and characterization of a 100% low-temperature ag-sintered three-dimensional structure. In *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, pages 1–9. IEEE, 2013. 14
- [28] C. Gillot, C. Schaeffer, C. Massit, and L. Meysenc. Double-sided cooling for high power igt modules using flip chip technology. *IEEE Transactions on components and packaging technologies*, 24(4) :698–704, 2001. 14
- [29] R. Riva. *Solution d’interconnexions pour la haute température*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2014. 14

- [30] JEDEC Solid State Technology Association et al. Failure mechanisms and models for semiconductor devices. *JEDEC Publication JEP122-H*, 2011. 15
- [31] P. McCluskey, D. Das, J. Jordan, L. Condra, R. Grzybowski, T. Tori, and I. Link. Packaging of power electronics for high temperature applications. *Advancing Microelectronics*, 25 :19–24, 1998. 16
- [32] Vanessa Smet, Francois Forest, Jean-Jacques Huselstein, Frédéric Richardeau, Zoubir Khatir, Stéphane Lefebvre, and Mounira Berkani. Ageing and failure modes of igt modules in high-temperature power cycling. *IEEE transactions on industrial electronics*, 58(10) :4931–4941, 2011. 16
- [33] M. Ciappa. Selected failure mechanisms of modern power modules. *Microelectronics reliability*, 42(4) :653–667, 2002. 16
- [34] W. Wu, M. Held, P. Jacob, P. Scacco, and A. Birolini. Thermal stress related packaging failure in power igt modules. In *Power Semiconductor Devices and ICs, 1995. ISPSD'95., Proceedings of the 7th International Symposium on*, pages 330–334. IEEE, 1995. 17
- [35] G. Coquery, R. Lallemand, D. Wagner, and P. Gibard. Reliability of the 400a igt modules for traction converters. contribution on the power thermal fatigue influence on life expectancy. In *EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS*, volume 1, pages 1–060. PROCEEDINGS PUBLISHED BY VARIOUS PUBLISHERS, 1995. 17
- [36] P. Jacob, M. Held, P. Scacco, and W. Wu. Reliability testing and analysis of igt power semiconductor modules. 1995. 17
- [37] G. Mitic, R. Beinert, P. Klofac, H. Schultz, and G. Lefranc. Reliability of aln substrates and their solder joints in igt power modules. *Microelectronics reliability*, 39(6) :1159–1164, 1999. 17
- [38] J. Schulz-Harder. The new standard for direct bonded copper substrates-feature of dcb is thick solid copper conductors. In *Conference PCIM*, volume 4, pages 36–39, 2000. 17
- [39] N. Vichare, P. Rodgers, V. Eveloy, and M. Pecht. Environment and usage monitoring of electronic products for health assessment and product design. *Quality Technology & Quantitative Management*, 4(2) :235–250, 2007. 18, 20, 21
- [40] R. Drees and N. Young. Role of bit in support system maintenance and availability. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 19(8) :3–7, 2004. 18
- [41] M. Pecht, M. Dube, M. Natishan, R. Williams, J. Banner, and I. Knowles. Evaluation of built-in test. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 37(1) :266–271, 2001. 19
- [42] S. Ganesan, V. Eveloy, D. Das, and M. Pecht. Identification and utilization of failure mechanisms to enhance fmea and fmeca. In *Proceedings of the IEEE workshop on accelerated stress testing & reliability (ASTR), Austin, Texas*, volume 3, page 5, 2005. 20

- [43] F. Born and R. Boenning. Marginal checking-a technique to detect incipient failures. In *Aerospace and Electronics Conference, 1989. NAECON 1989., Proceedings of the IEEE 1989 National*, pages 1880–1886. IEEE, 1989. 20
- [44] P. Lall, N. Islam, K. Rahim, J. Suhling, and S. Gale. Leading indicators-of-failure for prognosis of electronic and mems packaging. In *Electronic Components and Technology Conference, 2004. Proceedings. 54th*, volume 2, pages 1570–1578. IEEE, 2004. 20
- [45] P. Lall, N. Islam, and J. Suhling. Prognostication and health monitoring of leaded and lead free electronic and mems packages in harsh environments. In *Electronic Components and Technology Conference, 2005. Proceedings. 55th*, pages 1305–1313. IEEE, 2005. 20
- [46] A. Ramakrishnan and M. Pecht. A life consumption monitoring methodology for electronic systems. *IEEE Transactions on Components and Packaging technologies*, 26(3) :625–634, 2003. 20, 21
- [47] S. Mishra, M. Pecht, T. Smith, I. McNee, and R. Harris. Remaining life prediction of electronic products using life consumption monitoring approach. In *Proceedings of the European Microelectronics Packaging and Interconnection Symposium*, pages 136–142, 2002. 21

Chapitre 2

Modèles et indicateur de vieillissement

Sommaire

1.1 Introduction	6
1.2 Le projet CAPTIF	6
1.2.1 Contexte de la thèse	6
1.2.2 Partenaires du projet	6
1.2.3 Enjeux et objectifs	7
1.3 Les assemblages en électronique de puissance	7
1.3.1 Généralités	7
1.3.2 Puces semi-conductrices et joint d'attache	8
1.3.3 Substrats et semelles	10
1.3.4 Interconnexions et gels d'encapsulation	12
1.3.5 Boîtiers et systèmes de refroidissement	14
1.4 Les mécanismes d'endommagement des modules de puissance	15
1.4.1 Endommagement de la puce	15
1.4.2 Décollement et rupture du câblage	16
1.4.3 Endommagement du joint d'attache	16
1.4.4 Rupture et décollement de substrat	17
1.5 Gestion de la durée de vie et suivi de vieillissement	18
1.5.1 <i>Built-il tests</i> ou diagnostics embarqués	18
1.5.2 Fusibles et méthodes "canaries"	19
1.5.3 Surveillance des précurseurs	19
1.5.4 Suivi de l'endommagement	20
1.5.5 Choix de l'approche pour le projet CAPTIF	22
1.6 Conclusion	23
1.7 Références	24

2.1 Notions de mécanique : lois de comportement des matériaux

La suite de ces travaux faisant régulièrement intervenir des notions de mécanique des matériaux continus, une brève présentation des concepts utilisés plus tard est réalisée dans cette section afin de faciliter la compréhension de ce chapitre.

La loi de comportement d'un matériau solide caractérise la relation entre la déformation et la contrainte que celle-ci engendre dans le matériau. Les matériaux que nous étudions (c.f. 2.3.2.3) présentent des comportements mécaniques résultant de la combinaison des types élémentaires présentés ci-après.

2.1.1 Matériaux élastiques

Le cas le plus simple de loi de comportement est celui de la déformation élastique. Lorsqu'on sollicite un solide élastique il se déforme, mais reprend son état initial lorsque la charge est supprimée. L'élasticité peut-être linéaire (notamment en petites déformations) ou non linéaire (cas des élastomères, par exemple). La loi de Hooke décrit un comportement linéaire élastique, typiquement adaptée au comportement des métaux de type acier ou aluminium en petites déformations :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.1)$$

Avec :

- σ la contrainte dans le matériau (Pa)
- E le module d'élasticité du matériau (Pa)
- ϵ la déformation du matériau (sans unités, allongement relatif)

La figure 2.1 représente les courbes types d'un essai de charge-décharge de matériaux élastiques, l'un linéaire et l'autre non linéaire.

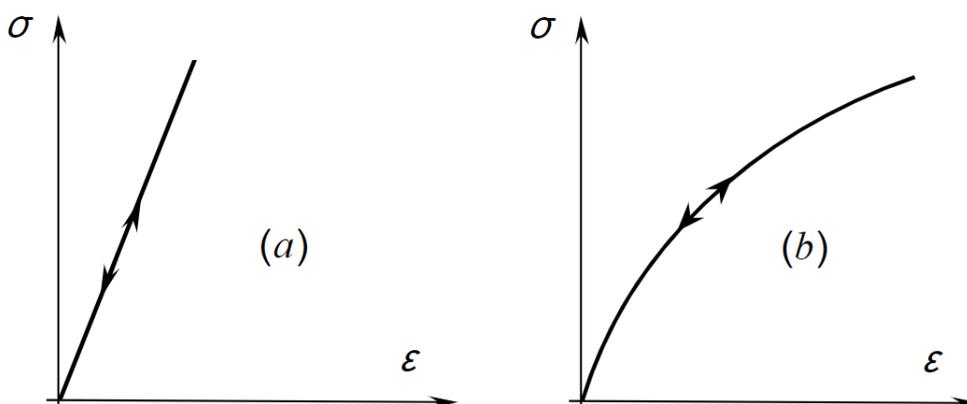


FIGURE 2.1 – Réponse d'un matériau élastique linéaire (a) et non linéaire (b) à une charge-décharge

Dans une loi de comportement, l'élasticité représente une énergie, emmagasinée par le matériau, qui sera restituée lors de la décharge.

2.1.2 Plasticité des matériaux

Un matériau est dit plastique s'il conserve une déformation même lorsque le chargement qui l'a engendrée est enlevé. La plasticité apparaît lorsque l'on sort du domaine d'élasticité du matériau, c'est-à-dire lorsque l'on dépasse sa limite d'élasticité, généralement notée R_e . La figure 2.2 est la courbe caractéristique d'un matériau plastique quelconque en charge-décharge.

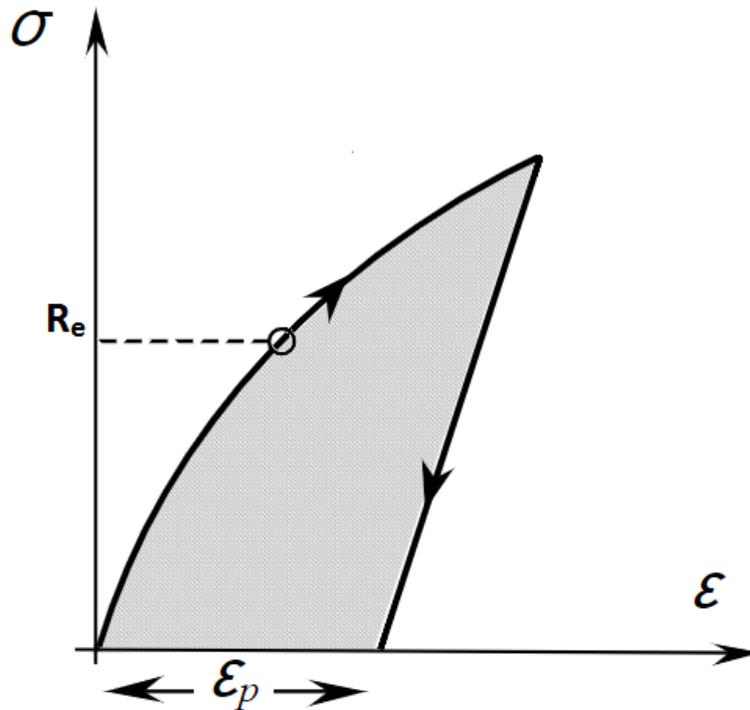


FIGURE 2.2 – Courbe caractéristique d'un matériau avec plasticité

Lors de la charge, le matériau présente un domaine élastique, qui peut être linéaire ou non. Passé la limite d'élasticité R_e , la plasticité du matériau se manifeste et si l'on relâche le chargement, une déformation plastique résiduelle ϵ_p apparaît.

Dans les structures cristallines (tels que les métaux et alliages), la plasticité est due au réarrangement des atomes causé par des discontinuités dans le réseau cristallin (appelées dislocations). Le processus d'écrouissage qui se manifeste dans certains métaux correspond au déplacement des dislocations et se traduit par un durcissement du matériau, et l'augmentation du domaine élastique. La figure 2.3 illustre le phénomène d'écrouissage dans un matériau élastoplastique :

- Sur le segment [OA], le matériau est élastique linéaire.
- Sur le segment [AB], le matériau est plastique.
- Si l'on décharge le matériau au point B, la déformation plastique permanente ϵ_p est observée.
- Sur le segment [CB], correspondant à une nouvelle charge, on observe de nouveau un comportement élastique linéaire. La limite d'élasticité après écrouissage σ_B est plus élevée qu'avant écrouissage.

Dans une loi de comportement, la plasticité représente l'énergie dissipée par le matériau (pour réarranger sa structure interne, évacuée sous forme de chaleur, etc.), qui ne sera donc pas restituée au milieu extérieur lors de la décharge.

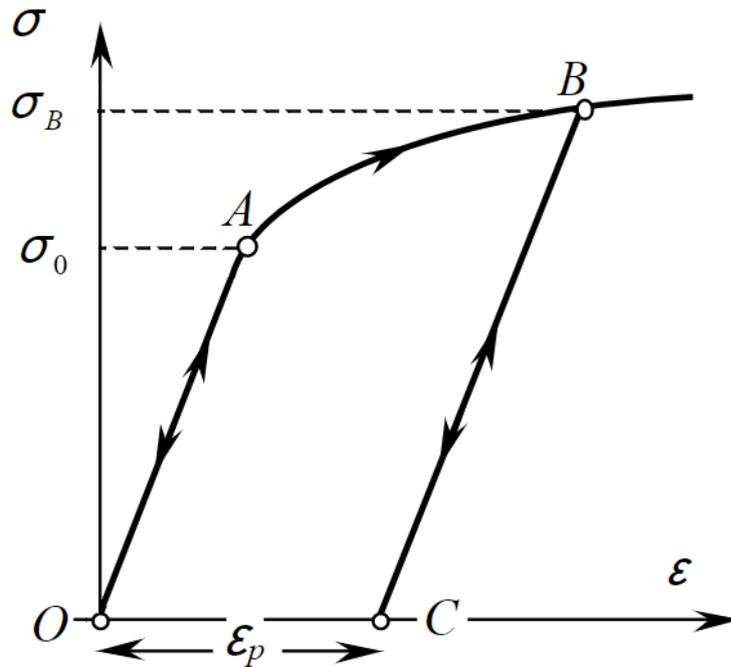


FIGURE 2.3 – Exemple de charge-décharge simple sur matériau plastique

2.1.3 Viscosité, Fluage et relaxation

La viscosité est définie par Newton, dès le XVII^e siècle, comme le rapport entre la contrainte et la vitesse de déformation [1]. Généralement associée à l'étude des fluides, la viscosité est cependant bien présente dans le comportement de certains solides et décrit l'influence du temps sur le comportement d'un matériau.

La viscosité peut s'observer dans un matériau élastique comme dans un matériau plastique, et on distingue un solide visco-élastique d'un solide visco-plastiques de la même manière que les matériaux élastiques et plastiques : après charge-décharge, les premiers reviennent à leur état initial tandis que les seconds présentent une déformation rémanente. La composante de viscosité est le résultat de phénomènes dissipatifs lors de la déformation et n'influe que sur le régime transitoire qui conduit de l'état initial à l'état final.

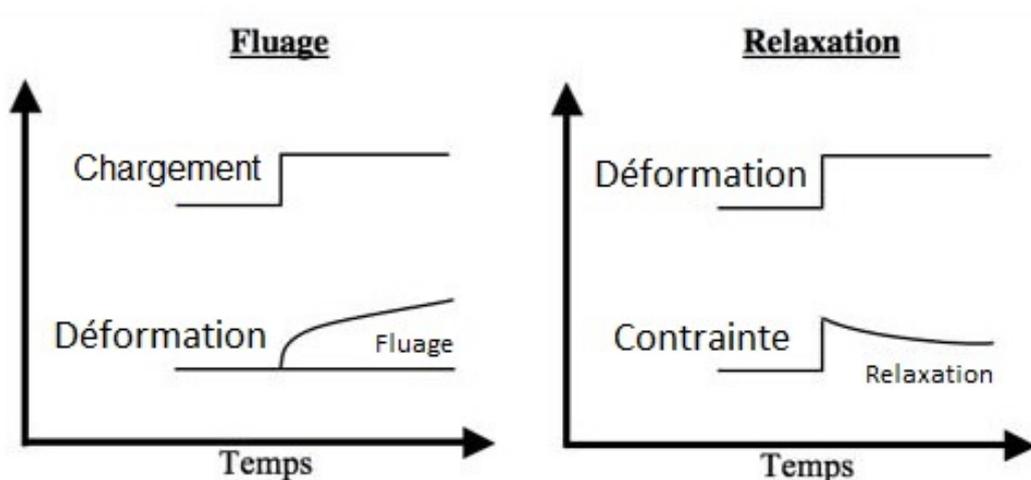


FIGURE 2.4 – Fluage et relaxation : deux effets d'un même phénomène

Le fluage et la relaxation sont deux phénomènes liés à la viscosité. On parle de fluage lorsque l'on observe une déformation variable dans le temps alors que le chargement¹ imposé est constant, et de relaxation lorsqu'à déformation imposée constante, on constate une diminution de la contrainte. La figure 2.4 illustre cette différence.

Dans notre cas d'application, puisque nous imposons un chargement thermique, donc une déformation liée à la dilatation thermique, nous parlerons donc de relaxation de contraintes. Toutefois, il s'agit dans les deux cas (relaxation ou fluage) d'une réponse du matériau au cours du temps à une sollicitation imposée et constante (soit en chargement, soit en déformation).

2.1.4 Ductilité, fragilité

La ductilité et la fragilité sont des termes qui caractérisent un comportement particulier lors de la déformation d'un matériau avant sa rupture. La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer sans se rompre. La rupture intervient lorsque le matériau n'est plus capable de contenir la propagation d'une amorce de fissure. La ductilité caractérise donc l'aptitude d'un matériau à résister à la propagation des fissures. Un matériau qui n'est pas ductile est dit fragile, et rompt de manière soudaine. La figure 2.5 illustre trois types de comportement en rupture : la rupture fragile, la rupture ductile et la rupture totalement ductile.

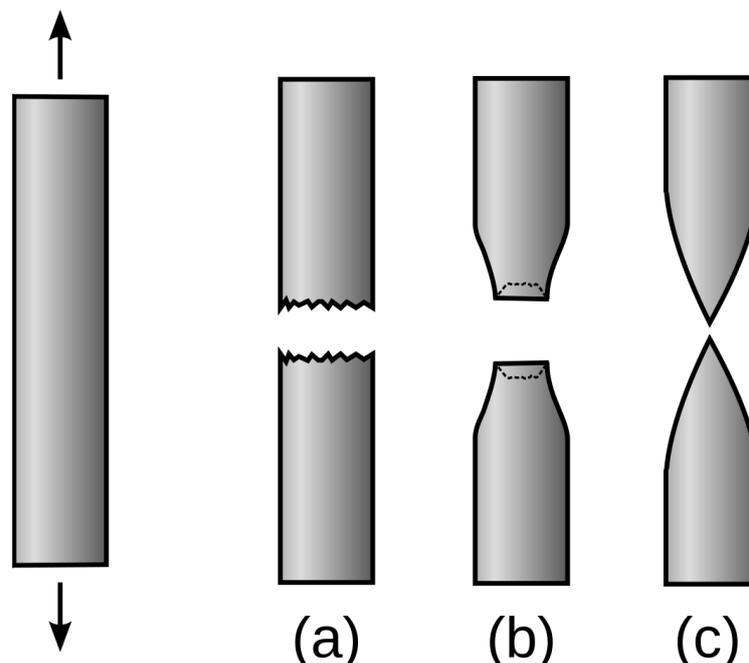


FIGURE 2.5 – Exemple de rupture fragile (a), ductile (b) et complètement ductile (c)

La ductilité d'un matériau est due à la mise en mouvement de ses dislocations. Comme nous l'avons mentionné dans la section 2.1.2, ce déplacement de dislocations entraîne un relèvement de la limite d'élasticité, mais rend également le matériau plus fragile. Pour résumer, on retiendra qu'un matériau est ductile si son allongement et sa striction à rupture

1. Chargement et contrainte ne sont pas équivalents. Dans le cas d'un essai sur éprouvette de traction, la contrainte est égale au rapport de la charge sur la section de l'éprouvette. Lorsque la striction (rétrécissement de la section de l'éprouvette due à la déformation) de l'éprouvette intervient, la charge imposée reste constante, mais puisque la section diminue, la contrainte augmente. C'est la raison pour laquelle on parle, dans le cas du fluage, de charge constante, et non de contrainte constante.

ainsi que l'énergie dépensée pour causer la rupture sont importants. Réciproquement, si son allongement et sa striction à rupture ainsi que l'énergie dépensée pour causer la rupture sont faibles, le matériau est dit fragile.

En outre, la ductilité d'un matériau est dépendante des conditions environnementales : température, pression, vitesse de déformation. La température de transition ductile-fragile (ou transition vitreuse pour les matériaux à structures amorphes [2]) est une caractéristique du matériau qui permet de mesurer l'influence de ces paramètres environnementaux sur la ductilité d'un matériau [3, 4]. Dans les applications qui nous intéressent, le silicium et la céramique du substrat présentent des comportements fragiles (propres aux métaux monocristallins et aux céramiques) tandis que les métallisations cuivre, le joint d'attache (brasé ou fritté) et les fils de câblage (aluminium ou or) sont ductiles.

2.1.5 Courbes d'hystérésis et énergie de déformation

Considérons un solide, de section A et longueur L , soumis à une force F telle que représentée en figure 2.6.

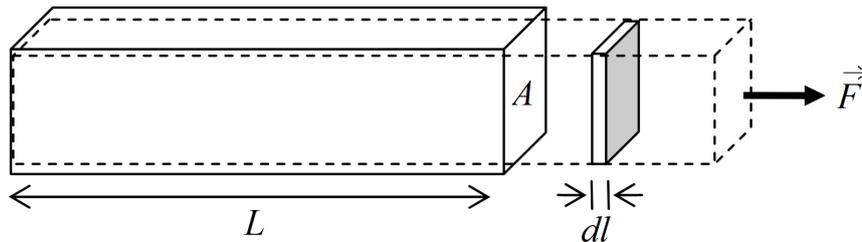


FIGURE 2.6 – Solide en traction uniaxiale

Le travail élémentaire de la force F lors du déplacement élémentaire dl s'écrit :

$$\delta W = F \cdot dl \quad (2.2)$$

Il est possible d'exprimer ce travail avec le couple force-déplacement, ou à l'aide du couple contrainte-déformation, sachant que $F = A\sigma$ et $dl = Ld\epsilon$:

$$\delta W = A\sigma L d\epsilon \quad \text{ou encore} \quad \delta W = V\sigma d\epsilon \quad (2.3)$$

En intégrant sur toute la transformation, on obtient :

$$W = V \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (2.4)$$

(avec ϵ_f la déformation finale)

Ce qui signifie que le travail volumique $\frac{W}{V}$, que l'on appelle aussi densité d'énergie de déformation (abrégé *DED*), correspond à l'aire sous la courbe $\sigma = f(\epsilon)$ associée à cette transformation, et illustrée en figure 2.7 :

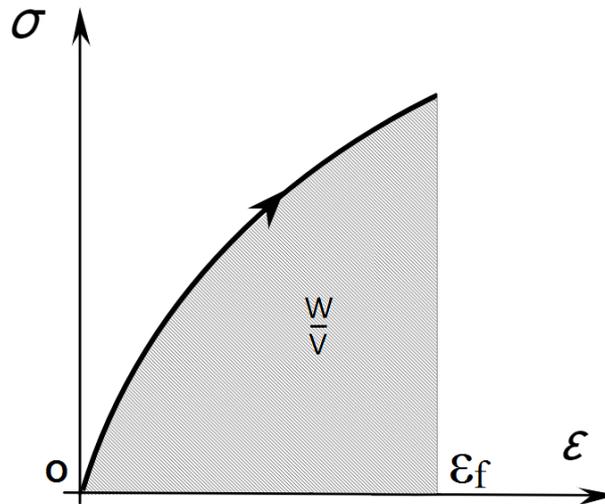


FIGURE 2.7 – Réponse type d'un matériau quelconque à une sollicitation en traction uniaxiale

Si ce matériau est élastique, alors la DED est totalement restituée au milieu extérieur. Dans le cas d'un matériau élastoplastique, la DED totale se décompose en deux termes [5, 6] :

$$DED_{totale} = DED_{elastique} + DED_{plastique} \quad (2.5)$$

Lors de la décharge, la composante élastique de la DED est restituée au milieu extérieur comme dans le cas d'un matériau purement élastique, mais la composante plastique est dissipée par le matériau (causant la déformation plastique).

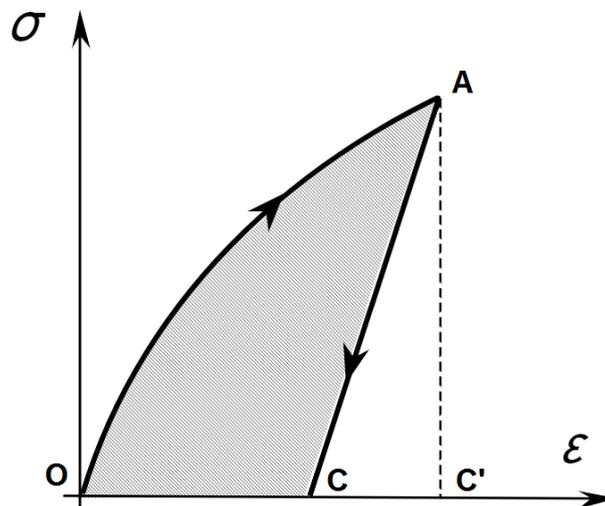


FIGURE 2.8 – Charge-décharge monotone d'un matériau élastoplastique

La figure 2.8) représente la réponse d'un matériau élastoplastique quelconque à un chargement monotone suivi d'une décharge. Le matériau est chargé selon le segment de courbe OA puis déchargé, et présente une déformation plastique : au point C, le matériau n'est plus contraint mais la déformation n'est pas nulle.

L'aire OAC'O correspond à la densité d'énergie de déformation totale, tandis que l'aire OACO correspond à la densité d'énergie de déformation plastique de ce matériau pour le chargement donné. L'aire OACO est donc égale à l'aire OAC'O à laquelle on retranche

l'énergie liée à la déformation élastique, correspondant à l'aire CAC'C et qui est restituée au milieu extérieur lors de la décharge (c.f. section 2.1.1).

Si nous considérons cette fois un chargement cyclique, la réponse du matériau est donnée par la figure 2.9.

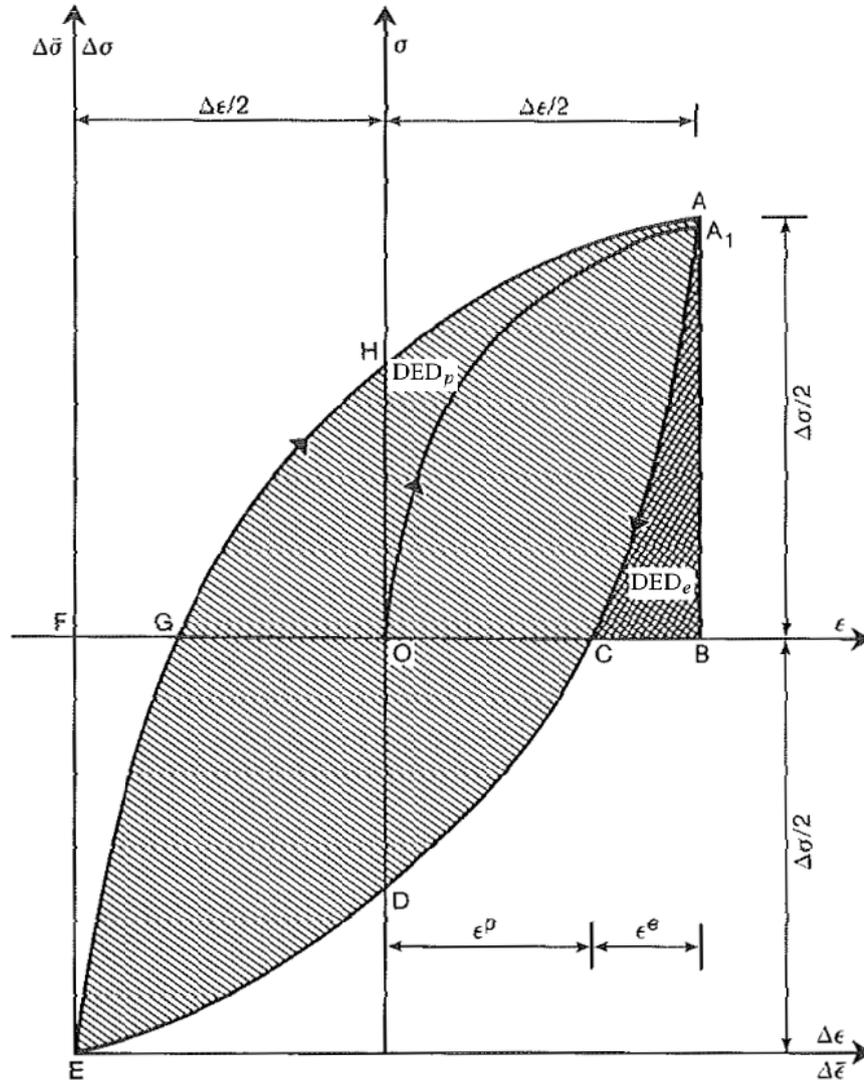


FIGURE 2.9 – Chargement cyclique [7]

Le segment OA_1 correspond au premier chargement (en contraintes positives), et A_1C à la décharge, comparable au cas de charge de la figure 2.8. Une charge symétrique à OA_1 est alors appliquée, avec une déformation initiale non nulle (point C) héritée du chargement positif, selon le segment CDE. Puis, une nouvelle charge positive est appliquée pour conclure le cycle, en suivant le segment de courbe EGHA.

Si l'on ne considère, dans un premier temps, que le domaine des contraintes positives délimité par la boucle GHACG (correspondant aux contraintes de traction), en procédant de la même manière que pour le chargement monotone précédent nous pouvons faire les mêmes observations :

- L'aire ABGHA correspond à la densité d'énergie de déformation totale.
- L'aire ACGHA correspond à la densité d'énergie de déformation plastique.

En poursuivant ce raisonnement, nous obtenons que l'aire CDEGC correspond à la densité d'énergie de déformation plastique associée aux contraintes négatives (de compression) du cycle. La somme de ces deux aires est égale à l'aire de la boucle d'hystérésis ACDEGHA et correspond donc à la densité d'énergie de déformation plastique pour un cycle complet [7].

Nous retrouvons bien que l'énergie de déformation élastique est restituée à l'issue d'un cycle et que seule la densité d'énergie de déformation plastique s'accumule. Ainsi, lors du vieillissement en fatigue (c.f. section 2.2.2), il y a enchainement de cycles et donc accumulation d'énergie de déformation plastique. Pour simplifier la lecture, nous parlerons de DED pour désigner la densité d'énergie de déformation plastique. Lorsque le contexte le demandera, la distinction entre DED plastique et DED élastique sera faite de manière explicite.

2.2 Définition et choix d'un indicateur de vieillissement

2.2.1 Généralités

La comparaison des différentes approches de gestion de la durée de vie réalisée dans le premier chapitre nous a conduit à nous intéresser au suivi d'endommagement. Ce choix nécessite d'identifier un indicateur de vieillissement, c'est-à-dire un paramètre vérifiant les conditions suivantes [8] :

1. La valeur de l'indicateur croît de façon monotone au cours des cycles.
2. L'accroissement de l'indicateur d'endommagement lié à un chargement important est supérieur à celui engendré par un chargement faible.

Ainsi, l'indicateur de vieillissement est un repère, comparable à un compteur kilométrique, dont l'objectif est de positionner une défaillance dans le temps, par rapport à la sollicitation d'un module ou assemblage de puissance.

Une première thèse, soutenue en 2011 au laboratoire IMS, s'est intéressée aux indicateurs de vieillissement des composants d'électronique de puissance [9]. Dans ces travaux, il est question d'observer l'évolution des caractéristiques de sortie et de transfert d'un transistor (MOSFET et IGBT) en fonction de sollicitations mécaniques imposées à la puce. Un manque de sensibilité de ces caractéristiques a été mis en évidence, ce qui les rend inutilisables en tant qu'indicateur de vieillissement.

Une autre thèse, soutenue en 2012 au LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes), a analysé la dérive de la résistance à l'état passant et du point de fonctionnement à coefficient thermique nul en fonction des contraintes mécaniques présente dans un transistor VDMOS [10]. Ces grandeurs se sont également révélées inadaptées, en raison d'autres mécanismes de dégradation perturbant leur évolution.

Ces deux exemples exploitent un lien entre les propriétés électriques d'un composant et son vieillissement, d'origine mécanique. Cela signifie que lorsqu'une dérive apparaît, la défaillance est déjà présente, bien qu'à un stade non critique (le système fonctionne encore, avec des performances dégradées). Puisque les mécanismes conduisant à une défaillance sont d'origine mécanique (cf. Chapitre 1), et liés en particulier à la fatigue des métaux qui constituent l'assemblage, il est naturel de rechercher un indicateur de vieillissement en rapport avec le phénomène de fatigue mécanique.

Cette section présente le principe de la fatigue mécanique et introduit certains modèles exploités pour caractériser la fiabilité des assemblages de puissance. Il en découle un choix d'une stratégie de modélisation, compte tenue des objectifs fixés initialement.

2.2.2 Introduction à la fatigue mécanique

La fatigue mécanique est un phénomène d'endommagement par répétition : considérons une pièce mécanique dimensionnée pour soutenir, en statique, une charge donnée que l'on notera C_{\max} . Cette pièce est conçue pour ne pas être endommagée, c'est à dire que la limite d'élasticité de la pièce n'est pas dépassée (pas de déformation plastique).

Le même chargement unique C_1 tel que : $C_1 < C_{\max}$ n'entraînera pas d'endommagement, mais la répétition d'un grand nombre de cycles de chargement $[C = C_1; C = 0]_n$ (charge-décharge) ou $[C = C_1; C = -C_1]_n$ (chargement alternatif) peut conduire à la rupture de la pièce : c'est l'endommagement en fatigue. Il se manifeste en priorité dans les zones à fortes concentration de contraintes.

Dans le cas d'un assemblage de puissance, ce phénomène intervient notamment au niveau des pieds de fils de câblage, de la bordure et des coins du joint d'assemblage (ou à partir des lacunes qui y sont présentes, cf. 1.16) et des métallisations de substrat [11].

Les sections suivantes introduisent les principales méthodes et modèles utilisés dans des applications d'électronique de puissance pour étudier la durée de vie d'un matériau soumis à un cyclage, à partir du phénomène de fatigue mécanique dans le joint d'assemblage.

2.2.3 Modèle de Coffin-Manson

Le modèle de fatigue de Coffin-Manson est probablement l'approche la plus répandue à ce jour en électronique de puissance. Ce modèle décrit une relation entre le nombre de cycle avant défaillance N_f , l'amplitude de déformation plastique $\Delta\epsilon_p$, le coefficient de ductilité en fatigue ϵ'_f et l'exposant de ductilité en fatigue c . Cette relation est donné par l'équation 2.6 [12] :

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.6)$$

Initialement introduit pour réaliser des prédictions de durée de vie dans l'industrie aéronautique, le modèle de Coffin-Manson bénéficie d'une grande variété de données pour les alliages utilisés dans ce secteur [13]. Ces données sont recueillies lors d'essais, à l'aide de jauges de déformations posées sur une éprouvette de test. Compte tenu de l'influence de la géométrie sur les déformations dans le joint d'assemblage, on utilise souvent un modèle éléments finis pour déterminer $\Delta\epsilon_p$ et ainsi la durée de vie de l'assemblage pour un type de cycle donné.

Le modèle de Coffin-Manson ne prenant pas en compte les effets des déformations élastiques sur le vieillissement en fatigue, il est souvent combiné avec l'équation de Basquin, qui inclut ces déformations élastiques.

L'équation 2.7 décrit le modèle résultant, connu sous le nom d'équation des déformations totales, ou équation de Coffin-Manson-Basquin [12].

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.7)$$

Avec :

- E le module d'élasticité du matériau
- $2N_f$ est le nombre de cycles (de contrainte) à rupture
- σ'_f est le coefficient de résistance en fatigue. Il est en général égal à la contrainte à rupture σ_f

La limitation majeure de ces modèles empiriques est que les phénomènes liés au temps ne sont pas pris en compte. Ceci peut s'expliquer par les origines de ce modèle, destiné à être appliqué aux matériaux de la construction aéronautique, majoritairement des alliages d'acier et d'aluminium qui ne sont pas soumis au fluage dans l'environnement d'application associé. Une application à des matériaux viscoplastiques exposés à de hautes température ne correspond donc pas au domaine de définition initial de ce modèle.

Ainsi, le fluage se manifestant dans les joints de brasure et de frittage [14, 15], n'est pas du tout considéré. L'influence de la vitesse de chargement est également ignorée. La littérature met cependant en évidence que le taux de déformation $\dot{\epsilon}$ (imposé pour notre application par la vitesse de variation de la température dans le module) a un impact fort sur la loi de comportement d'un matériau [16–18].

2.2.4 Modèle de Engelmaier

Le modèle de fatigue d'Engelmaier, donné par l'équation 2.8, donne le nombre de cycles avant défaillance à partir de la déformation totale en cisaillement $\Delta\gamma_t$, le coefficient de ductilité en fatigue ϵ'_f et une fonction c dépendante de la température et de la fréquence des cycles [19].

$$N_f = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta\gamma_t}{2\epsilon'_f} \right]^{1/c} \quad (2.8)$$

Ce modèle repose, comme le modèle de Coffin-Manson, sur la déformation mais en constitue une amélioration, en ce qu'il inclut les effets cycliques et les effets liés à la température. Cependant, l'influence de la température n'est caractérisée que par le biais d'essais de fatigue à iso-température, et non à température variable au cours du temps. De plus, tout comme le modèle de Coffin-Manson les déformations plastiques (ici en cisaillement) sont prises en compte, mais pas les effets de la viscosité et du taux de déformation.

2.2.5 Modèle de Darveaux

Le modèle de Darveaux est également un modèle répandu dans les études de prédiction de durée de vie pour des modules de puissance. Il est basé sur une approche énergétique, puisqu'il lie l'incrément de la densité de travail inélastique volumique ΔW_i , le

nombre de cycles à l'initiation de fissure N_0 et le taux de propagation de fissures $\frac{da}{dn}$. Ce modèle est décrit par l'équation 2.9 [20] :

$$\text{Initiation de fissure : } N_0 = K_1 \Delta W_i^{K_2} \quad (2.9)$$

$$\text{Propagation de fissure : } \frac{da}{dn} = K_3 \Delta W_i^{K_4}$$

Où a est la longueur caractéristique de la fissure et les K_1, K_2, K_3, K_4 sont des constantes empiriques.

Ces paramètres sont déterminés par ajustement des équations par rapport à des données expérimentales (*curve fitting*) [20]. Les coefficients K_i n'ont donc pas de sens physique et sont par conséquent influencés par le nombre et la qualité des données expérimentales. La bibliographie n'évaluant pas l'impact de ces paramètres sur la validité du modèle, celle-ci est par conséquent difficile à estimer.

Le modèle de Darveaux permet de déterminer le nombre de cycles avant fissuration, et après fissuration en considérant constant le taux de propagation des fissures. Étant un modèle basé sur l'énergie, il prend mieux en compte l'accumulation des dommages que les modèles basés sur la déformation ou la contrainte, notamment dans le cas d'un chargement cyclique complexe [21]. Comme pour les modèles basés sur la déformation, la géométrie a également un impact sur les modèles reposant sur l'énergie puisqu'elle affecte la forme de la courbe d'hystérésis du matériau qui sert à calculer le travail des déformations plastiques ΔW_i [22].

D'autre part, dans le cadre d'une analyse par éléments finis, R. Darveaux propose de rendre l'évaluation de la fatigue des joints d'attache moins dépendante du maillage en pondérant l'énergie inélastique par le volume concerné [20]. Ainsi, $\Delta \bar{W}_i$ sur un volume donné s'exprime :

$$\Delta \bar{W}_i = \frac{\sum_e \Delta W_{ie} V_e}{V} \quad (2.10)$$

Où :

- $\Delta \bar{W}_i$ est le travail inélastique volumique moyen dans le volume étudié
- ΔW_{ie} est le travail inélastique volumique dans un élément du volume étudié
- V_e est le volume de cet élément
- V est le volume total étudié

Cette méthode de moyenne permet de lisser les valeurs données par un modèle numérique et donc de limiter l'impact des artefacts numériques sur les résultats finaux.

2.2.6 Modèle de Pan : l'énergie de déformation

Le modèle de Darveaux présenté ci-avant a introduit la notion d'énergie de déformation. Toutefois, en raison des difficultés à évaluer les constantes K_i du modèle de Darveaux, on s'intéresse à une autre approche énergétique, mise en place par T-Y. Pan et dénommée CASE (pour *Critical Accumulated Strain Energy*). Celle-ci repose sur le fait que l'énergie de déformation s'accumule au cours des cycles thermiques subis par l'assemblage et finit par atteindre une valeur critique à laquelle la défaillance intervient [23, 24].

L'équation 2.11 décrit ce modèle :

$$C = N_f (a\dot{E}_p + b\dot{E}_c) \quad (2.11)$$

Où :

- C est le niveau d'énergie de déformation critique
- N_f est le nombre de cycles à défaillance
- a et b sont des constantes déterminées à partir d'essais de fatigue pour l'assemblage considéré (matériaux, géométrie)
- \dot{E}_p est le taux d'accumulation d'énergie associée aux déformations plastique
- \dot{E}_c est le taux d'accumulation d'énergie liée aux effets du fluage

Ce modèle dissocie les effets de plasticité et de fluage. Les termes \dot{E}_p et \dot{E}_c peuvent toutefois être considérés comme une seule énergie de déformation \dot{E}_s , dont la répartition entre déformation plastique et fluage est fonction des propriétés matériaux. Le modèle de Pan peut alors s'écrire :

$$C = N_f (k\dot{E}_s) \quad (2.12)$$

(avec k une constante)

Cette équation montre que le nombre de cycles avant défaillance est directement proportionnel au rapport entre l'énergie critique et le taux de variation d'énergie plastique au cours du temps. C'est de cette observation, basée sur le modèle de Pan, que vient l'idée d'utiliser l'énergie de déformation plastique (sous la forme d'une densité) pour suivre l'endommagement.

2.2.7 Bilan

En s'appuyant sur le modèle de Pan, il est possible de concevoir l'énergie de déformation plastique comme une grandeur permettant de caractériser l'endommagement d'un matériau. Les méthodes énergétiques permettent une meilleure prise en compte des phénomènes non linéaires et fortement dépendants du temps (fluage, écrouissage, dépendance au taux de déformation) tout en étant plus aisément corrélée à la durée de vie en fatigue que les méthodes basées sur la déformation ou la contrainte [7, 25]. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'utiliser une approche basée sur l'énergie de déformation pour suivre l'endommagement en fatigue du joint d'attache.

D'autre part, nous avons mis en évidence dans la section 2.1.5, que l'énergie de déformation plastique s'accumule dans un matériau au cours des cycles. La densité d'énergie de déformation vérifie donc les conditions énoncées dans la section 2.2.1 pour être un indicateur de vieillissement du joint d'attache.

Toutefois, le modèle de Pan ainsi que les autres modèles présentés ici, sont avant tout construits pour prévoir la défaillance en se basant sur la répétition d'un cycle connu. Or, cette contrainte de connaissance du cycle ne correspond pas à l'objectif visé par ces travaux de recherche : remplacer les méthodes traditionnelles de prédiction de durée de vie (modèles prédictifs basés sur des cycles de vie prédéfinis) par une solution adaptative reposant sur des mesures embarquées.

Ainsi, en conservant l'hypothèse fondatrice du modèle de Pan (l'accumulation de l'énergie de déformation plastique dans le matériau entraîne la défaillance lorsqu'elle atteint un seuil critique), nous utiliserons également l'énergie de déformation plastique comme indicateur d'endommagement, plus spécifiquement la densité d'énergie de déformation plastique, telle qu'introduite en section 2.1.5. Toutefois, plutôt que de déterminer un endommagement par cycle pour un cycle constant, les informations provenant des capteurs intégrés serviront à adapter le calcul d'endommagement en continu durant la sollicitation afin de rester au plus proche du vieillissement réel de l'assemblage. Il est donc nécessaire de construire un modèle reliant l'indicateur d'endommagement aux données de mesures. Cette démarche est abordée en section 2.5.

Comme nous l'avons vu dans la section 2.1 (en particulier 2.1.2 et 2.1.5), lorsqu'un matériau plastique est déformé, l'énergie qui lui est apportée est dissipée, en partie pour modifier sa structure interne. Ces modifications ne sont pas nécessairement homogènes (ce qui se vérifie dans le cas d'un joint d'assemblage en électronique) et dépendent des concentrations de contraintes qui apparaissent dans le matériau au cours des chargements successifs. Afin d'utiliser convenablement la DED comme indicateur de vieillissement, il est nécessaire de mesurer l'impact de ces concentrations de contraintes et de choisir la, ou les zones dans lesquelles l'observation de la DED est pertinente : c'est l'objectif d'une étude préliminaire, présentée en section 2.4.

Pour mener cette étude, le modèle d'un assemblage de puissance doit être construit. La section suivante présente l'assemblage à modéliser, les hypothèses et simplifications envisagées ainsi que les contraintes à prendre en compte dans la modélisation.

2.3 Définition du véhicule de test

2.3.1 Assemblage étudié

Le projet CAPTIF ayant pour but de proposer un démonstrateur technologique, le choix de l'assemblage "support" est important : il doit permettre de mettre en évidence la faisabilité du concept de module instrumenté tout en facilitant sa mise en place, par le biais de technologies et de procédés maîtrisés par les partenaires.

La puce retenue est un IGBT International Rectifier, déjà utilisée par aPSI^{3D}, choisie pour ses grandes dimensions facilitant une intégration des capteurs (c.f. figure 2.10).

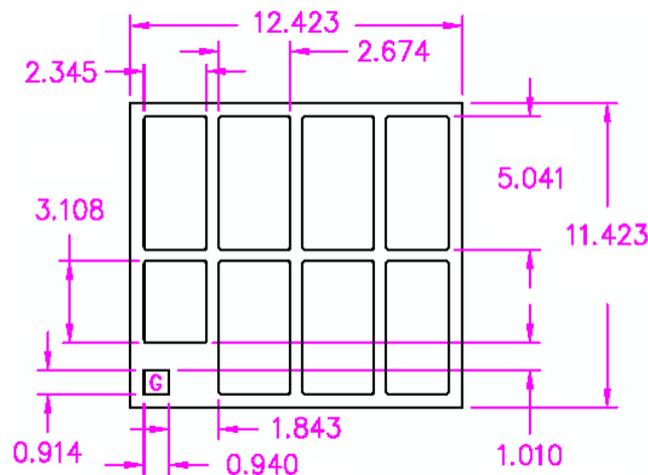


FIGURE 2.10 – Dimensions de l'IGBT de test (mm)

Cette puce sera reportée sur un substrat AMB, là encore pour des raisons de disponibilité auprès des partenaires du projet. L'assemblage est réalisé par frittage de pâte d'argent, sous l'impulsion de l'IMS qui s'intéresse à ce procédé depuis plusieurs années [26–28]. Enfin, deux partenaires proposent des capteurs de nature différentes : le LGP se concentre sur des capteurs électromagnétiques (qui ne seront pas abordés dans ces travaux) tandis que Nanolike propose des capteurs thermomécaniques, introduits dans la section 2.4.

2.3.2 Modèle thermomécanique associé

Afin de déterminer les zones d'accumulation de la DED dans le joint d'assemblage, dans un premier temps, puis de caractériser son évolution au cours des cycles de sollicitation du véhicule de test, un modèle élément fini est construit à l'aide du logiciel Ansys Mechanical. Ce modèle est de nature thermomécanique : le chargement sera de nature thermique ainsi que mécanique et l'analyse par élément fini fournira des résultats de nature mécanique. Les différents aspects de ce modèle sont présentés ci-après. La suite de ces travaux est menée à partir du modèle présenté dans cette section.

2.3.2.1 Géométrie

La puce en silicium, dont les dimensions sont précisées en figure 2.10 (épaisseur : $70\mu m$) est reportée par frittage de pâte d'argent (dimensions équivalentes à la puce et $60\mu m$ d'épaisseur) sur un substrat AMB de $5cm$ de côté, et dont les épaisseurs de couches respectives sont : Cu - $300\mu m$ / Si_3N_4 - $635\mu m$ / Cu - $300\mu m$. La figure 2.11 représente une vue en coupe de l'assemblage.

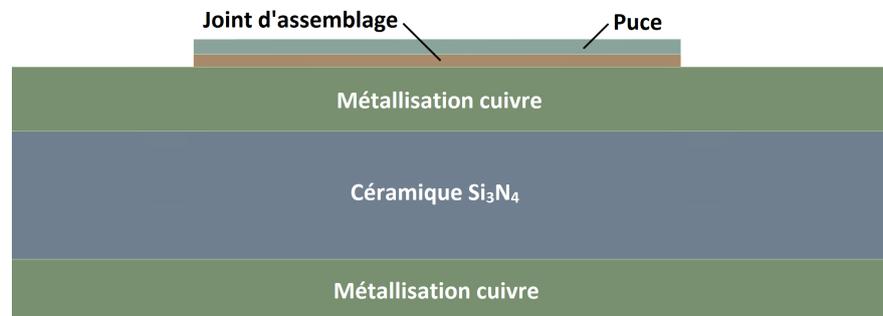


FIGURE 2.11 – Vue en coupe de l'assemblage

En raison des plans de symétrie présents, et pour faciliter la résolution du modèle numérique associé, cette géométrie est réduite à un quart de l'assemblage total, correspondant à un coin de la puce reportée sur son substrat. Des conditions limites de symétrie sont ensuite appliquées. La figure 2.13 représente cette modélisation de la géométrie de l'assemblage, que l'on désigne par la suite "modèle quart de puce".

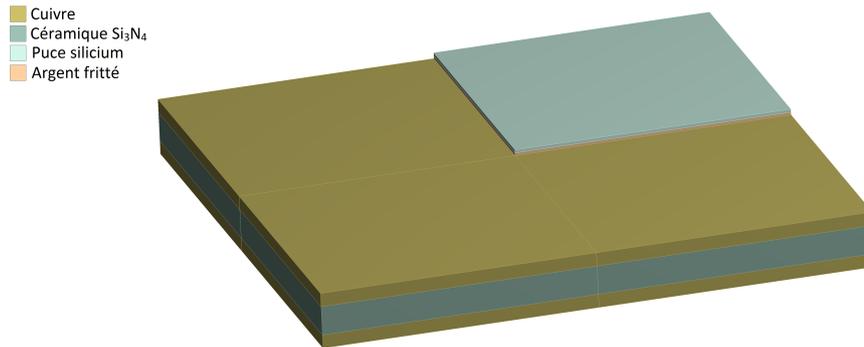


FIGURE 2.12 – Modèle quart de puce : modélisation simplifiée de la géométrie de l'assemblage

2.3.2.2 Maillage et conditions limites

Le maillage constitue la fondation d'une analyse par éléments finis. Un maillage adapté à la géométrie étudiée mais aussi à la physique concernée est essentiel au bon fonctionnement d'un modèle. La construction d'un maillage performant constitue une étude à part entière et ne fait pas l'objet principal de ces travaux. C'est la raison pour laquelle sa description n'est que succinctement abordée.

Les éléments retenus pour cette étude sont de type hexaèdre (*Solid226* dans Ansys), en raison du gain de performance qu'ils permettent lors de la résolution du modèle par le solveur. Un maillage tétraédrique permet de s'adapter à des géométries courbes au détriment du temps de calcul, mais la relative simplicité de notre géométrie nous permet d'exploiter les avantages des hexaèdres.

Pour obtenir des résultats pertinents, un certain nombre de contraintes de maillage ont été mises en place. Tout d'abord, le joint d'assemblage et la puce étant au centre de notre étude, le maillage a été raffiné dans chacun des volumes associés pour assurer la précision des résultats. Le maillage de la métallisation supérieure en contact avec le joint d'assemblage a également été raffiné, de manière à pouvoir observer convenablement son comportement au contact du joint fritté.

La taille des éléments du reste du substrat est alors croissante à mesure que l'on s'éloigne de ces zones centrales, puisque le comportement des volumes plus éloignés du joint d'assemblage ne sont pas essentiels à notre étude.

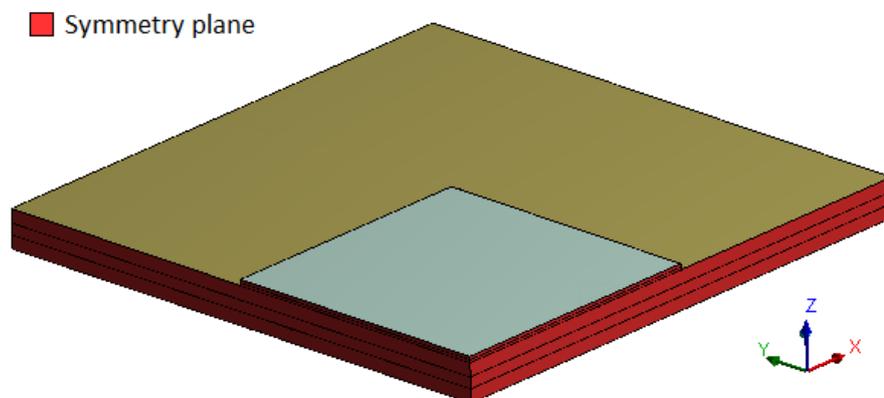


FIGURE 2.13 – Modèle quart de puce : plans de symétrie

Étant donné l'utilisation du modèle "quart de puce", des conditions limites de symétrie doivent être appliquées. Elles permettent de ne pas inclure une partie de la géométrie

dans les calculs que le solveur numérique doit réaliser, sans pour autant perdre d'information dans les résultats.

2.3.2.3 Données matériaux

À chaque élément du maillage est associé un jeu d'équation représentant les lois de la physique. Les propriétés des matériaux définissent les paramètres de ces équations, et il est donc nécessaire d'associer à chaque volume de l'assemblage modélisé, les caractéristiques physiques qui lui correspondent. Cette section détaille les hypothèses faites sur chaque matériau et présente les données physiques utilisées.

Le silicium présente un comportement linéaire élastique fragile : il n'admet pas de déformation plastique et rompt si sa limite d'élasticité est atteinte. Ses propriétés thermomécaniques sont regroupées dans le tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 – Propriétés physiques du monocristal de silicium [29]

Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	CDT (K ⁻¹)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur spécifique (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
2300	103	0,28	2,5.10 ⁻⁶	150	700

L'argent fritté est un matériau viscoplastique. Son comportement est donc dépendant du temps à chargement constant, et également du taux de déformation. Pour modéliser ce type de comportement, des modèles tels que ceux de Garofalo ou Norton existent. Ces modèles sont respectivement donnés par les équations 2.13 et 2.14.

Le modèle de Garofalo (ou modèle en sinus hyperbolique) permet la prise en compte du fluage secondaire (c.f. section 2.1.3) :

$$\dot{\epsilon}_{fl} = A. \exp\left(-\frac{Q}{k_b.T_a}\right). \sinh(\alpha\sigma)^n \quad (2.13)$$

Où :

- $\dot{\epsilon}_{fl}$ est la vitesse de déformation en fluage (s⁻¹)
- A est une constante du matériau (s⁻¹)
- Q est l'énergie d'activation (J.mol⁻¹)
- k_b est la constante de Boltzmann (1,38.10⁻²³J.K⁻¹)
- T_a est la température absolue (K)
- α est l'inverse du niveau de contrainte au changement de pente (MPa⁻¹)
- σ est la contrainte (MPa)
- n est l'exposant de viscosité

Le modèle de Norton lie la vitesse de déformation permanente à la contrainte en fluage secondaire :

$$\dot{\epsilon}_{fl} = A. \exp\left(-\frac{Q}{k_b.T_a}\right). \left(\frac{\sigma}{\sigma_n}\right)^n \quad (2.14)$$

Où :

- $\dot{\epsilon}_{fl}$ est la vitesse de déformation en fluage (s^{-1})
- A est une constante du matériau (s^{-1})
- Q est l'énergie d'activation ($J.mol^{-1}$)
- k_b est la constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23}J.K^{-1}$)
- T_a est la température absolue (K)
- σ est la contrainte (MPa)
- σ_n est une contrainte d'adimensionnement (MPa)
- n est l'exposant de viscosité

Le modèle d'Anand est un autre modèle permettant de représenter la viscoplasticité et le fluage de l'argent fritté. Il permet également d'interpréter les petites déformations [30–32] :

$$\dot{\epsilon}_{fl} = A. \exp\left(-\frac{Q}{k_b.T_a}\right). \sinh\left(\xi \frac{\sigma_{eq}}{s}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.15)$$

Où :

- $\dot{\epsilon}_{fl}$ est la vitesse de déformation en fluage (s^{-1})
- A est une constante du matériau (s^{-1})
- Q est l'énergie d'activation ($J.mol^{-1}$)
- k_b est la constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23}J.K^{-1}$)
- T_a est la température absolue (K)
- ξ est le multiplicateur des contraintes (MPa^{-1})
- σ_{eq} est la contrainte équivalente (MPa)
- s est la résistance isotrope à la déformation inélastique (MPa)
- m est la sensibilité au taux de déformation

La variable scalaire s représente la résistance isotrope à la déformation inélastique. La loi d'évolution de cette résistance à la déformation plastique est donnée par l'équation 2.16 :

$$\dot{s} = \left(h_0 \left|1 - \frac{s}{s^*}\right|^a \text{sign}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right)\right) \dot{\epsilon}_{fl} \quad (2.16)$$

$$s^* = \hat{s} \cdot \left[\frac{\dot{\epsilon}_{ie}}{A} \cdot \exp\left(\frac{Q}{R.T_a}\right)\right] \quad (2.17)$$

Où :

- s_0 est la valeur initiale de s (MPa)
- h_0 est la constante d'écroissage (MPa)
- s^* est la saturation de la résistance de déformation dont l'expression est donnée par l'équation 2.17 (MPa)
- a est la sensibilité à l'écroissage
- \hat{s} est un coefficient liant la valeur de saturation au taux de déformation (MPa)
- R est la constante des gaz parfaits ($J.mol^{-1}.K^{-1}$)

Les constantes A , Q , m , n , a et h_0 sont identifiées à l'aide d'essais de traction à vitesse de déformation et température constantes. Le tableau 2.2 regroupe les paramètres du modèle d'Anand pour l'argent fritté.

TABLEAU 2.2 – Paramètres du modèle d'Anand pour l'argent fritté [33]

A (s^{-1})	Q/R (K)	ξ	m	\hat{s} (MPa)	n	h_0 (MPa)	a	s_0 (MPa)
9,81	5706	11	0,5672	67,389	0,00326	15800	1	2768

Ce modèle est donc gouverné par la variable s qui dépend de l'état d'écroissage du matériau, contrairement aux modèles de type Garofalo ou Norton présentés plus haut. Le modèle d'Anand est adapté aux matériaux ductiles à caractère fortement viscoplastique.

Pour à être tout à fait adapté à une étude en fatigue, il serait toutefois nécessaire de caractériser l'évolution des coefficients d'Anand pour des états de vieillissement du matériau différents. Cette dépendance à l'endommagement n'est pas suffisamment prise en compte par la variable s et constitue un axe d'amélioration important d'un point de vue des approximations de la modélisation par éléments finis.

C'est le modèle retenu pour représenter la loi de comportement de l'argent fritté dans la suite de notre étude. Les propriétés physiques de l'argent fritté sont présentées dans les tableaux 2.3 et 2.4.

TABLEAU 2.3 – Propriétés physiques de l'argent fritté [29]

Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	CDT (K^{-1})	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Chaleur spécifique ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)
8500	Tableau 2.4	0,25	$1,95.10^{-5}$	160	100

TABLEAU 2.4 – Module d'Young de l'argent fritté en fonction de la température [33]

Température ($^{\circ}C$)	-40	0	25	60	120	150
Module d'Young (GPa)	9,01	7,96	6,28	4,52	2,64	1,58

Le cuivre est un matériau élastoplastique écrouissable. Son comportement est modélisé par la loi d'écrouissage cinématique non linéaire de Chaboche. Ce modèle, tel qu'utilisé par Ansys Mechanical, est défini par les équations suivantes :

$$\dot{\alpha}_i = \frac{2}{3} C_i \dot{\epsilon}_{pl} - \gamma_i \dot{\epsilon}_{pl} \alpha_i \quad ; \quad \alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (2.18)$$

Où :

- α est le tenseur des variables d'écrouissage
- α_i est la i -ème variable d'écrouissage
- C_i et γ_i sont les paramètres de Chaboche
- $\dot{\epsilon}_{pl}$ est le taux de déformation plastique
- $\dot{\epsilon}_{pl}$ est l'amplitude du taux de déformation plastique
- n est le nombre de composantes des contraintes résiduelles

Les paramètres C_i et γ_i sont obtenus par ajustement aux données expérimentales (*curve fitting*). Les paramètres de Chaboche pour les cinématiques primaires et secondaires du cuivre sont donnés pour différentes températures (avec le module d'élasticité associé) dans les tableaux 2.5 et 2.6 :

TABLEAU 2.5 – Propriétés physiques des métallisations cuivre [29]

Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	CDT (K ⁻¹)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur spécifique (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
8950	Tableau 2.6	0,36	1,69.10 ⁻⁵	390	385

TABLEAU 2.6 – Modèle de Chaboche du cuivre [34]

Température (°C)	C ₁ (MPa)	γ ₁	C ₂ (MPa)	γ ₂	E (MPa)
20	54041	962	721	1,1	96890
50	52880	1000	700	1,1	92106
150	45760	1100	600	1,1	89583
250	38040	1300	400	10	79762
500	28952	1700	300	35	63991

La céramique Si₃N₄ est, comme le silicium, un matériau liéaire élastique fragile. Ses propriétés sont présentées dans le tableau 2.7.

TABLEAU 2.7 – Propriétés physiques de la céramique Si₃N₄ [35]

Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	CDT (K ⁻¹)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur spécifique (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
3310	300	0,24	3,3.10 ⁻⁶	58	740

2.3.2.4 Chargement

Comme nous l'avons mis en évidence au premier chapitre, l'essentiel des défaillances d'un assemblage de puissance est d'origine thermique (c.f. 1.4). Pour solliciter les mécanismes de vieillissement qui conduiront à la défaillance, il faut donc générer des cycles d'échauffement de l'assemblage.

Pour ce faire, deux approches existent : le **cyclage passif** consiste à placer l'assemblage dans une enceinte climatique qui impose une température variable au cours du temps ; le **cyclage actif** consiste à utiliser la puce elle-même pour générer un auto-échauffement. L'hypothèse réalisée dans ces travaux est que l'origine de la chaleur n'influe pas de manière significative sur l'évolution de la DED au cours du temps. En effet, l'endommagement causé par un gradient de température dans l'assemblage est faible devant celui causé par les différences de coefficients de dilatation thermique des matériaux de l'assemblage. Par conséquent, dans une démarche de simplification, c'est une sollicitation en cyclage passif qui a été choisi.

Le chargement appliqué dans la modélisation par élément fini est de nature thermique. Un cycle type de vieillissement accéléré a été choisi : on réalise une variation rapide de température (8°C par minute) entre -65°C et 175°C, avec des paliers d'une durée de 30 minutes.

D'autre part, puisque l'on s'intéresse à l'énergie de déformation plastique accumulée dans le joint fritté, nous avons choisi de prendre en compte les contraintes résiduelles issues du procédé d'assemblage. Le procédé de frittage (c.f. figure 1.3) consiste en une chauffe et une mise en pression de la puce et du substrat, séparés par une mince couche du matériau à fritter (pâte ou film). Ces étapes sont donc ajoutées avant les cycles thermiques dans le chargement du modèle. Le chargement final est présenté en figure 2.14.

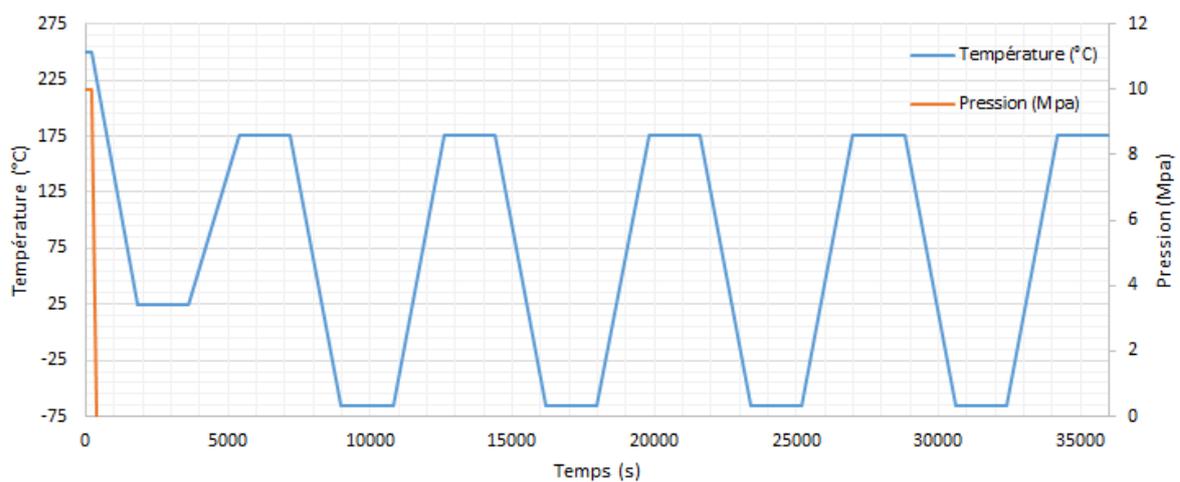


FIGURE 2.14 – Chargement thermomécanique du modèle éléments finis

2.4 Positionnement et intégration des capteurs

L'objectif final étant de pouvoir suivre l'état de santé du module à partir de mesures directes, la première question à se poser est celle de la localisation de ces mesures, et donc de l'intégration des capteurs sur l'assemblage. Cette section présente les travaux préalables menés pour répondre à cette interrogation.

2.4.1 Distribution de la DED au cours du vieillissement

Puisque nous cherchons à suivre l'évolution de la DED au cours du vieillissement de l'assemblage, il paraît logique de s'intéresser à la distribution de cette énergie dans le joint afin d'identifier des zones propices aux mesures. Une première simulation a donc été effectuée pour observer cette distribution : un essai de cinq cycles passifs a été simulé.

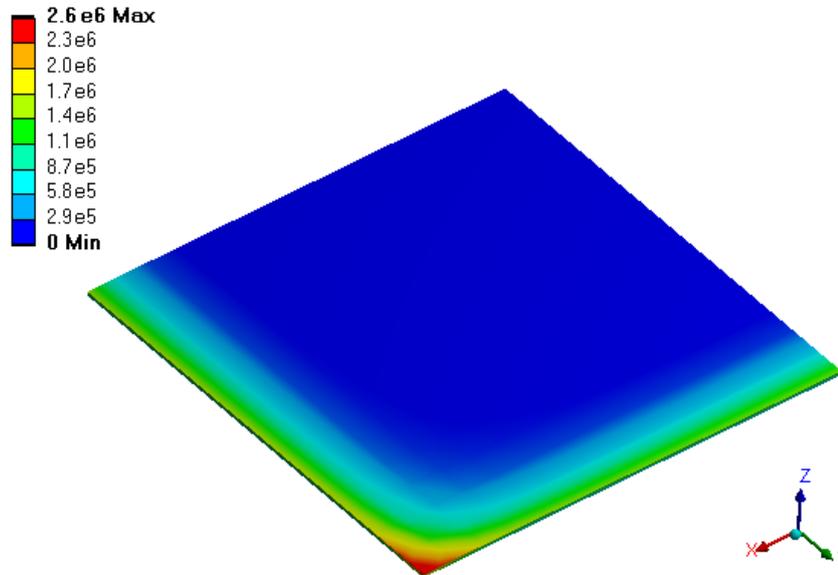


FIGURE 2.15 – Distribution de la densité d'énergie de déformation plastique dans un joint fritté après 5 cycles

La figure 2.15 ci-dessus représente la distribution de la DED dans le joint d'assemblage et permet de faire deux constats :

- La DED s'accumule nettement moins au centre de la puce que sur sa périphérie.
- Les angles présentent une DED intense et très localisée.

Les observations faites sur des composants après vieillissement révèlent que les coins et bords de puce sont les zones dans lesquelles les amorces de fissure sont le plus souvent observées [36]. Ces constatations concordent donc avec l'idée que la DED caractérise bien le vieillissement du joint d'assemblage, puisque les défaillances apparaissent dans les zones du joint où la DED atteint des niveaux élevés.

Nous déduisons de ces remarques que l'intérêt d'un capteur de déformation dans la zone centrale est limité, puisqu'il ne mesurerait qu'une variation faible de la DED, plus difficile à déceler. D'autre part, les angles de la puce sont également à éviter en raison de cette importante accumulation. Ils sont en effet le lieu d'amorçage privilégié de fissures et donc une zone critique de l'assemblage, mais cette tendance instable risque fortement de rendre les mesures inexploitable. De plus, la méthode des éléments finis pouvant générer des artefacts numériques liés à la présence de singularités géométriques, il est préférable de ne pas baser un modèle de vieillissement sur des données issues de ces zones (la solution présentée ne sert alors qu'à évaluer une tendance). Nous nous intéresserons donc à la périphérie de la puce, à l'exception de ses coins.

Afin d'être au plus proche du joint d'assemblage tout en restant à la périphérie de la puce, nous pouvons considérer plusieurs positionnements potentiels de capteurs, représentés en figure 2.16 :

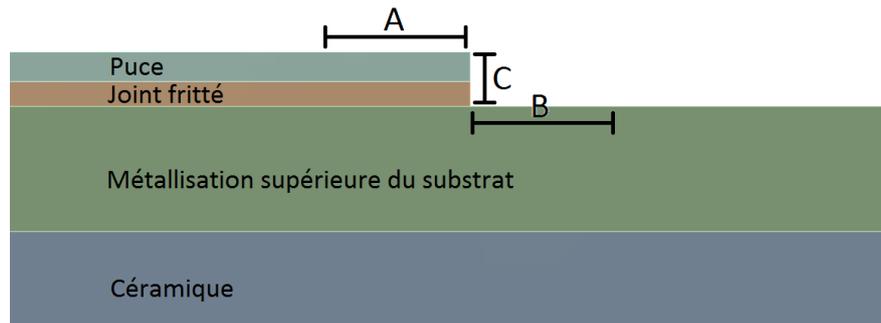


FIGURE 2.16 – Positions potentielles de capteurs sur coupe de l'assemblage

- En surface de puce, à proximité d'un côté (repère A)
- Sur la métallisation supérieure du substrat, à proximité du joint d'assemblage (repère B)
- Sur la tranche de la puce et du joint fritté, dans le cas d'une mesure de la dilatation verticale du joint (repère C)

Le choix de l'une de ces zones est guidé par un certain nombre de contraintes, détaillées dans la section suivante.

Dans le cas d'un capteur de température, puisque nous ne cherchons pas à déterminer une température absolue, mais uniquement à corrélérer une évolution de température avec celle de la DED, il est seulement nécessaire de faire un relevé de température au plus proche des zones d'accumulation de la DED. Les sites A et B de la figure 2.16 conviennent tout à fait, mais d'autres positions sont envisageables, en fonction des contraintes technologiques rencontrées.

2.4.2 Contraintes d'intégration des capteurs sur l'assemblage

Les capteurs conçus et fabriqués par Nanolike permettent de mesurer des température ou des déformations. Les mesures auxquelles nous faisons référence dans ces travaux sont donc soit des mesures de température, soit de déformation. Leur fonctionnement repose sur la variation de résistance de chaînes de nanoparticules d'or. Ces chaînes sont formées à partir d'une solution contenant les particules, qui sont ensuite alignées pour former une série de petites lignes parallèles entre deux électrodes, à l'aide d'un champ électrique. Pour cette raison, les capteurs doivent être isolés électriquement de leur support, qui doit présenter un état de surface homogène et régulier.

Cette contrainte de fabrication exclut *de facto* le dépôt d'un capteur sur le site repéré C (c.f. figure 2.16). En effet, outre la faible dimension de cette zone qui rend difficile le dépôt de la solution contenant les particules, le profil de la tranche d'un joint d'assemblage n'est ni régulier ni droit, comme le montre la figure 2.17.

Le site B (c.f. figure 2.16) présente les mêmes défauts que le site C : il est difficile d'être à proximité du joint d'assemblage, ce qui signifie que les déformations issues du capteur risquent d'être plus fortement influencées par les déformations de la métallisation et de la céramique du substrat que par celles du joint d'assemblage lui-même. C'est la raison pour laquelle nous considérerons le site A, donc les déformations en surface de puce.

En ce qui concerne un capteur de température, comme explicité dans la section précédente c'est la variation dans le temps de la température qui nous intéresse : le gradient

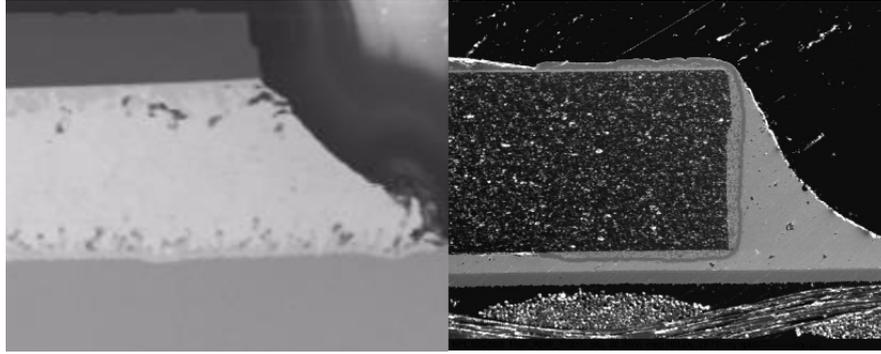


FIGURE 2.17 – Coupe d'un joint de frittage (à g.) et d'un joint de brasure (à d.)

de température dans la puce entre les sites *A* et *B* n'est pas significatif dans ce contexte. C'est donc en étudiant les corrélations entre les mesures et la DED que nous concluons laquelle de ces mesure est la plus adaptée. La démarche d'étude des corrélations entre variables est introduite dans la section suivante.

2.5 Construction du lien entre mesure et indicateur

Le choix d'utiliser la densité d'énergie de déformation plastique du joint d'assemblage comme indicateur de vieillissement ayant été fait (c.f. 2.2.7), et après avoir déterminé les zones dans lesquelles les mesures seront réalisées, il est nécessaire de s'intéresser à la corrélation entre mesure et indicateur. En effet, la DED n'est pas directement mesurable dans le joint et sa détermination se fait par le calcul. Cette section présente les outils et méthodes numériques utilisés.

2.5.1 Calcul de la densité d'énergie de déformation plastique

Comme nous l'avons montré en 2.1.5, la densité d'énergie de déformation totale dans un matériau soumis à un chargement monotone s'exprime sous la forme d'une intégrale :

$$DED_{totale} = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (2.19)$$

(avec ϵ_f la déformation finale)

Dans le cas d'un matériau soumis à des cycles de charge, et en considérant uniquement la composante plastique de la densité de déformation, on écrit l'incrément de la DED plastique pour un cycle sous la forme :

$$\Delta DED_{plastique} = \int_0^{\epsilon_{p,finale}} \sigma d\epsilon_p \quad (2.20)$$

L'expression de la DED est donc directement liée à la loi de comportement du matériau, c'est à dire de la relation contrainte-déformation. Dans le cas des matériaux utilisés pour les joints d'assemblages, il n'existe pas d'expression analytique de cette relation (du moins qui prenne en compte l'influence de la température et du taux de déformation). Par conséquent, il n'est pas possible de proposer une équation permettant de calculer analytiquement la DED à partir de la mesure des paramètres de chargement (temps, température ou éventuellement déformation). Ainsi, pour établir le lien entre notre indicateur de vieillissement et ces paramètres, il est nécessaire de faire appel à des méthodes numériques.

2.5.2 L'analyse par surfaces de réponse

L'analyse par surfaces de réponse est une méthode d'analyse reposant sur un ensemble de techniques mathématiques utilisées pour le développement d'une relation fonctionnelle entre une variable d'intérêt y , la réponse, et un certain nombre de variables, notées x_1, x_2, \dots, x_n , à partir desquelles on cherche à trouver y . On les appelle variables de contrôle, ou variables explicatives. L'objectif est d'approcher la fonction f , inconnue, vérifiant la relation :

$$y = f(x_1, \dots, x_n) \quad (2.21)$$

L'approximation recherchée peut être paramétrique (par exemple un polynôme), mais aussi être une combinaison linéaire de fonctions élémentaires. Lorsqu'on construit une surface de réponse, l'objectif est de trouver la forme fonctionnelle la plus adaptée (linéaire, multilinéaire, polynomiale, trigonométrique, ou une combinaison de tout type de fonction) et de calculer les coefficients dits de régression. Si \tilde{f} est la surface de réponse approchant la fonction f , nous cherchons à déterminer les fonctions \tilde{f}_i et les coefficients k_i tels que :

$$\tilde{f}(x_1, \dots, x_n) = \sum_1^n k_i \tilde{f}_i(x_1, \dots, x_n) \quad (2.22)$$

Une telle méthodologie permet de construire une approximation de la fonction f , à partir de l'observation des réponses à plusieurs distributions de variables de contrôle. On définit les intervalles de variation de chaque variable x_k , puis on sélectionne plusieurs n -uplets $(x_1, x_2, \dots, x_n)_i$. Pour chaque jeu de données d'entrée, on observe la réponse y_i associée. C'est à partir de ces $(x_1, x_2, \dots, x_n)_i$ et y_i que l'approximation $y = \tilde{f}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ est construite.

L'intérêt de cette approche est donc qu'elle permet de se passer de la connaissance analytique des interactions étudiées. Elle fournit une approximation de la relation entre sollicitation et réponse d'un système en s'appuyant sur des observations d'expériences. Elle permet entre autre, de traiter des problèmes complexes, qui comportent un grand nombre de variables de contrôle, avec de forts couplages, ou comme c'est notre cas, pour lesquels la relation analytique n'est pas exprimable.

C'est une technique utilisée pour comprendre, dans le domaine d'étude fixé, la distribution de la variable d'intérêt et l'influence des variables de contrôle sur cette distribution. Elle permet de déterminer des conditions d'utilisation répondant à une certaine spécification (détermination d'un seuil) ou de trouver le meilleur compromis possible, dans le cadre d'une optimisation.

Les étapes principales de cette démarche sont [37] :

1. Le choix de la variable d'intérêt et la détermination des variables d'influence par criblage, ainsi que de leurs intervalles de variabilité (détermination de l'espace de conception) en accord avec le cas étudié.
2. Le choix de la distribution des données d'entrée (que l'on appelle également plan d'expériences).
3. La construction de l'approximation entre variables de contrôle et d'intérêt.
4. L'évaluation de la validité du modèle ainsi obtenu.
5. La détermination de l'optimum recherché.

Dans le cas qui nous intéresse, nous ne cherchons pas à déterminer un optimum, ce qui nous permet d'ignorer l'étape 5. De plus, puisque nous connaissons la variable d'intérêt (la DED) et que les variables de contrôle sont imposées par l'objectif du projet (utiliser des données issues de capteurs embarqués), quelques libertés seront prises par rapport au déroulement classique de la première étape. Dans cette section, nous présenterons les concepts et outils associés à chacune d'entre elles.

2.5.2.1 Variables d'intérêt et de contrôle

Considérons un problème quelconque, comportant une variable d'intérêt y , et dix variables de contrôle x_1, \dots, x_{10} , *a priori* pertinentes. Nous cherchons à déterminer lesquelles de ces variables x_k sont les plus influentes sur y .

Afin de disposer d'un premier jeu de données, un plan d'expériences est construit (c.f. section 2.5.2.2). Un plan factoriel est généralement utilisé, en raison de sa simplicité de mise en œuvre et parce qu'il permet de rapidement mettre en évidence les interactions entre les facteurs [37]. Cette première série de données est utilisée pour dresser un bilan rapide du problème et déterminer les variables de contrôles les plus pertinentes. Dans un second temps, seules ces variables seront exploitées, à l'aide de modèles plus complexes et donc plus coûteux à construire, ce qui motive notre recherche des variables les plus représentatives du comportement du système.

Une première approximation de la réponse du système peut être construite (en supposant par exemple que la fonction recherchée est un polynôme, dont on détermine les coefficients par la méthode des moindres carrés — c.f. [38]). L'analyse de la matrice des corrélations linéaires permet de se faire une première idée des interactions linéaires existant entre les différentes variables, qu'elles soient de contrôle ou d'intérêt. La figure 2.18 est un exemple d'une telle matrice, pour un cas quelconque.

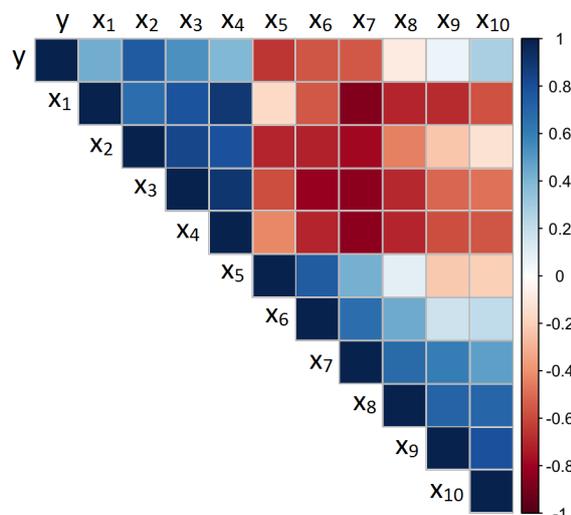


FIGURE 2.18 – Matrice des corrélations linéaires

La matrice des corrélations regroupe les coefficients de corrélation linéaires des variables du problème. Ce coefficient est le rapport entre la covariance entre deux variables (par exemples X et Y) et le produit de leurs écarts-types :

$$r = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (2.23)$$

Il est égal à 1 dans le cas où l'une des variables est une fonction affine croissante de l'autre variable et à -1 lorsqu'une variable est une fonction affine décroissante de l'autre. Les valeurs intermédiaires renseignent sur le degré de dépendance linéaire entre les deux variables : plus le coefficient est proche des valeurs extrêmes, plus la corrélation linéaire entre les variables est forte.

Sur l'exemple de la figure 2.18, nous pouvons constater que les variables x_8 et x_9 ont une très faible interaction linéaire avec la variable d'intérêt y . Les variables x_2 et x_5 sont dominantes, tandis que les variables x_3 , x_6 et x_7 sont intermédiaires. Il est donc envisageable de négliger x_8 et x_9 , tandis que x_2 et x_5 doivent être conservées.

Cependant, les interactions linéaires ne sont pas les seules en jeu. Pour prendre en compte les effets non linéaires éventuellement présents, un diagramme des coefficients normalisés est utilisé. Ce diagramme, dont un exemple est présenté en figure 2.19, permet de comparer l'importance des prédicteurs dans le modèle.

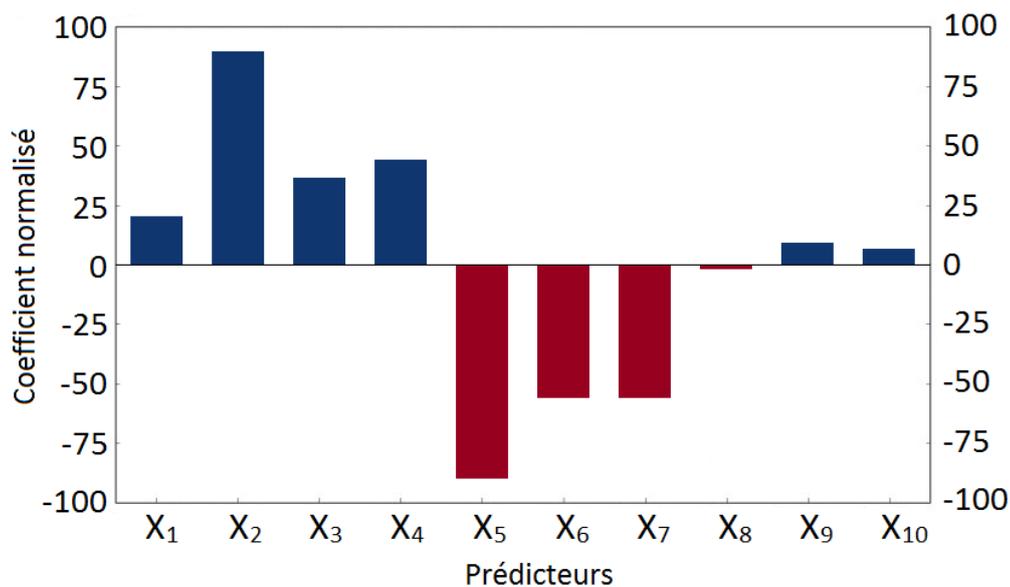


FIGURE 2.19 – Diagramme des coefficients normalisés

Ce diagramme confirme l'importance des variables x_2 et x_5 dans l'explication de la variabilité de y . Les variables x_6 et x_7 sont également importantes. Nous observons toutefois que les variables x_1 et x_4 , dont les corrélations linéaires étaient équivalentes, sont ici sensiblement différentes. Cela s'explique par une influence non linéaire plus forte pour la variable x_4 . De plus, alors que la variable x_3 présentait une corrélation linéaire plus forte avec y que celle de x_4 , cette dernière est plus influente lorsque l'on considère les corrélations non linéaires. Lorsque l'on s'intéresse aux variables x_8 , x_9 et x_{10} , leurs contributions au modèle sont relativement faibles et on peut les négliger. Selon la précision du modèle recherché et l'impact engendré, on pourrait également négliger la variable x_1 dans ce problème.

Dans le cas qui nous intéresse, nous étudions une variable d'intérêt, la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'assemblage, et cherchons à l'expliquer par deux potentiels contributeurs, à savoir la température de la puce et la déformation, soit du substrat, soit de la puce. Cette étape de criblage pour déterminer les contributeurs majeurs n'est donc pas essentielle, du fait de leur nombre réduit pour notre application. Ce travail préliminaire présente tout son intérêt lors d'une étude avec de nombreuses variables de contrôle, afin de maximiser la pertinence du plan d'expériences.

2.5.2.2 Plan d'expériences

Un plan d'expériences est un ensemble d'itérations d'une même expérience (réelle ou simulée) avec des combinaisons de variables d'entrée (ou de contrôle) différentes. Le but de cette démarche est d'explorer l'espace de conception, c'est-à-dire l'ensemble des résultats possibles de l'expérience étudiée en fonction de toutes les possibilités qu'offrent les paramètres du système. Construire un plan d'expériences permet de collecter des données sur le sujet d'étude, données qui seront ensuite exploitées pour construire des modèles de comportement pour parvenir à l'objectif fixé (optimisation, recherche d'un compromis, etc.).

La première étape dans la construction d'un plan d'expériences est de choisir la méthode de distribution des points d'expérience. Un point d'expérience est un n -uplet (avec n le nombre de variables de contrôle) qui représente une des multiples combinaisons de données d'entrée possibles dans l'espace de conception. Ces points d'expérience sont générés avec une méthode d'échantillonnage, que l'on choisit en fonction de ses propriétés numériques. Nous avons évoqué le plan factoriel dans a section 2.5.2.1, puisqu'il permet avec peu de points (et donc moins d'expériences à réaliser) de déterminer rapidement les variables importantes du problème considéré.

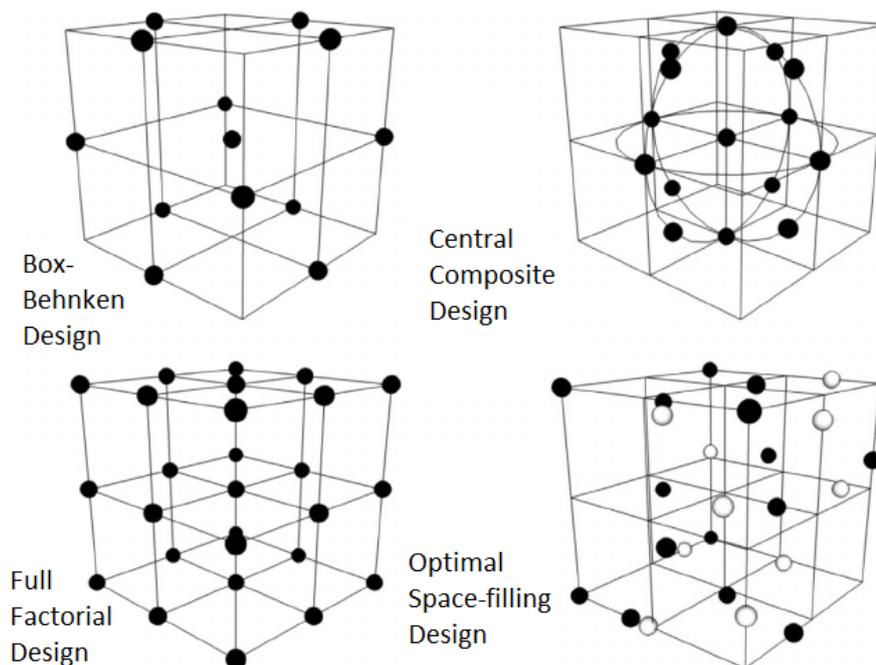


FIGURE 2.20 – Illustration de quatre méthodes d'échantillonnage

Différentes méthodes d'échantillonnage ont différentes caractéristiques, le choix de la méthode se fait donc en fonction de l'utilisation prévue du plan d'expériences. Le choix d'un plan d'expériences peut avoir une influence non négligeable sur le coût de calcul d'une surface de réponse ainsi que sur sa précision.

La figure 2.20 illustre quelques méthodes d'échantillonnage classiques. Dans cette illustration, trois variables sont représentées : le cube représente l'espace de conception défini par les intervalles de définitions respectifs des variables. Chaque point dans ce cube a donc trois coordonnées, correspondant aux trois variables de contrôle.

Une fois les points d'expérience générés, la variable d'intérêt est déterminée pour chacun d'entre eux. Elle peut résulter d'un protocole expérimental réel ou d'une simulation numérique, et ces deux origines sont regroupées sans distinction sous le terme "résultat expérimental". De plus amples détails sur la théorie des plans d'expériences peuvent être trouvés dans [39–43].

Plans factoriels

Pour construire un modèle permettant d'étudier les interactions entre n variables de contrôle et la variable d'intérêt, un plan factoriel peut-être utilisé. Il permet d'investiguer les variations combinées des variables, plutôt que l'influence d'une seule variable à la fois. Les intervalles de définition de chaque variable sont définis puis discrétisés. Si seules les extrémités de la plage de variation sont spécifiées, alors un tel plan d'expériences est dit 2^n . De la même façon, si les points milieux sont ajoutés, on obtient un plan factoriel 3^n . Un tel plan pour un problème à trois variables de contrôle est illustré en figure 2.21,

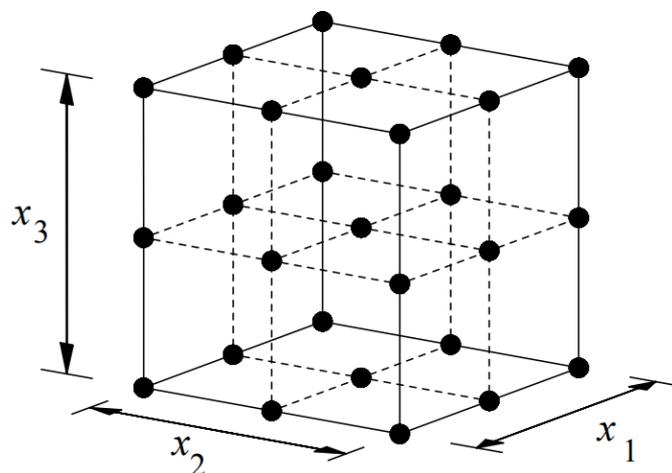


FIGURE 2.21 – Exemple d'un plan factoriel 3^3

Les plans factoriels sont typiquement utilisés pour calculer des modèles polynomiaux de second ordre, par exemple pour effectuer un criblage des variables pertinentes.

On distingue les plans factoriels complets et fractionnaires : dans le cas où l'on aurait un grand nombre de variables, il est possible de réduire encore la taille du plan d'expériences en ne considérant qu'un nombre limité de combinaisons. Par exemple, en ne considérant qu'un tiers du plan 3^3 représenté en figure 2.21, on obtient trois plans fractionnaires possibles, illustrés en figure 2.22 [43].

On parle alors de plan factoriel 3^{3-1} . La réunion de ces trois plans est le plan factoriel complet 3^3 . Cette approche est utilisée pour le criblage des problèmes à très grand nombre de variables.

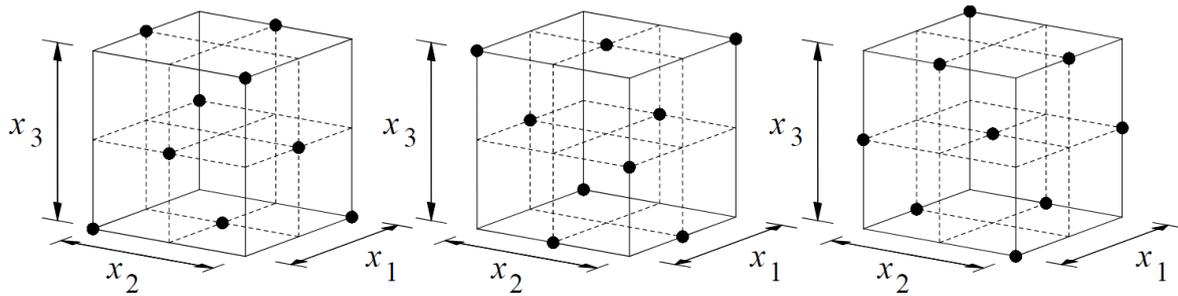


FIGURE 2.22 – Exemple d'un plan 3^3 factoriel

Plans composites centrés

Les plans composites centrés sont des plans factoriels 2^n , améliorés par l'utilisation de points centraux et axiaux. Un exemple de plan composite centré à trois variables est illustré en figure 2.23.

Ces plans représentent une alternative au plan factoriel 3^n pour la construction de modèles de second ordre, car ils permettent de diminuer le nombre de points d'expérience tout en assurant une distribution homogène (pas comme un plan factoriel fractionnaire, par exemple) autour du point central de l'espace de conception.

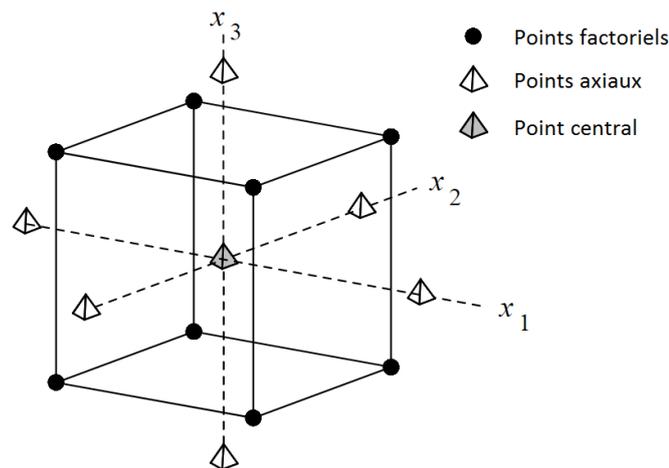


FIGURE 2.23 – Exemple d'un plan composite centré

Plans probabilistes

Un plan d'expériences peut-être construit en faisant appel à des lois de probabilité pour générer les points d'expérience. Chaque élément de la population de l'espace de conception a alors une probabilité non nulle et connue de faire partie de l'échantillon sélectionné, qui dépend de la loi de probabilité choisie [44]. Une loi aléatoire simple peut par exemple être utilisée. C'est la plus simple des méthodes d'échantillonnage : chaque élément a la même probabilité d'être sélectionné.

De telles méthodes permettent de s'assurer que l'échantillon généré est représentatif de l'espace de conception. Pour notre application, c'est une compréhension globale de la relation entre DED et paramètres thermomécaniques de l'assemblage qui est recherchée. La méthode d'échantillonnage choisie doit donc permettre de générer un plan d'expériences uniforme sur l'espace de conception sans privilégier de zone spécifique, aucun comportement particulier de la variable d'intérêt n'étant *a priori* connu.

Cependant, une loi de distribution purement aléatoire peut générer des points d'expériences groupés nuisant à la représentativité de l'espace de conception. Nous pouvons utiliser une méthode pseudo-aléatoire, telle que l'hypercube latin (ou LHS pour *Latin Hypercube Sampling*). Cette méthode est illustrée par la figure 2.24, pour un problème à deux variables.

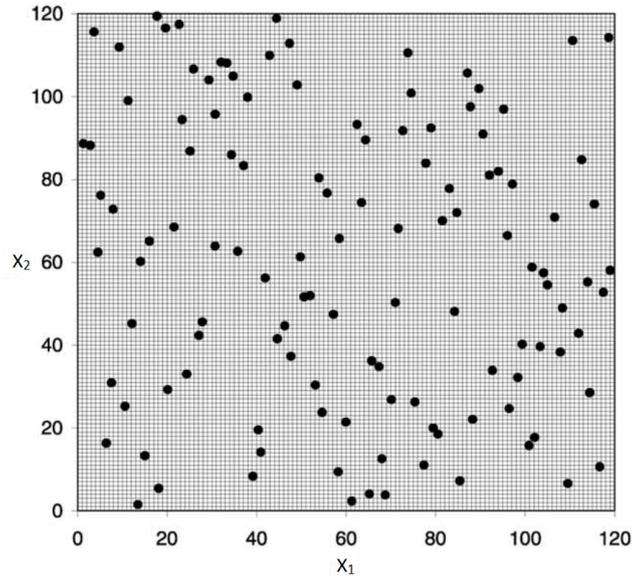


FIGURE 2.24 – Exemple d'un plan de type hypercube latin

L'intervalle de définition de chaque variable est divisé en autant d'intervalles que l'on souhaite de points d'expérience : pour un problème à p variables et n points d'expérience, l'espace de conception est donc divisé en p^n subdivisions. Les points sont choisis aléatoirement à l'intérieur de ces subdivisions. Ceci permet de représenter chaque variable de manière homogène sur tout son intervalle de variation, et ainsi d'obtenir une couverture de tout l'espace de conception.

Toutefois, un échantillonnage par hypercube latin ne garantit pas une couverture homogène de l'espace de conception, mais évite seulement que les points d'expérience ne soient trop groupés et que la variabilité de chaque variable de contrôle soit exploitée pleinement. Afin de s'assurer d'une répartition satisfaisante des points d'expérience dans l'espace de conception, une étape d'optimisation d'un LHS peut être ajoutée, pour construire un *Optimal Space Filling design*. Audze et Eglais proposent par exemple un critère d'optimisation des plans d'expériences [45]. Leur démarche repose sur les principes suivants :

- Le nombre de subdivisions des intervalles de variations des variables de contrôle est identique au nombre de points d'expérience souhaités. Il n'y a donc qu'un seul point d'expérience dans chacun de ces intervalles (cette condition est la même que pour l'hypercube latin).
- Les points d'expérience sont distribués de plus uniformément possible dans l'espace de conception. On cherche alors à minimiser la quantité suivante :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{L_{ij}^2} \rightarrow \min \quad (2.24)$$

Où L_{ij} est la distance entre les points d'expérience i et j .

Différents critères d'optimisation existent : Ansys propose par exemple de minimiser la distance entre les points (de manière similaire à Audze-Englais) ou de maximiser le déterminant de la matrice de covariance des points d'expérience pour minimiser les incertitudes liées aux zones de l'espace non représentées par le plan d'expériences [46]. Un plan d'expériences de type LHS optimisé est illustré en figure 2.25.

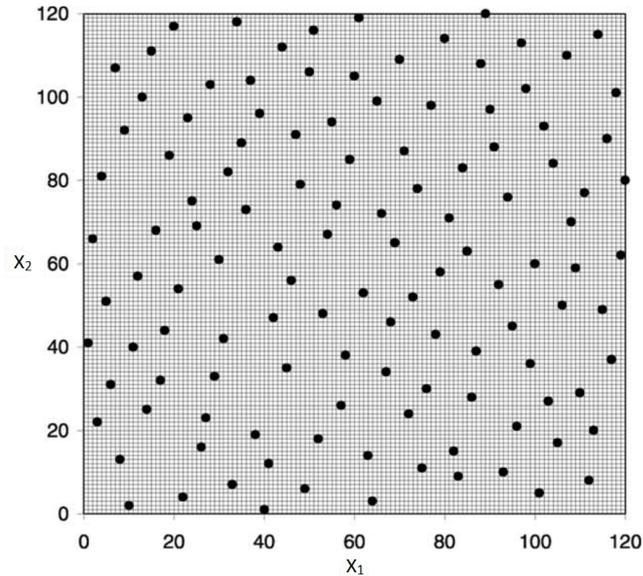


FIGURE 2.25 – Exemple d'un plan de type hypercube latin optimisé

Il apparaît clairement que ce type de méthode assure une bonne homogénéité de la distribution des points dans l'espace de conception, en plus de réduire encore les groupements de points d'expérience. C'est cette méthode de génération de plans d'expériences qui sera exploitée dans la suite des travaux, en raison de sa bonne répartition des points d'expérience dans l'espace de conception, pour un surcoût de calcul négligeable. Le critère d'optimisation du plan d'expériences choisi permet de minimiser (au sens des moindres carrés) la somme des écarts entre les points d'une distribution donnée et une distribution parfaitement uniforme (les résidus, c.f. section 2.5.2.3), en imposant une moyenne nulle de ces différences. De cette façon, une distribution uniforme est générée et le plan d'expériences couvre l'espace de conception de façon optimale.

L'inconvénient majeur de ces plans optimisés est l'impossibilité d'ajouter des points après une première construction du plan d'expériences, en raison de l'étape d'optimisation (qui ne peut pas prendre un compte un ajout ultérieur de données). Le nombre de points d'expérience doit être défini avant sa construction.

Une fois le plan d'expériences généré et les calculs associés à chaque point d'expérience réalisés, les données ainsi obtenues sont utilisées pour construire une surface de réponse : une approximation de la relation mathématique recherchée. La section suivante introduit le concept de surface de réponse ainsi que les critères permettant d'évaluer sa validité.

2.5.2.3 Construction et validation de la surface de réponse

L'objectif premier d'une surface de réponse est d'approcher au mieux la relation étudiée. Pour ce faire, des indicateurs de qualité existent et caractérisent les similarités ou différences entre l'approximation et les données issues du plan d'expériences, qui représentent la relation "vraie". Sélectionner une surface de réponse consiste donc à construire

des approximations, dont le type est intuité à partir de l'observation des données brutes, puis à les comparer grâce à ces indicateurs de qualité.

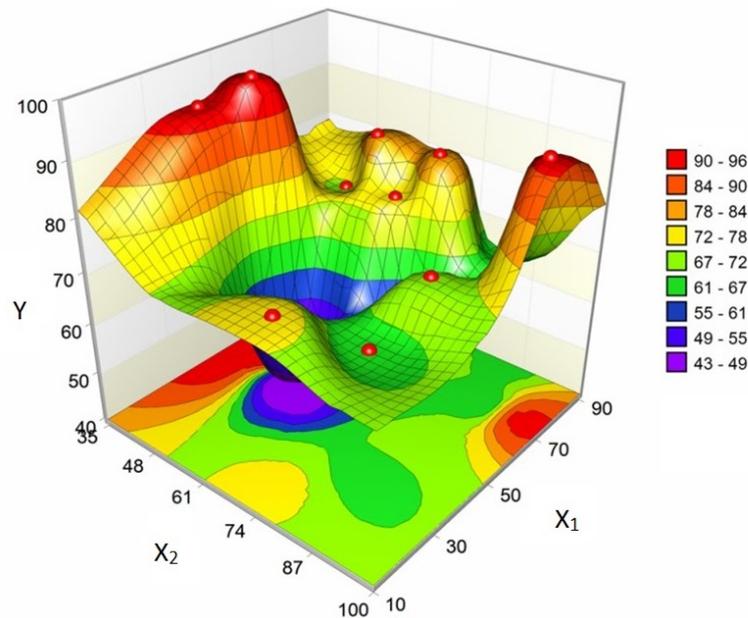


FIGURE 2.26 – Exemple d'une surface de réponse avec courbe isovaleur et extrema locaux

La désignation "surface de réponse" fait référence à la représentation tridimensionnelle traditionnellement utilisée pour représenter la variation de la variable d'intérêt par rapport à deux variables de contrôle, tel qu'illustré par la figure 2.26. Dans le cas d'un problème comportant plusieurs variables de contrôle, cette représentation est donc partielle.

D'un point de vue mathématiques, une surface de réponse est une régression, qui peut-être simple ou multiple (c'est-à-dire comportant respectivement une ou plusieurs variables explicatives) et de forme linéaire ou polynomiale (les plus couramment utilisées), logarithmique, exponentielle, trigonométrique ou toute autre opérateur mathématique. Les coefficients de ces régressions sont appelés les **paramètres de régression** et sont typiquement calculés en minimisant la somme des carrés des différences entre un point expérimental et son équivalent issu du modèle [40].

Pour comparer les surfaces de réponse, on utilise des indicateurs. Nous nous concentrons sur les indicateurs propres aux variables quantitatives². D'autre part, il est bien évident que des erreurs peuvent être commises en amont de l'analyse par surfaces de réponse (par exemple dans le protocole de mesure), mais on ne s'intéressera ici qu'aux écarts entre un modèle et les observations grâce auxquelles celui-ci a été établi.

La somme des carrés des résidus (SCR)

Un résidu est la différence entre la distribution de la variable d'intérêt et l'approximation de cette distribution fournie par le modèle. Pour une série de n expériences y_i , de moyenne \bar{y} et approchée par \hat{y} , nous avons :

$$\text{SCR} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.25)$$

2. Par opposition aux variables qualitatives, pour laquelle les valeurs relevées ne représentent pas une quantité mais une catégorie ou une modalité (par exemple, le caractère vrai ou faux d'une propriété, la validation ou non d'un critère de sélection), les variables quantitatives reflètent une notion de grandeur (une propriété physique telle que la masse, aussi bien que le nombre de sommets d'un volume).

La somme des carrés des résidus, décrite par l'équation 2.25, est donc une accumulation de ces différences : plus elle est élevée, moins le modèle est bon. Comme on mesure des carrés, l'importance des grandes erreurs est majorée : un modèle très fidèle à l'exception de quelques points où la différence avec l'expérience est forte renvoie donc une SCR plus important qu'un modèle globalement moins proche des observations mais plus cohérent avec la tendance globale.

L'erreur quadratique moyenne (EQM)

C'est la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre la prévision et l'observation :

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1} \quad (2.26)$$

Avec n le nombre d'observations (de points d'expérience) et p le nombre de paramètres de régression à estimer. Le nombre $n - p - 1$ est le nombre de degré de libertés du système.

Dans le cas d'une régression linéaire (simple ou multiple), c'est la valeur que l'on cherche à minimiser. La méthode des moindres carrés sur laquelle s'appuient ces régressions est fondée sur la nullité des résidus, ce qui n'est pas nécessairement le cas de la moyenne de leurs carrés. L'erreur quadratique moyenne est en fait la variance résiduelle, c'est-à-dire la variance non expliquée par le modèle (c.f. décomposition de la variance dans la méthode ANOVA [47]).

Remarque : La SCR autant que l'EQM doivent être minimisés. Une faible EQM associée avec une SCR importante signifie que les résidus se compensent. Le modèle capture la tendance globale mais des variations locales nuisent à sa fidélité par rapport aux données d'expérience, ce qui peut signifier qu'il n'est pas adéquat.

Le coefficient R^2

Le coefficient de détermination R^2 est un moyen simple et efficace de quantifier l'adéquation entre un modèle issu d'une régression linéaire (simple ou multiple) et la série de données qu'il modélise. Son expression est donnée par l'équation 2.27 :

$$R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT} \quad (2.27)$$

Avec :

$$SCT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.28)$$

Le R^2 se définit donc comme la part de variance expliquée par le modèle dans la variance totale de la série de donnée modélisée. Il est, par définition, compris entre 0 et 1.

Le R^2 ajusté

Le coefficient R^2 ajusté, noté R_{adj}^2 est un dérivé du R^2 simple qui prends en compte le nombre de variables du problème. Le principal défaut du R^2 simple est en effet de croître

avec le nombre de variables explicatives, ce qui fausse l'appréciation de la qualité du modèle et peut inciter à ajouter des variables de contrôles pour obtenir un meilleur modèle. Or, un excès de variables produit des modèles peu robustes et c'est la raison pour laquelle on définit ce coefficient :

$$R_{adj}^2 = R^2 - \frac{p(1 - R^2)}{n - p - 1} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1} \quad (2.29)$$

Avec n le nombre d'observations (de points d'expérience) et p le nombre de paramètres de régression à estimer. Cet indicateur est plus intéressant d'un point de vue statistique que le R^2 , mais également plus complexe à interpréter : il peut même être négatif et la signification de sa valeur quant à la qualité d'un modèle varie en fonction de la nature de celui-ci.

Étude des résidus

Un modèle ne peut être considéré satisfaisant si les résidus et les variables explicatives ne sont pas indépendants. Pour vérifier cette indépendance, on a souvent recours à une vérification graphique, à l'aide d'un histogramme des résidus exprimés pour chaque variable explicative (c.f. figure 2.27). Si les résidus sont distribués de manière aléatoire autour de l'axe des abscisses des observations (les variables explicatives), alors on peut considérer qu'il n'existe pas de relation entre résidus et observations. Une tendance ou une forme peut signifier une dépendance et donc un problème au niveau du modèle.

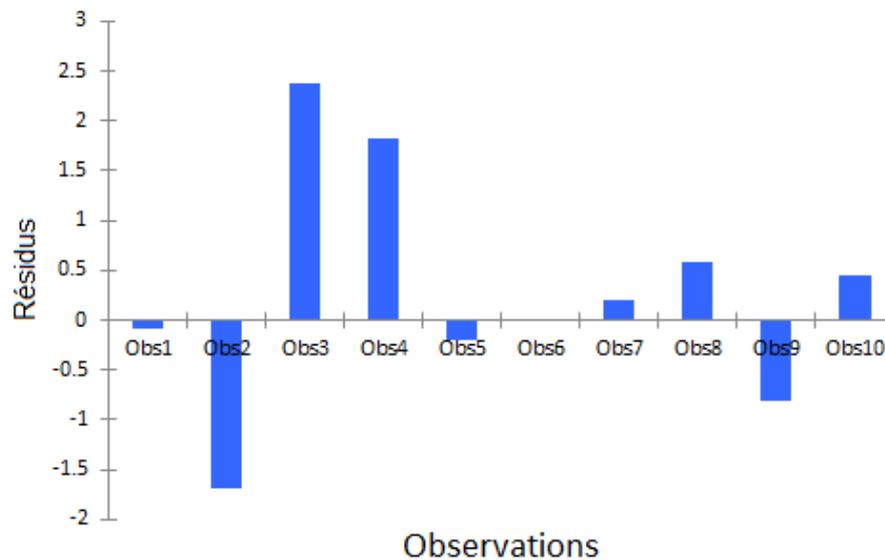


FIGURE 2.27 – Exemple d'histogramme de résidus centrés réduits en fonction des observations

Dans le cas d'une régression linéaire, on s'intéresse aux résidus centrés réduits. Pour un couple observation-prédiction dont r est le résidu, le résidu centré réduit est défini de la façon suivante :

$$r_s = \frac{r}{\sqrt{\text{EQM}}} \quad (2.30)$$

L'échelle verticale de l'histogramme des résidus centrés réduits est exprimée en termes de sigma, c'est-à-dire l'écart-type des résidus. Les résidus centrés réduits doivent être distribués suivant une loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$. Cela signifie qu'au moins 95% des résidus doivent

se trouver dans un intervalle de $\pm 3\sigma$. Toute valeur en dehors de cet intervalle est révélatrice d'une donnée dont la validité est suspecte.

Graphe des prédictions-observations

Un autre indicateur graphique de qualité d'un modèle est le graphe des observations exprimées en fonction des prédictions du modèle. La figure 2.28 en présente deux exemples (issus de deux analyses différentes).

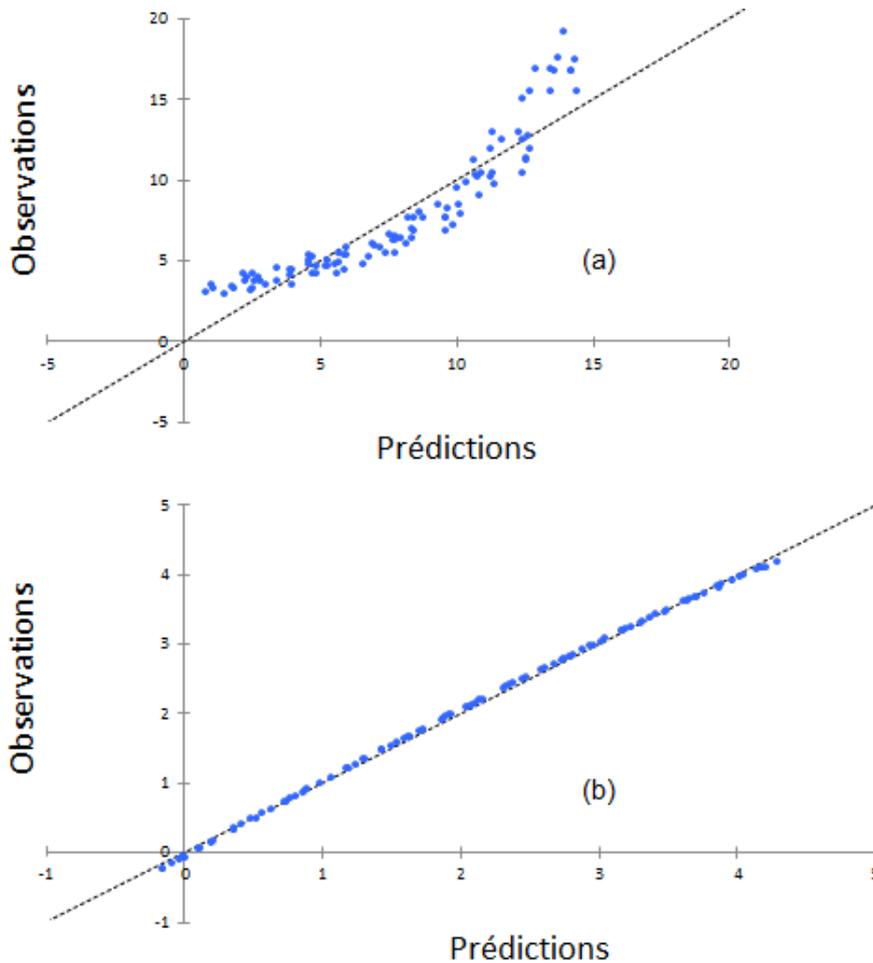


FIGURE 2.28 – Exemples de graphes prédictions-observations

Pour un modèle idéal, les points sont tous sur la bissectrice. Le modèle représenté par le graphe de la figure 2.28-(a) est donc mauvais, tandis que celui représenté par la figure 2.28-(b) est quasi idéal.

2.6 Conclusion

Afin de définir un indicateur de vieillissement permettant de caractériser l'état de santé du joint d'assemblage, nous nous sommes intéressés aux grandeurs susceptibles d'être adaptées à ce suivi. Les travaux préalablement menés sur des problématiques similaires mettent en évidence que les paramètres électriques ne conviennent pas, soit en raison d'une difficulté à corrélérer leur évolution avec l'endommagement, soit en raison de l'influence d'autres effets liés aux mécanismes de vieillissement qui perturbent cette évolution [9, 10]. De plus, les dérives de paramètres électriques interviennent après l'amor-

çage des mécanismes de défaillance et ne permettent donc pas de les anticiper. Ces défaillances étant majoritairement d'origine thermomécanique, ce sont des paramètres de la même nature que nous avons étudié plus en détail.

Cet axe de recherche nous a conduit à nous intéresser au comportement des matériaux de l'assemblage au cours des cycles d'utilisation. Une présentation des lois élémentaires régissant le comportement des matériaux permet d'appréhender la nature des différents phénomènes rencontrés lors de leur sollicitation, et donc lors du vieillissement en fatigue intervenant au court des cycles d'usage d'un module de puissance. La notion d'énergie de déformation a également été introduite, et reliée à la courbe d'hystérésis associée à un chargement cyclique. Ces concepts constituent la base d'une approche de suivi d'endommagement mécanique.

Les modèles les plus couramment exploités pour prédire la durée de vie d'un assemblage ont par la suite été comparés. Les modèles de type Coffin-Manson ou Engelmaier, qui reposent sur la déformation élastique et la contrainte, ne permettent pas de prendre en compte les effets liés à la viscosité des matériaux. Ceci vient du fait que ces modèles ont été développés pour étudier des alliages d'acier et d'aluminium ne manifestant pas de tels comportements visqueux. Ce n'est donc pas leur performances intrinsèques qui nous ont conduit à les écarter, mais simplement le constat qu'ils ne sont pas réellement adaptés à des applications faisant intervenir des matériaux au comportement visqueux.

À l'inverse de ces derniers modèles et leurs dérivés, le modèle de Darvaux repose sur une approche énergétique. Il relie l'incrément de travail de déformations plastiques au nombre de cycles avant défaillance, ce qui présente l'avantage d'intégrer tous types de comportements mécaniques, qui font défaut aux modèles en déformation et contrainte. Toutefois, ce modèle est construit par ajustement de coefficients empiriques par rapport à des séries de données expérimentales. Outre le besoin de réaliser des essais pour obtenir ces coefficients dénués de sens physique, la validité du modèle est fortement dépendante de la qualité et de la quantité de ces données expérimentales, sans pour autant que cet impact soit caractérisé par la bibliographie.

Le modèle de Pan exploite aussi l'énergie de déformation, et introduit une hypothèse intéressante, notamment dans le cadre des objectifs du projet CAPTIF. Il repose sur le principe que l'énergie de déformation associée aux déformations plastiques est une grandeur qui s'accumule au cours des sollicitations cycliques du matériau jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau critique, une saturation du matériau, entraînant sa rupture et donc la défaillance de l'assemblage. Ce seuil de saturation est décrit comme proportionnel au produit du nombre de cycle a défaillance et du taux de variation temporel de l'énergie de déformation plastique. Cette relation permet donc, en considérant le seuil d'énergie critique connu, de calculer combien de cycles peut endurer un matériau soumis à un accroissement de l'énergie de déformation donné.

Ce n'est cependant pas un nombre de cycles avant défaillance que nous cherchons à déterminer, mais plutôt l'approche d'un niveau d'endommagement critique avant l'apparition d'une défaillance. En reprenant l'hypothèse du modèle de Pan et l'idée générale derrière ce modèle, il est possible d'imaginer une méthode reposant sur le suivi de l'évolution de l'énergie de déformation plastique au cours des cycles qui permettrait d'anticiper l'atteinte du seuil critique d'énergie de déformation du matériau. C'est pour cette raison que le choix d'utiliser la densité d'énergie de déformation plastique comme indicateur de suivi de vieillissement a été effectué.

L'inconvénient majeur de la densité de déformation est la complexité de son expression. En effet, la loi de comportement du matériau qui compose le joint d'assemblage

(que ce soit une brasure ou de l'argent fritté) n'admet pas d'expression analytique simple, mais est approximée par un modèle. Il est donc impossible de calculer directement sa valeur dans le joint d'assemblage à partir de mesures de paramètres thermomécaniques, d'autant plus qu'elle n'est pas nécessairement homogène dans tout le joint d'assemblage. Deux problématiques se posent alors : quelle est la distribution de la densité d'énergie de déformation dans le joint d'assemblage et où est-il pertinent de l'observer? Et comment déterminer sa valeur à partir des informations de mesures effectuées?

La réponse à notre première interrogation a été obtenue à l'aide d'une première simulation numérique de cyclage thermique, pour étudier la distribution de la densité d'énergie de déformation dans le joint. Dans ce but, une modélisation de l'assemblage a été mise en place grâce au logiciel d'analyse par élément finis Ansys. Les différentes hypothèses sur les matériaux et les conditions limites ont été présentées, et conduisent à l'établissement d'un modèle simplifié de l'assemblage, destiné à mettre en évidence l'évolution de la densité d'énergie de déformation plastique du joint d'argent fritté au cours des cycles de vie. Nous avons pu observer une accumulation marquée sur la périphérie de la puce, zone sur laquelle nous focaliserons la suite des travaux.

Pour répondre à la seconde interrogation, nous nous sommes proposés d'utiliser une analyse par surfaces de réponse. Cette méthode est un ensemble d'outils mathématiques ayant pour but de construire un lien entre une variable d'intérêt et un jeu de variables explicatives. Deux phases majeures la constituent : une première phase consiste à construire un plan d'expériences, une collection de données caractérisant l'évolution de la variable d'intérêt en fonction d'une série de variables explicatives. Les différentes méthodes de construction de plans d'expériences ont été présentées et l'approche la plus adaptée a été sélectionnée. La seconde phase consiste à modéliser la variable d'intérêt à l'aide des variables de contrôle, puis à évaluer la qualité et à comparer différents modèles pour déterminer l'approximation la plus fidèle aux données expérimentales.

Ce deuxième chapitre a posé les concepts et choix sur lesquels notre démarche s'appuie. Le chapitre suivant a pour objectif la mise en application des outils présentés afin de construire le lien entre notre indicateur d'endommagement et les grandeurs mesurées par les capteurs intégrés. Nous définirons les paramètres d'un premier plan d'expériences à l'aide duquel nous étudierons les corrélations entre ces mesures et la grandeur de suivi, et déterminerons laquelle de ces mesures est la plus adaptée. Cette première étude sera également le moyen de s'assurer si l'information fournie par le capteur est suffisante pour caractériser l'évolution de l'indicateur de suivi, ou si la prise en compte d'autres paramètres du problème est nécessaire à la construction d'un modèle de suivi efficace. Un second plan d'expériences aura pour objectif d'exploiter ces conclusions et de concrétiser la démarche de construction du modèle. Enfin, nous finaliserons notre démarche en nous intéressant à l'exploitation de ce modèle pour réaliser un suivi de vieillissement dans le cas d'un assemblage soumis à un profil de mission quelconque.

2.7 Références

- [1] J. Lemaitre, J.-L. Chaboche, A. Benallal, and R. Desmorat. *Mécanique des matériaux solides-3eme édition*. Dunod, 2009. 32
- [2] E.-J. Donth. *The glass transition : relaxation dynamics in liquids and disordered materials*, volume 48. Springer Science & Business Media, 2013. 34
- [3] H. Liebowitz. *Fracture of Metals : An Advanced Treatise*. Elsevier, 2013. 34
- [4] T. Šmida and V. Magula. Brittle to ductile transition—an engineer’s point of view. *Materials & Design (1980-2015)*, 54 :582–586, 2014. 34
- [5] C. T. Lachowicz. Calculation of the elastic–plastic strain energy density under cyclic and random loading. *International journal of fatigue*, 23(7) :643–652, 2001. 35
- [6] K. M. Golos. Total strain energy density parameter for fatigue analysis. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 80(S2) :469–470, 2000. 35
- [7] F. Ellyin. Cyclic strain energy density as a criterion for multiaxial fatigue failure. In *ICBMFF2*, 1985. ix, 36, 37, 41
- [8] Y. Duyi and W. Zhenlin. A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue. *International Journal of Fatigue*, 23(8) :679–687, 2001. 37
- [9] Y. Belmehdi. *Contribution à l’identification de nouveaux indicateurs de défaillance des modules de puissance à IGBT*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2011. 37, 64
- [10] E. Marcault. *Contribution à l’intégration d’un indicateur de vieillissement lié à l’état mécanique de composants électroniques de puissance*. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2012. 37, 64
- [11] P. Gaiser, M. Klingler, and J. Wilde. Fracture mechanical modeling for the stress analysis of dbc ceramics. In *Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2015 16th International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2015. 38
- [12] T. J. Kilinski, J. R. Lesniak, and B. I. Sandor. Modern approaches to fatigue life prediction of smt solder joints. In *Solder Joint Reliability*, pages 384–405. Springer, 1991. 38, 39
- [13] N. E. Dowling. *Mechanical behavior of materials : engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Pearson, 2012. 38
- [14] S. Choi, J. G. Lee, F. Guo, T. R. Bieler, K. N. Subramanian, and J. P. Lucas. Creep properties of sn-ag solder joints containing intermetallic particles. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 53(6) :22–26, 2001. 39
- [15] X. Li, G. Chen, L. Wang, Y.-H. Mei, X. Chen, and G.-Q. Lu. Creep properties of low-temperature sintered nano-silver lap shear joints. *Materials Science and Engineering : A*, 579 :108–113, 2013. 39

- [16] D. Klahn, A. K. Mukherjee, and J. E. Dorn. Strain-rate effects. Technical report, California Univ., Berkeley. Lawrence Radiation Lab., 1970. 39
- [17] G. M. Swallowe. *Strain Rate Effects*, pages 214–218. Springer Netherlands, Dordrecht, 1999.
- [18] M. SEPE. The strain rate effect, 2011. 39
- [19] J. H. L. Pang, T.-I. Tan, and S. K. Sitaraman. Thermo-mechanical analysis of solder joint fatigue and creep in a flip chip on board package subjected to temperature cycling loading. In *Electronic Components & Technology Conference, 1998. 48th IEEE*, pages 878–883. IEEE, 1998. 39
- [20] R. Darveaux. Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation and fatigue life prediction. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF ELECTRONIC PACKAGING*, 124(3) :147–154, 2002. 40
- [21] M. G. Bevan and M. Wittig. Complex fatigue of soldered joints-comparison of fatigue models. In *Electronic Components and Technology Conference, 1997. Proceedings., 47th*, pages 127–133. IEEE, 1997. 40
- [22] P. M. Hall and W. M. Sherry. Materials, structures and mechanics of solder joints for surface-mount microelectronics technology. In *Proc. Lectures 3rd Int. Conf. Tech. De Connexion en Electronique*. Welding Society, Fellbach, 1986. 40
- [23] T.-Y. Pan. Critical accumulated strain energy (case) failure criterion for thermal cycling fatigue of solder joints. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF ELECTRONIC PACKAGING*, 116 :163–163, 1994. 40
- [24] G. C. Sih and B. Macdonald. Fracture mechanics applied to engineering problems-strain energy density fracture criterion. *Engineering Fracture Mechanics*, 6(2) :361–386, 1974. 40
- [25] C. E. Feltner and J. D. Morrow. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. *Journal of Basic Engineering*, 83(1) :15–22, 1961. 41
- [26] F. Le Henaff. *Contribution à l'étude, la mise en oeuvre et à l'évaluation d'une solution de report de puce de puissance par procédé de frittage de pâte d'argent à haute pression et basse température*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2014. 43
- [27] T. Youssef. *Modélisation multiphysique d'un assemblage de puissance haute température destiné à l'environnement aéronautique*. PhD thesis, Bordeaux, 2016.
- [28] M. Barrière. *Assemblages de puissance innovants haute température - haute tension pour composants Si dédiés aux applications embarquées aéronautiques, automobiles et ferroviaires*. PhD thesis, Bordeaux, 2017. 43
- [29] Michael Pecht, Rakish Agarwal, F Patrick McCluskey, Terrance J Dishongh, Sirius Javadpour, and Rahul Mahajan. *Electronic packaging materials and their properties*. CRC press, 1998. xiii, 45, 47, 48

- [30] L. Anand. Constitutive equations for the rate-dependent deformation of metals at elevated temperatures. *Journal of Engineering Materials and Technology(Transactions of the ASME)*, 104(1) :12–17, 1982. 46
- [31] S. B. Brown, K. H. Kim, and L. Anand. An internal variable constitutive model for hot working of metals. *International journal of plasticity*, 5(2) :95–130, 1989.
- [32] S. Koric and B. G. Thomas. Thermo-mechanical models of steel solidification based on two elastic visco-plastic constitutive laws. *journal of materials processing technology*, 197(1) :408–418, 2008. 46
- [33] D. Yu, X. Chen, G. Chen, G. Lu, and Z. Wang. Applying anand model to low-temperature sintered nanoscale silver paste chip attachment. *Materials & Design*, 30(10) :4574–4579, 2009. xiii, 47
- [34] G. Dong, G. Lei, X. Chen, K. Ngo, and G.-Q. Lu. Edge tail length effect on reliability of dbc substrates under thermal cycling. *Soldering & Surface Mount Technology*, 21(3) :10–15, 2009. xiii, 48
- [35] Kyocera. Amb cu-bonded ceramic substrates for power modules. xiii, 48
- [36] M. Pecht. *Quality conformance and qualification of microelectronic packages and interconnects*. John Wiley & Sons, 1994. 50
- [37] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escalera. Response surface methodology (rsm) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5) :965–977, 2008. 54
- [38] P. B. Bochev and M. D. Gunzburger. *Least-squares finite element methods*, volume 166. Springer Science & Business Media, 2009. 54
- [39] D. C. Montgomery and R. H. Myers. Response surface methodology. *Design and analysis of experiments*, pages 445–474, 1995. 57
- [40] G. E. P. Box, N. R. Draper, et al. *Empirical model-building and response surfaces*, volume 424. Wiley New York, 1987. 61
- [41] A. J. G. Schoofs. Experimental design and structural optimization. In *Structural optimization*, pages 307–314. Springer, 1988.
- [42] R. H. Myers and D. C. Montgomery. *Response surface methodology : Process and product optimization using designed experiments*. Wiley New York, 1995.
- [43] D. C. Montgomery. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, 2017. 57
- [44] Ch. Wu and J. Chen. Sampling and experimental design. *Department of Statistics and Actuarial Science University of Waterloo, Belgium*, 2006. 58
- [45] P. Audze and V. Eglais. New approach for planning out of experiments. *Problems of dynamics and strengths*, 35 :104–107, 1977. 59
- [46] Ansys Inc. Documentation officielle. 60
- [47] G. R. Iversen and H. Norpoth. *Analysis of variance*. Number 1. Sage, 1987. 62

Chapitre 3

Modélisations pour le suivi de vieillissement

Sommaire

2.1	Notions de mécanique : lois de comportement des matériaux	30
2.1.1	Matériaux élastiques	30
2.1.2	Plasticité des matériaux	31
2.1.3	Viscosité, Fluage et relaxation	32
2.1.4	Ductilité, fragilité	33
2.1.5	Courbes d’hystérésis et énergie de déformation	34
2.2	Définition et choix d’un indicateur de vieillissement	37
2.2.1	Généralités	37
2.2.2	Introduction à la fatigue mécanique	38
2.2.3	Modèle de Coffin-Manson	38
2.2.4	Modèle de Engelmaier	39
2.2.5	Modèle de Darveaux	39
2.2.6	Modèle de Pan : l’énergie de déformation	40
2.2.7	Bilan	41
2.3	Définition du véhicule de test	42
2.3.1	Assemblage étudié	42
2.3.2	Modèle thermomécanique associé	43
2.4	Positionnement et intégration des capteurs	49
2.4.1	Distribution de la DED au cours du vieillissement	50
2.4.2	Contraintes d’intégration des capteurs sur l’assemblage	51
2.5	Construction du lien entre mesure et indicateur	52
2.5.1	Calcul de la densité d’énergie de déformation plastique	52
2.5.2	L’analyse par surfaces de réponse	53
2.6	Conclusion	64
2.7	Références	67

3.1 Généralités sur la mise en place de la démarche

3.1.1 Rappels des objectifs

L'objectif du projet CAPTIF est de proposer une solution de suivi de vieillissement de module électronique de puissance afin de remplacer les traditionnelles méthodes de prédiction de durée de vie par une indication de durée de vie résiduelle. Cette transition repose sur l'utilisation de capteurs embarqués et de méthodes de traitement des données tout au long de la vie du module pour caractériser son endommagement lors de son fonctionnement.

Ce chapitre présente les étapes de mise en place des outils et concepts introduits au chapitre précédent et qui conduisent à une proposition de solution à cette problématique. À l'aide d'une modélisation par élément finis et d'une analyse par surface de réponse, nous cherchons à construire un modèle décrivant le lien entre la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'assemblage et les mesures issues de capteurs localisés au plus proche de l'assemblage. Ce lien fonctionnel doit pouvoir être exploité pour caractériser le potentiel d'usage restant du module en calculant la DED qui s'accumule dans l'assemblage à partir des données de mesures.

3.1.2 Analyse par surface de réponse pour le suivi de vieillissement

Nous cherchons à relier entre elles les évolutions de deux grandeurs variant au cours du vieillissement du module : la mesure de nos capteurs et la densité d'énergie de déformation plastique du joint d'assemblage (ou DED). Pour ce faire, nous avons choisi la méthode des surfaces de réponse, introduite dans la section 2.5.2.3.

Cette collection d'outils mathématiques permet en effet d'approximer une relation fonctionnelle dont l'expression analytique est complexe, en s'appuyant sur des données d'expériences faisant intervenir cette relation fonctionnelle. Le cas de la relation entre la densité d'énergie de déformation du joint d'attache et la mesure de capteur¹ à laquelle celui-ci est soumis se prête bien à l'application de cette technique en raison de sa complexité et des nombreux couplages thermomécaniques présents, qui empêchent l'utilisation d'une expression analytique.

Une analyse par surface de réponse comporte cinq étapes majeures. La première de ces étapes consiste à identifier les variables du problème : sur quelle(s) variable(s) agit-on pour étudier le comportement du système et quelle(s) variable(s) souhaite-t-on étudier ?

En général, la variable avec laquelle on souhaite calculer la variable d'intérêt (par le biais d'une surface de réponse) est connue. C'est donc celle dont on va utiliser la variation pour définir un plan d'expériences. Les données d'expériences sont ensuite obtenues en utilisant la relation entre ces deux variables (via une expérience ou une simulation), relation que l'on veut modéliser par une surface de réponse. La surface de réponse constitue donc une extrapolation des données d'expériences (ou de simulations) sur le domaine de variation des variables du plan d'expérience considéré. Ce principe est illustré par la figure 3.1.

1. Cette dénomination générique est volontaire, car nous n'avons pas déterminé si une mesure de température ou de déformation sera utilisée, et la nature de cette mesure n'est pas censée avoir une influence. Il pourrait s'agir d'un autre type de mesure (par exemple des mesures électromagnétiques, telles qu'étudiées par le laboratoire LGP, partenaire du projet CAPTIF) sans que cela n'ait d'influence sur la façon dont nous appliquons la méthodologie. Il s'agit d'un paramètre de l'étude comme un autre.

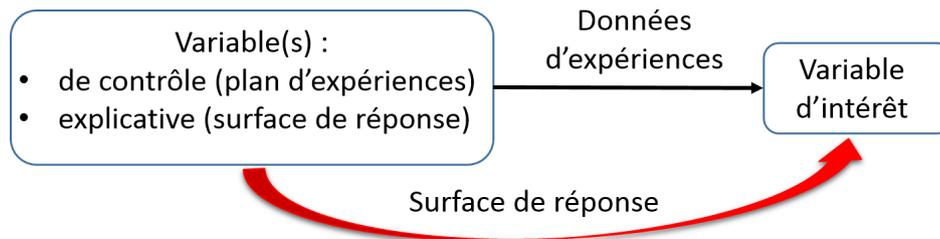


FIGURE 3.1 – Méthode des surfaces de réponse classique

Pour notre cas d'application, la variable d'intérêt est la DED. Toutefois, la variable que nous souhaitons utiliser pour remonter à la DED est la mesure donnée par un capteur et on ne peut pas agir directement sur cette variable pour solliciter le système. Elle dépend d'une autre variable : la température rencontrée par l'assemblage². Par conséquent, puisque les températures caractéristiques³ de cyclage influent sur cette mesure de capteur, ce sont ces grandeurs que nous ferons varier pour constituer le plan d'expérience. La variable explicative dans le modèle de calcul de la DED sera donc différente des variables du plan d'expériences. Ceci est illustré par la figure 3.3.

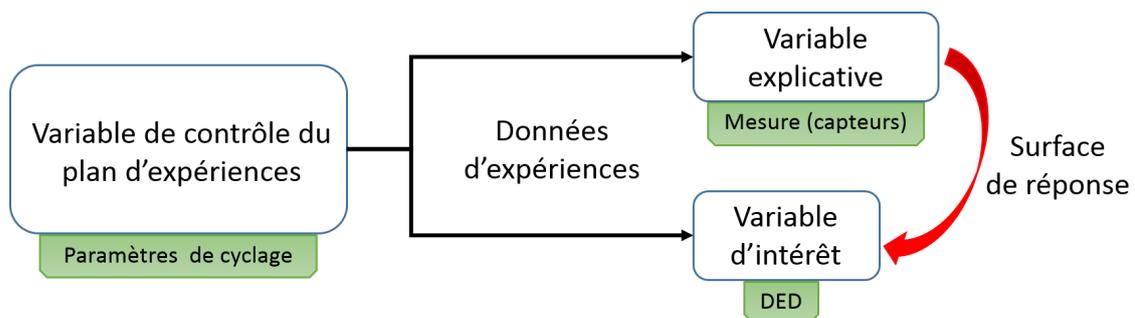


FIGURE 3.2 – Méthode des surfaces de réponse adaptée à notre application

Lors d'un suivi de vieillissement, la surface de réponse est utilisée pour calculer la DED à partir des relevés de mesure des capteurs embarqués (c.f. figure 3.3). Les mesures issues des capteurs constituent les données d'entrée du modèle (construit à l'aide de la méthode des surfaces de réponse) qui permet de calculer la valeur de l'indicateur de vieillissement.

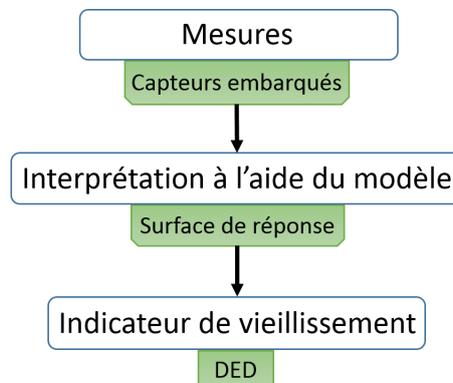


FIGURE 3.3 – Exploitation d'une surface de réponse pour le suivi de vieillissement

2. L'hypothèse que la température de l'assemblage est à l'origine de son vieillissement a été introduite au chapitre précédent.

3. Nous faisons ici référence à la température minimale et maximale d'un cycle.

Pour une mise en application réelle, l'analyse par surface de réponse ne se suffit pas à elle-même. En complément des modélisations, il est nécessaire de déterminer une valeur maximale admissible pour l'indicateur de vieillissement : une fois ce seuil atteint, l'assemblage présente un important risque de défaillance et doit être remplacé. Sa mise en place est donc complexe et nécessite d'être adaptée pour chaque assemblage (modélisation et détermination du seuil critique), puisque chaque élément a un impact sur l'évolution de la DED.

3.1.3 Moyennage des résultats et maillage

Les grandeurs dont nous suivons l'évolution sont calculées lors de la résolution du modèle par le code de calcul d'Ansys. Comme nous l'avons mentionné en section 2.2.5, les résultats obtenus sont dépendants du maillage utilisé pour la résolution. Afin de normaliser ces résultats et ainsi les rendre indépendants du maillage utilisé, R. Darveaux propose de moyennner la grandeur étudiée sur le volume des éléments observés [1]. Dans le cas de la DED, une valeur moyenne sur plusieurs éléments de maillage peut être calculée de la façon suivante :

$$\overline{DED} = \frac{\sum_e DED_e V_e}{V} \quad (3.1)$$

Où :

- \overline{DED} est la densité d'énergie de déformation plastique moyen dans le volume V étudié
- DED_e est la densité d'énergie de déformation plastique dans un élément du volume étudié
- V_e est le volume de cet élément
- V est le volume total étudié

Le calcul de la moyenne des résultats sur plusieurs éléments de maillage permet de limiter l'impact des artefacts numériques sur les résultats finaux. Les valeurs de la DED et de la déformation traitées dans la suite des travaux sont obtenues en appliquant ce moyennage (la température étant uniforme, puisque imposée telle quelle lors du cyclage passif). En tenant compte des observations réalisées dans la section 2.4.1 sur la distribution de la DED dans le joint d'assemblage, nous avons considéré la DED moyennée sur un groupe de huit éléments dans l'épaisseur du joint. Ces éléments et leur position sont représentés en figure 3.4.

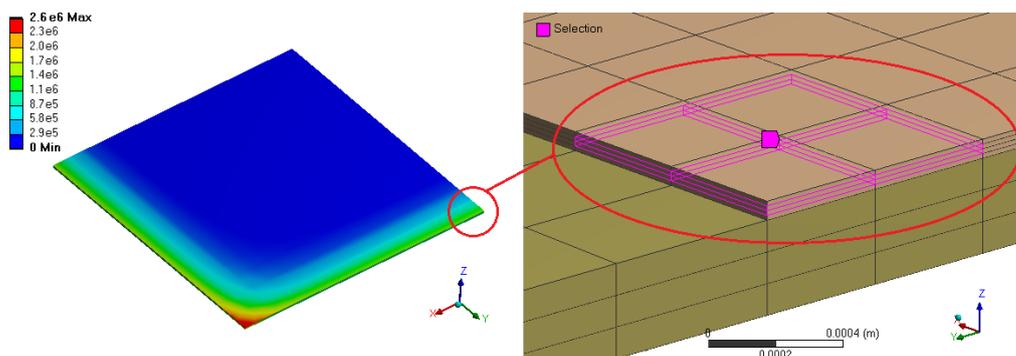


FIGURE 3.4 – Éléments utilisés pour le calcul de la DED moyenne

De la même manière, une sélection de huit éléments dans l'épaisseur de la puce (et à la verticale immédiate de ceux représentés en figure 3.4) est utilisée pour moyenner les valeurs de déformations fournies par le modèle numérique de l'assemblage.

3.1.4 Prise en compte du procédé d'assemblage

Dans le chargement présenté en section 2.3.2.4, et utilisé pour une première étude de la distribution de la DED dans le joint d'assemblage (c.f. 2.4.1), le procédé de frittage est représenté par l'application d'une pression et d'une chauffe à 250°C simultanés. Ce procédé introduit des contraintes résiduelles et une DED non nulle qu'il est intéressant de considérer, ne serait-ce que pour la comparer au niveau critique de la DED à défaillance.

Toutefois, d'un point de vue purement simulation, et en particulier lors de la réalisation d'un plan d'expériences, la répétition à l'identique et un grand nombre de fois d'une même simulation consomme des ressources sans pour autant fournir d'information nouvelle. C'est donc une perte de temps qu'il est préférable d'éviter. Pour cette raison, nous avons cherché à diviser en deux la simulation initiale de la façon suivante : une première phase, simulée une seule fois et à paramètres invariants, représentant le frittage et qui sert de point de départ pour la seconde phase, celle représentant les cycles dont les paramètres sont variables. Ceci nécessite un transfert de donnée entre deux simulations que Ansys ne permet pas.

Par conséquent, une simulation spécifique a été mise en place dans le but de contourner cette limitation. Son objectif est de vérifier que, en raison de l'invariance des coefficients du modèle d'Anand (c.f. 2.3.2.3) au cours du vieillissement du matériau, il est possible de découpler le procédé de fabrication et celui de vieillissement sans impacter la validité des résultats. En d'autres termes, nous voulons vérifier que pour un cycle donné, simuler le frittage puis le cyclage est équivalent à simuler le cyclage puis le frittage. D'un point de vue mathématique, cela revient à dire que la DED vérifie :

$$DED(t + \delta t) = DED(t) + DED(\delta t) \quad (3.2)$$

Et non pas :

$$DED(t + \delta t) = DED(t) + \alpha DED(\delta t) \quad (3.3)$$

Avec :

- $DED(\delta t)$, la DED accumulée durant l'instant élémentaire δt
- $DED(t)$, la DED accumulée jusqu'au temps t
- $DED(t + \delta t)$, la DED accumulée jusqu'au temps $t + \delta t$
- α , un coefficient quelconque (constant ou non)

Si cette hypothèse est validée, nous pourrions considérer le procédé de frittage comme une simple constante en terme de densité de déformation du joint d'assemblage, qui n'influe pas sur le vieillissement mais s'y additionne simplement. Afin de vérifier cela, une simulation est mise en place pour comparer l'évolution de la DED lorsque le frittage est réalisé avant le cyclage (cas normal), et lorsque le frittage est simulé après le cyclage (cas "décalé"). Ce dernier cas n'a pas de sens réel puisqu'il n'est pas possible de cycliser un assemblage avant le report de la puce. Son seul but est donc de montrer l'influence de la

position du procédé de frittage sur la valeur de la DED accumulée dans le joint d'assemblage. La figure 3.5 présente les chargements utilisés pour ces deux simulations et met en évidence leurs différences.

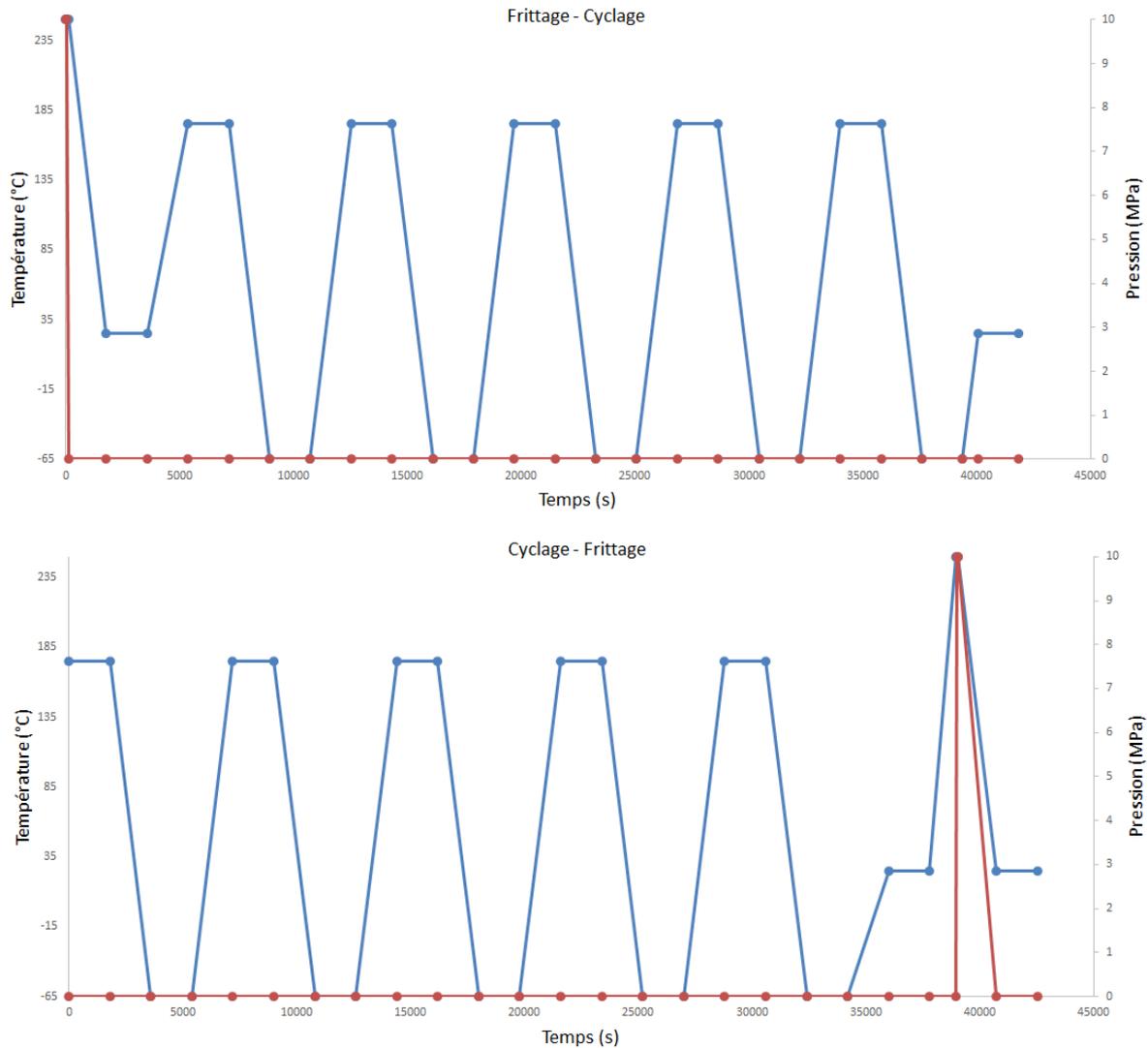


FIGURE 3.5 – Chargements utilisés dans les simulations comparatives

La figure 3.6 représente l'évolution de la DED, résultant des simulations, pour les deux chargements distincts de la figure 3.5.

Nous pouvons constater que ces deux courbes ont une valeur finale très proche. La différence observée est due au fait que dans le cas "décalé", l'assemblage subit une montée supplémentaire en température et en pression (respectivement de 25 à 175°C et de 0 à 10MPa, à partir de $t = 37800s$) pour atteindre les conditions de frittage. Cette montée est nécessaire pour la convergence du modèle (qu'il est impossible d'obtenir avec un chargement en échelon).

De plus, l'accroissement de la DED pour un cycle est identique dans les deux cas de chargement, et constant au cours des cycles. Ceci confirme donc que le modèle d'Anand ne tient pas compte de l'historique d'endommagement du joint d'assemblage et qu'il est possible de ne pas modéliser le procédé de frittage pour économiser du temps de calcul dans la suite de notre étude. Le chargement considéré est donc un cyclage thermique tel que présenté en section 2.3.2.4, sans l'étape initiale de frittage.

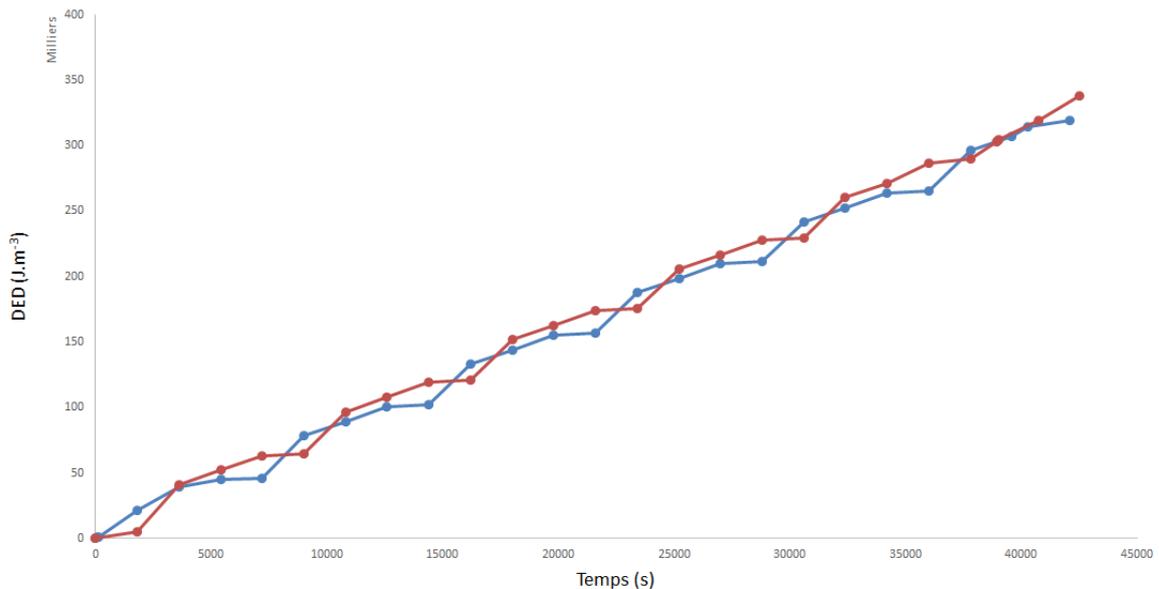


FIGURE 3.6 – Influence de l'ordre des opérations sur la DED finale

3.2 Première application

3.2.1 Paramètres du plan d'expériences

La méthode d'échantillonnage choisie (c.f. section 2.5.2.2) pour la construction de notre plan d'expériences est de type hypercube latin optimisé. Ce choix permet d'assurer une homogénéité de la répartition des points d'expérience dans l'espace de conception.

Comme nous l'avons mentionné dans la section 3.1.2, afin de générer des variations dans les données issues des capteurs (de température ou déformation), nous faisons varier les températures caractéristiques d'un cyclage passif. Les variables de contrôle du plan d'expériences sont donc la température minimale et maximale du cycle.

En prenant un intervalle de variation de $\pm 10\%$ autour des valeurs nominales de ces températures (respectivement -65°C et $+175^\circ\text{C}$, c.f. section 2.3.2.4), l'espace de conception est maintenu suffisamment réduit pour faciliter son observation. Si le besoin s'en faisait sentir, il pourrait être élargi pour augmenter la base de données sur laquelle la construction des surfaces de réponse s'appuie.

Afin d'être certain d'avoir suffisamment de donnée, et compte tenu de l'impossibilité de rajouter des points d'expérience *a posteriori* (en raison de la méthode d'échantillonnage choisie, c.f. 2.5.2.2), le nombre de points d'expérience est fixé à cent (le temps de calcul n'est pas critique pour cette preuve de concept). Il est parfaitement envisageable de réduire ce nombre pour économiser du temps de calcul, si la démarche se révèle fonctionnelle et que la validité des résultats n'est pas trop impactée. D'autre part, une quantité de données trop importante n'impacte pas la valeur des résultats, et élimine une incertitude quant à la quantité minimale de données nécessaires. Le plan d'expériences résultant est illustré par la figure 3.7.

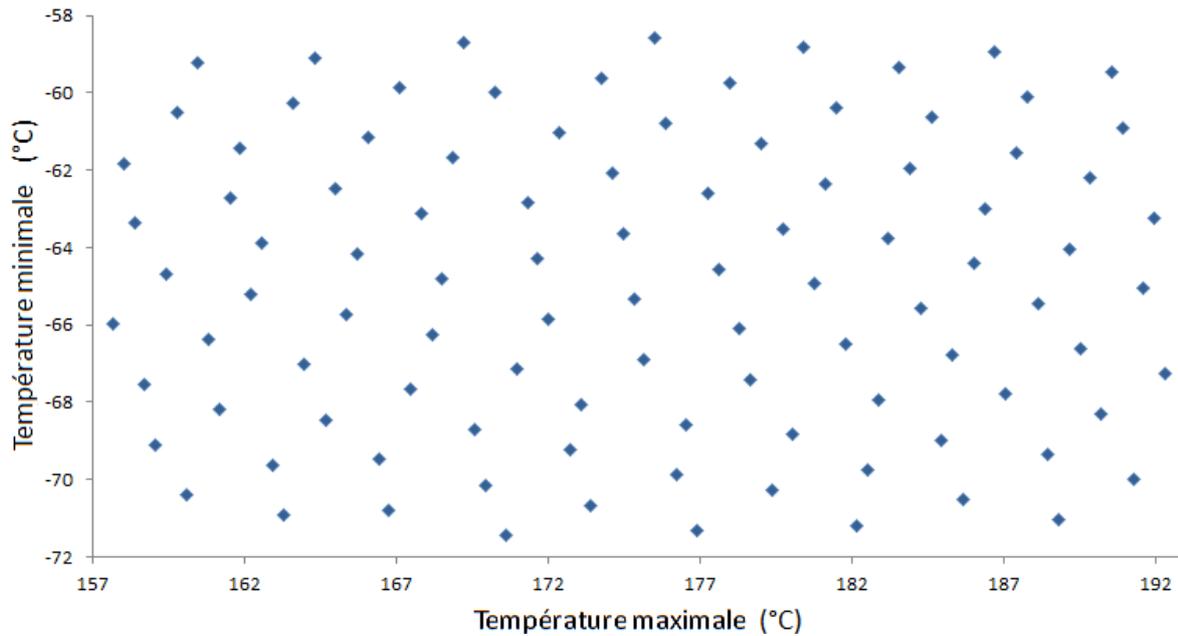


FIGURE 3.7 – Premier plan d'expériences

3.2.2 Construction des surfaces de réponse

3.2.2.1 Analyse préliminaire des données

Une fois le plan d'expériences construit et les calculs réalisés, les résultats (valeurs de la DED et températures au cours du temps) sont écrits sous forme de fichiers indépendants pour chaque expérience. Tous les résultats sont alors compilés (à l'aide de macro-commandes VBA dans Excel) en une base de donnée (sous la forme d'un classeur de feuilles de calculs), plus adaptée à leur observation et leur utilisation dans la suite de ces travaux. À chaque point d'expérience est associée une feuille de calcul rassemblant les données correspondantes.

Validation de l'indicateur de vieillissement

La figure 3.8 représente l'évolution de la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'assemblage au cours des cycles thermiques. Ce graphe met en évidence que la DED est bien croissante au cours des cycles. C'est la première condition, mentionnée dans la section 2.2.1, pour pouvoir considérer la DED comme un indicateur de vieillissement satisfaisant. De plus, nous pouvons constater que lors d'une transition de température, c'est-à-dire durant les phases où l'endommagement de l'assemblage est le plus fort [2, 3], la variation de la DED est plus importante que lors des paliers de température constante. Cela vérifie la seconde propriété d'un indicateur de vieillissement.

Ces deux observations tendent donc à confirmer le choix de la DED en tant que grandeur de suivi de l'endommagement de l'assemblage.

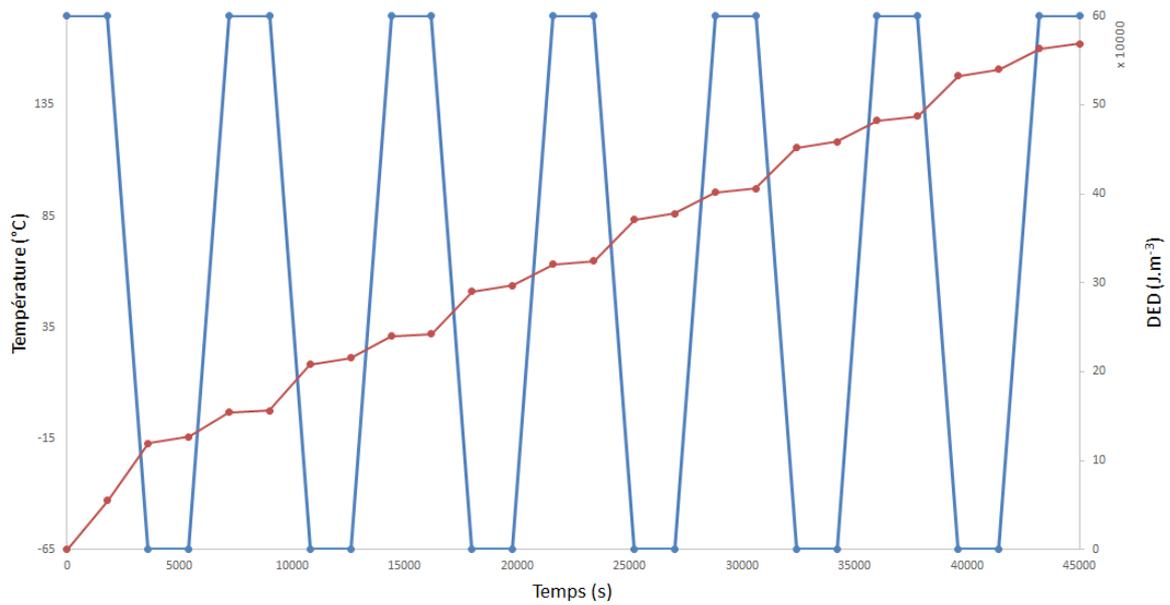


FIGURE 3.8 – Evolution de la DED au cours du temps lors d'un cyclage en température

Grandeurs cycliques et grandeurs accumulatives

Durant le cyclage passif, la température est cyclique et la déformation a une composante périodique (c.f. figure 3.9) en raison de la composante élastique des matériaux de l'assemblage.

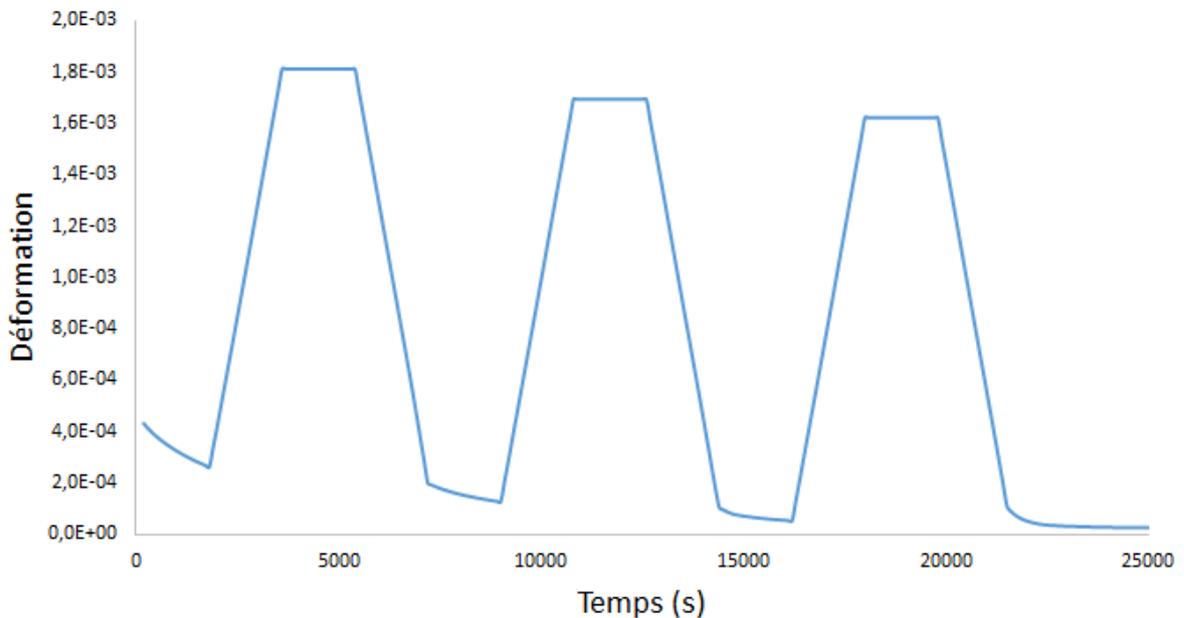


FIGURE 3.9 – Périodicité de la déformation

Cette périodicité est un obstacle à la construction d'une approximation fonctionnelle de la DED. Pour pallier à cet inconvénient, nous pouvons transformer ces variables cycliques et les rendre croissantes à l'aide d'une forme intégrée :

$$I_T(t) = \int_0^t |T(\tau)| d\tau \quad (3.4)$$

$$I_{\epsilon}(t) = \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

Toutefois, l'accroissement de la DED dans le joint d'assemblage est plus important lorsque la différence entre la température à laquelle est soumise l'assemblage et la température de référence est maximale (c.f. figure 3.8). La température de référence est la température à laquelle l'assemblage ne subit aucune contrainte d'origine thermique : pour notre assemblage, c'est la température associée au procédé de frittage, soit 250°C.

Par conséquent, il est plus cohérent de considérer l'écart ΔT entre la température de référence et la température à laquelle est soumis l'assemblage, plutôt que seulement cette dernière. L'équation 3.4 est donc remplacée par l'équation suivante :

$$I_{\Delta T}(t) = \int_0^t |T_{ref} - T(\tau)| d\tau \quad (3.6)$$

Cette intégrale est représentée en figure 3.10.

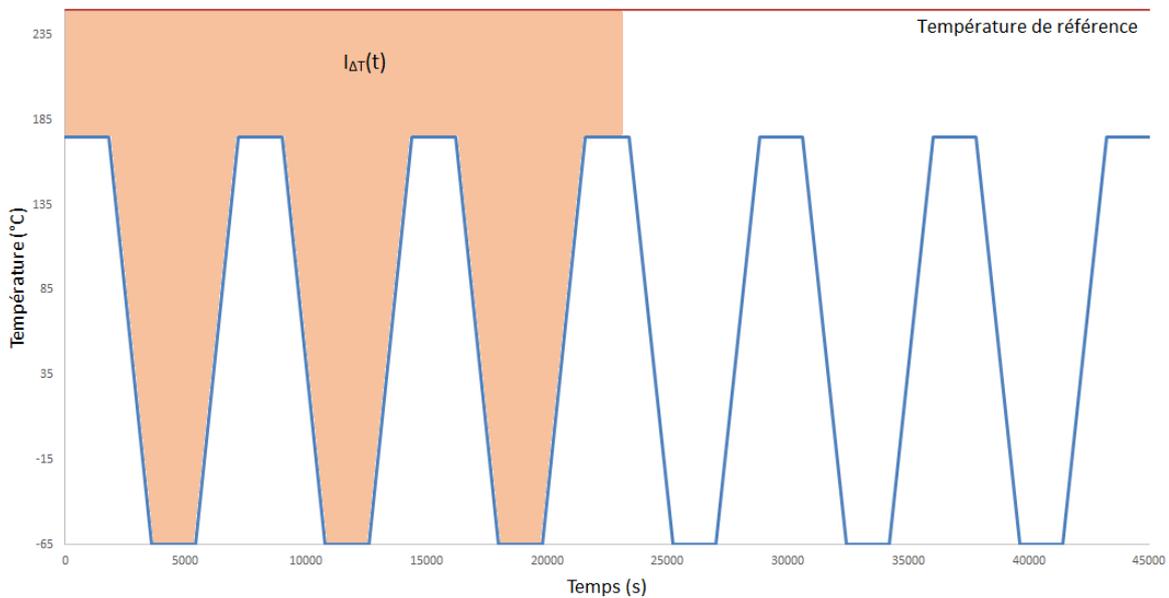


FIGURE 3.10 – Intégrale de la différence $|T_{ref} - T(\tau)|$

Nous utiliserons les valeurs absolues de ces intégrales pour obtenir des quantités croissantes au cours du temps. La figure 3.11 illustre l'évolution de la DED et des intégrales 3.6 et ?? pour quelques cycles. Nous pouvons constater que l'évolution de la DED et des intégrales présentées plus haut sont désormais monotone, ce qui facilite la construction d'une relation fonctionnelle.

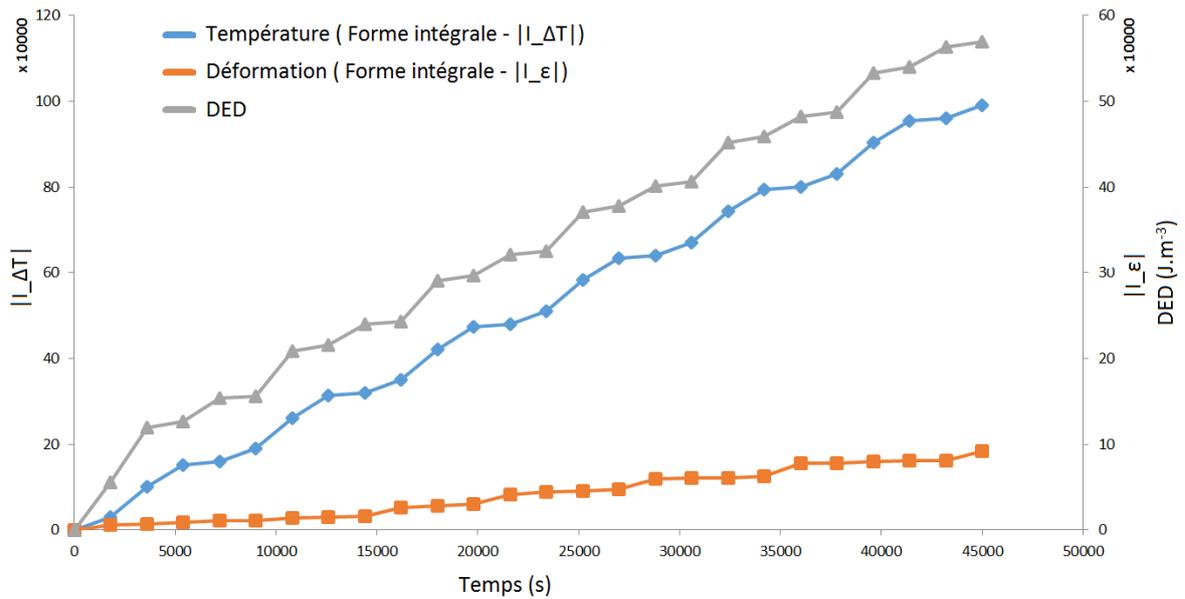


FIGURE 3.11 – Formes intégrées de la température et de la déformation au cours du temps

3.2.2.2 Intégration numérique : la méthode des trapèzes

Nous avons construit, dans la section précédente, deux variables notées I_ϵ et $I_{\Delta T}$ faisant appel à une intégration. Les résultats fournis par la simulation n'étant pas continus mais sous forme de tableaux de données, nous devons faire appel à une méthode d'intégration numérique pour calculer les variables I_ϵ et $I_{\Delta T}$. La méthode des trapèzes est une méthode d'intégration numérique simple que nous utilisons pour déterminer ces variables, afin de les utiliser pour la construction de surfaces de réponse.

Considérons une fonction f , deux fois dérivable et de dérivée seconde continue sur un intervalle $[a,b]$, et dont on cherche à calculer l'intégrale sur $[a,b]$. L'intervalle $[a,b]$ est subdivisé en n parties égales $[x_i, x_{i+1}]_{i=0,n}$. La méthode des trapèzes consiste à remplacer f sur chaque intervalle $[x_i, x_{i+1}]$ par une fonction affine, tel que représenté en figure 3.12.

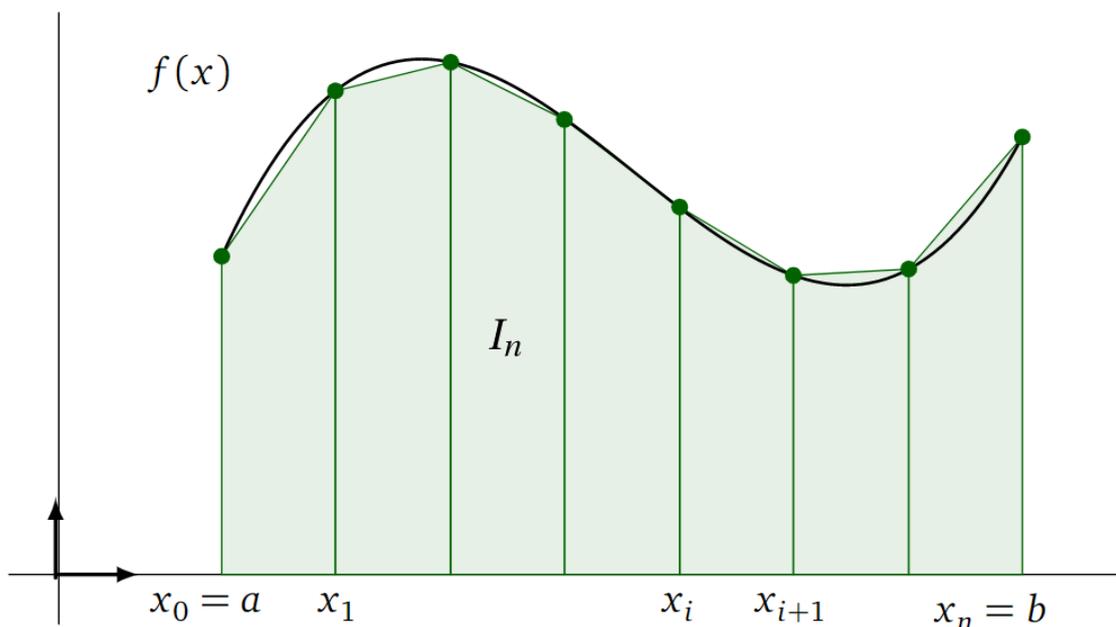


FIGURE 3.12 – Intégration par la méthode des trapèzes

L'aire d'un seul trapèze est donc donnée par :

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)dx = \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2}(x_{i+1} - x_i) \quad (3.7)$$

Ainsi, l'intégrale $\int_a^b f(x)dx$ est approximée par la suite I_n , définie comme la somme des aires de ces trapèzes :

$$I_n = \sum_{i=0}^n \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2}(x_{i+1} - x_i) \quad (3.8)$$

Si l'échantillonnage des points x_i est régulier, c'est-à-dire que $\forall i \in [1, n-1] x_{i+1} - x_i = \frac{b-a}{n}$, cette suite s'écrit :

$$I_n = \frac{b-a}{n} \left(\frac{f(a) + f(b)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) \right) \quad (3.9)$$

L'erreur commise est donnée par la relation suivante :

$$e = \left| \int_a^b f(x)dx - I_n \right| \leq \frac{(b-a)^3}{12n^2} \sup_{t \in [t_{i-1}, t_i]} (|f''(x)|) \quad (3.10)$$

Nous pouvons remarquer que cette erreur dépend du profil de variation de la température : plus elle est proche d'une droite, moins l'erreur est importante. De plus, si on raffine la subdivision de l'intervalle $[a,b]$ (c'est-à-dire si on augmente n), cette erreur diminue. Nous utiliserons cette méthode de calcul pour déterminer les valeurs de I_c et $I_{\Delta T}$.

3.2.2.3 Surface de réponse : déformation et densité d'énergie

En premier lieu, nous cherchons à déterminer une régression appropriée de la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'assemblage par la quantité I_c (c.f. figure 3.13).

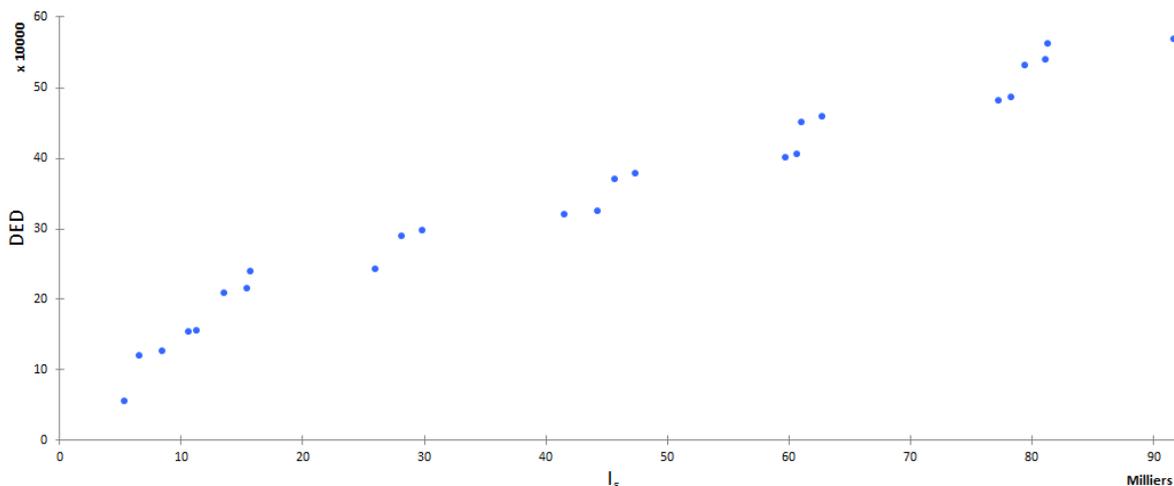


FIGURE 3.13 – DED et I_c : nuage de points

La plus simple des régression est la régression linéaire. Pour notre série de données, une régression linéaire (c.f. figure 3.14) présente une EQM (*erreur quadratique moyenne*, c.f. section 2.5.2.3) très élevée ($> 10^8$), ce qui signifie que ce n'est pas une bonne approximation de la relation entre ces deux grandeurs (malgré le R^2 élevé).

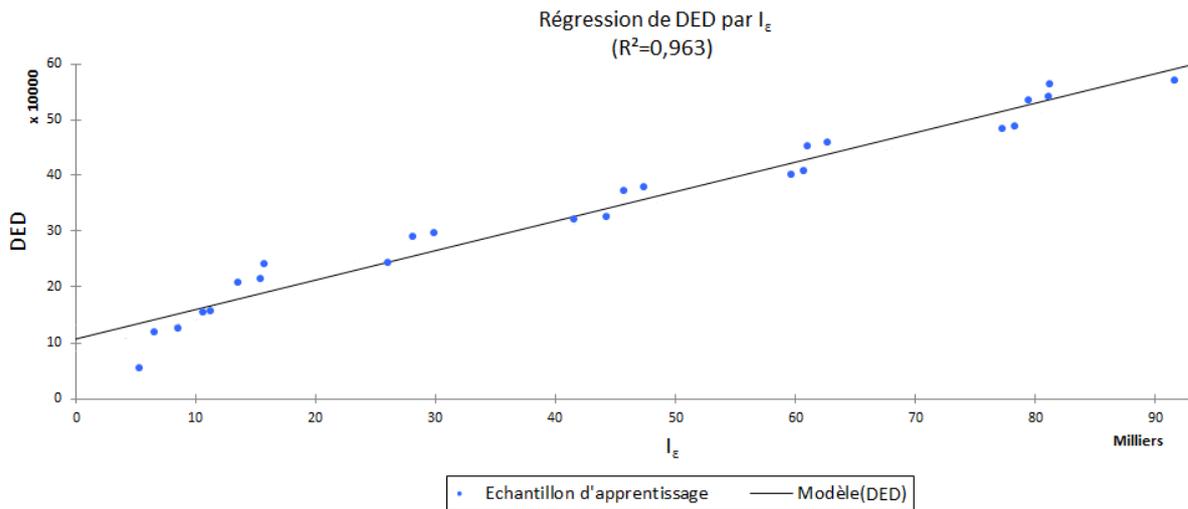


FIGURE 3.14 – Régression linéaire par I_ϵ

On note toutefois qu'il semble exister deux régimes : la première partie de la courbe, moins bien représentée par le modèle, pourrait être un régime transitoire qui se stabiliserait en une relation linéaire.

Afin de vérifier cette théorie, une régression linéaire de la DED par la déformation est calculée en ignorant les premiers points. Cette régression est présentée en figure 3.15.

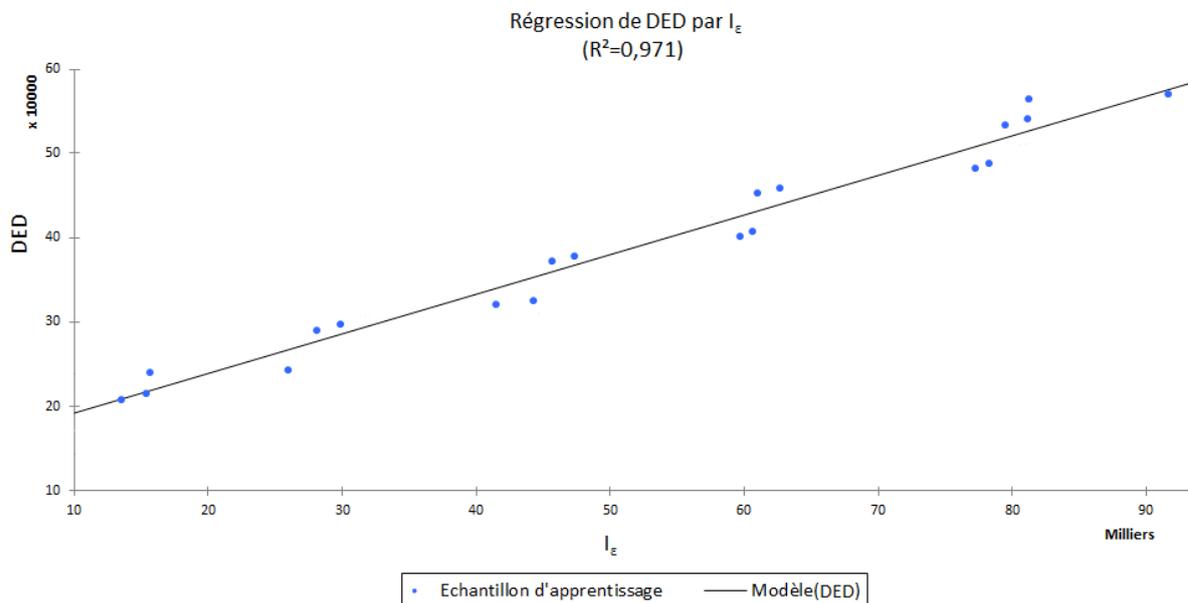


FIGURE 3.15 – Régression linéaire sur une série de données tronquée

L'EQM est divisée par deux, mais reste trop importante pour considérer le modèle satisfaisant. La régression suit bien la tendance globale de la série de données, mais ne permet pas d'interpréter les variations locales autour de cette tendance.

Ainsi, pour faciliter la construction d'un modèle en atténuant l'impact de ces variations sur le calcul, nous utilisons le logarithme népérien de la DED. Compte tenu de la forme des données exprimées de cette façon, c'est une régression logarithmique qui est construite, et présentée en figure 3.16.

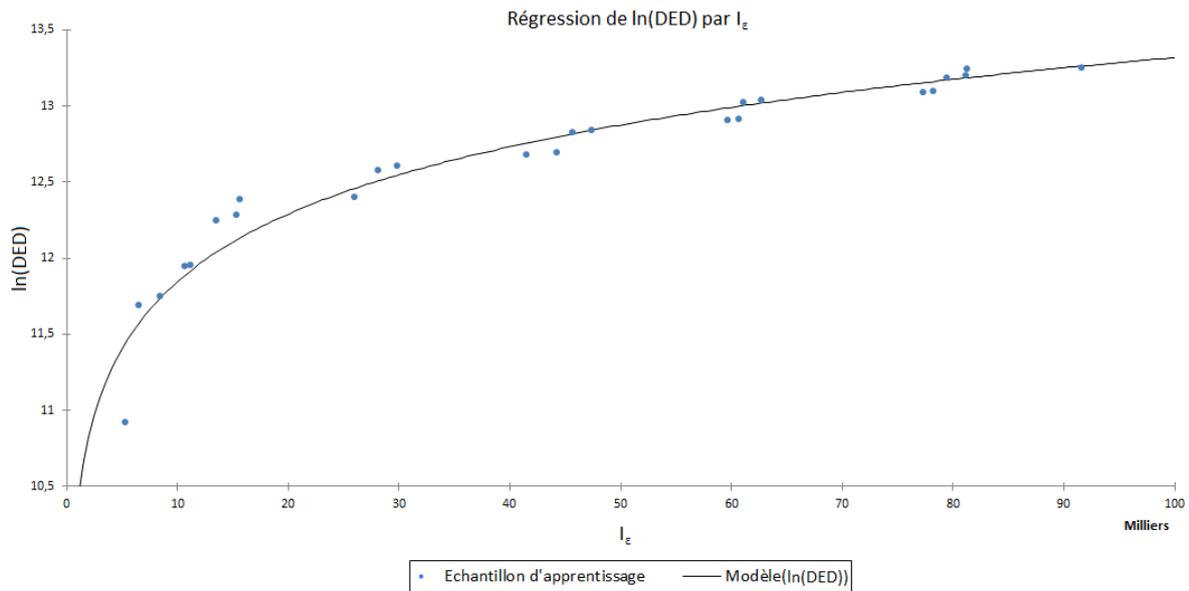


FIGURE 3.16 – Régression logarithmique par I_ϵ

Comme escompté, l'EQM est réduit par cette manipulation (2×10^{-2}) et la SCR (*somme des carrés des résidus*, c.f. section 2.5.2.3) est également faible ($< 0,5$). On remarque là encore que, la première partie de la courbe du modèle semble moins proche des données. Cela se traduit, sur le graphe des prédictions-observations en figure 3.17, par des points plus éloignés de la bissectrice.

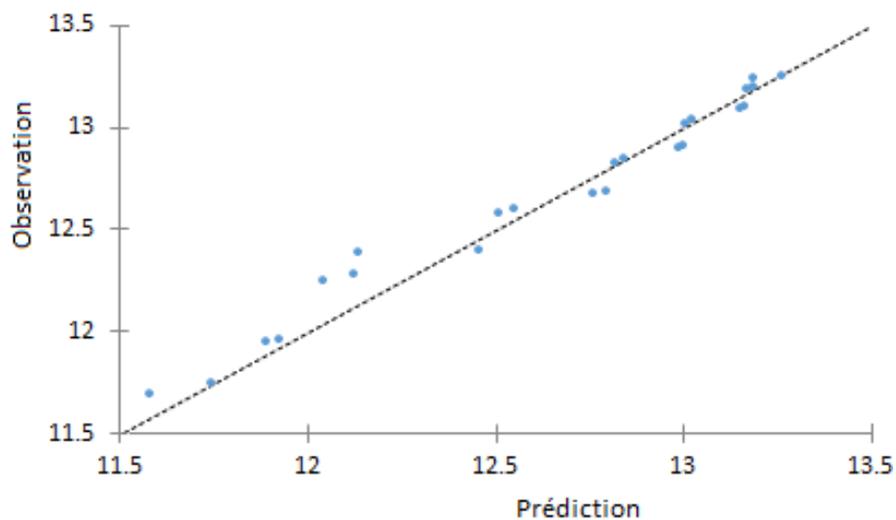


FIGURE 3.17 – Graphe des prédictions-observations

Une régression linéaire est une nouvelle fois construite en ignorant les premiers points (c.f. figure 3.18).

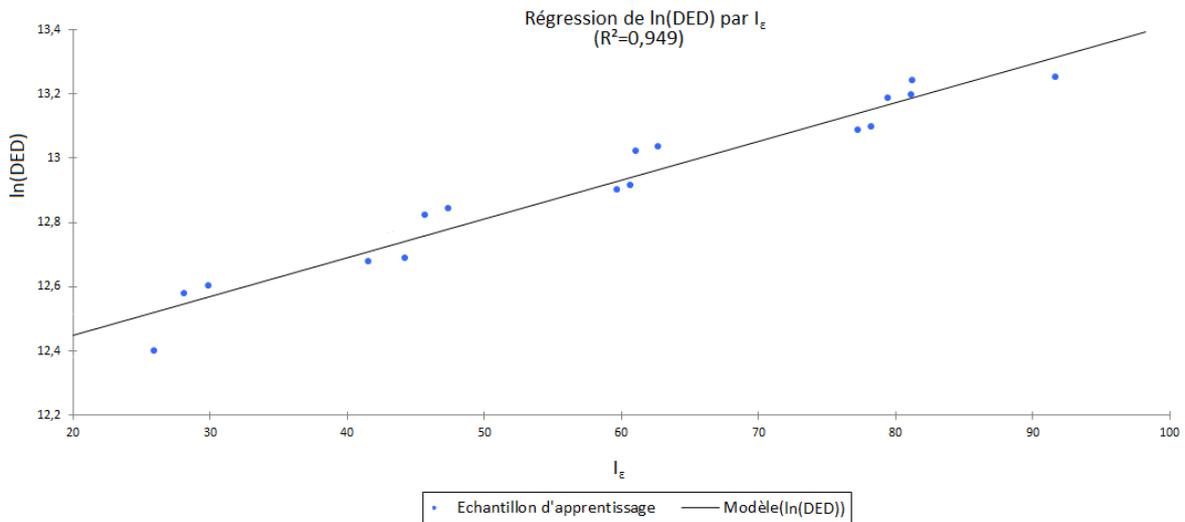


FIGURE 3.18 – Régression linéaire par I_ϵ

L'EQM encore réduite par rapport au cas précédant ($< 5 \times 10^{-3}$) nous permet de confirmer que ce qui semble être un régime transitoire, sur les premiers points de données, complique la construction d'un modèle. Ceci est appuyé par le graphe des prédictions-observations associé à ce modèle (c.f. figure 3.19), qui présente moins de points éloignés de la bissectrice que dans le cas précédent.

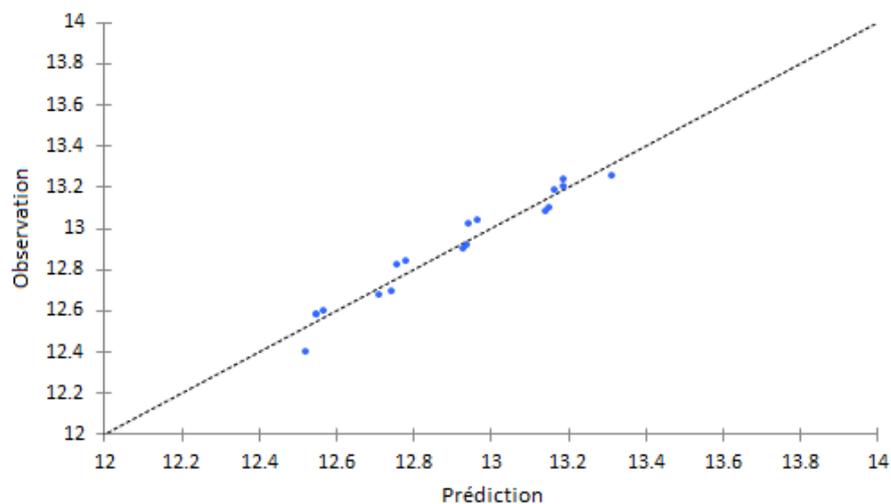


FIGURE 3.19 – Graphe des prédictions-observations

3.2.2.4 Surface de réponse : température et densité d'énergie

Nous souhaitons désormais exprimer la densité d'énergie de déformation plastique du joint d'assemblage à l'aide de la température, sous sa forme intégrée (c.f. figure 3.20).

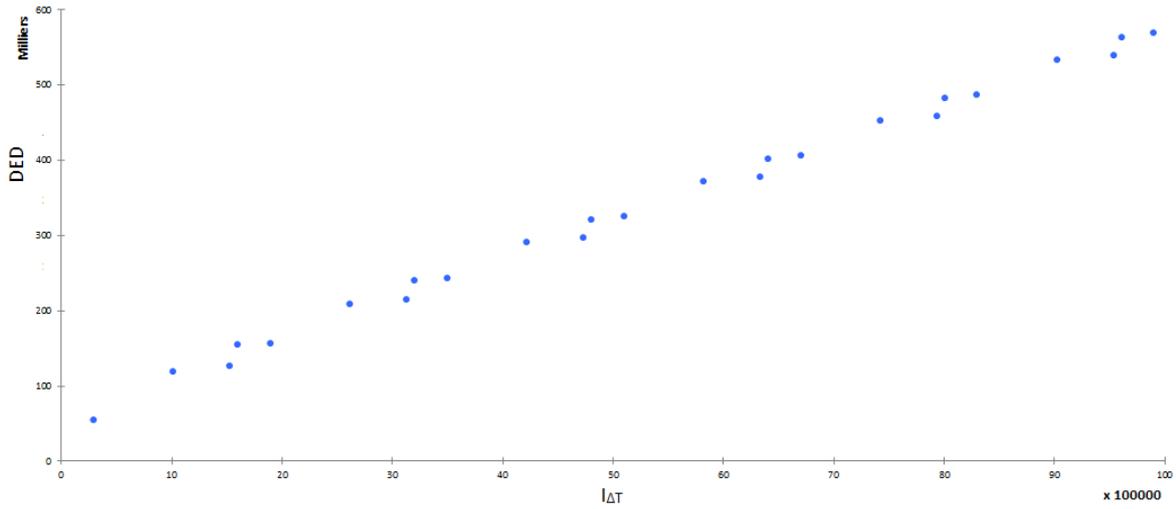


FIGURE 3.20 – DED et $I_{\Delta T}$: nuage de points

La première régression calculée est linéaire, et illustrée en figure 3.21. L'EQM obtenue est très importante (de l'ordre de 10^8), en dépit de coefficients R^2 et R^2_{adj} très élevés (0,996). Cela signifie que cette régression n'est pas adaptée pour modéliser la relation entre les deux grandeurs concernées.

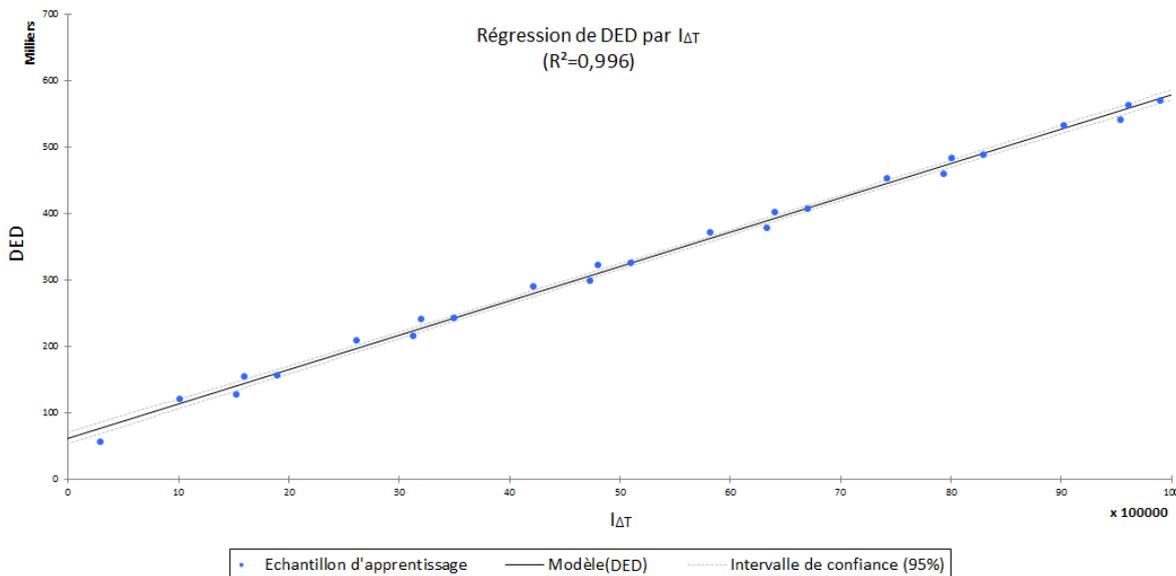


FIGURE 3.21 – Régression linéaire par $I_{\Delta T}$

Nous pouvons observer des variations locales en "marches d'escalier", qui peuvent expliquer l'inadéquation d'un modèle linéaire. Par conséquent, nous procédons de la même manière que dans le cas de la déformation (c.f. section 3.2.2.3) en utilisant le logarithme népérien de la DED pour atténuer ces déformations locales. Cela nous permet de construire la régression donnée en figure 3.22.

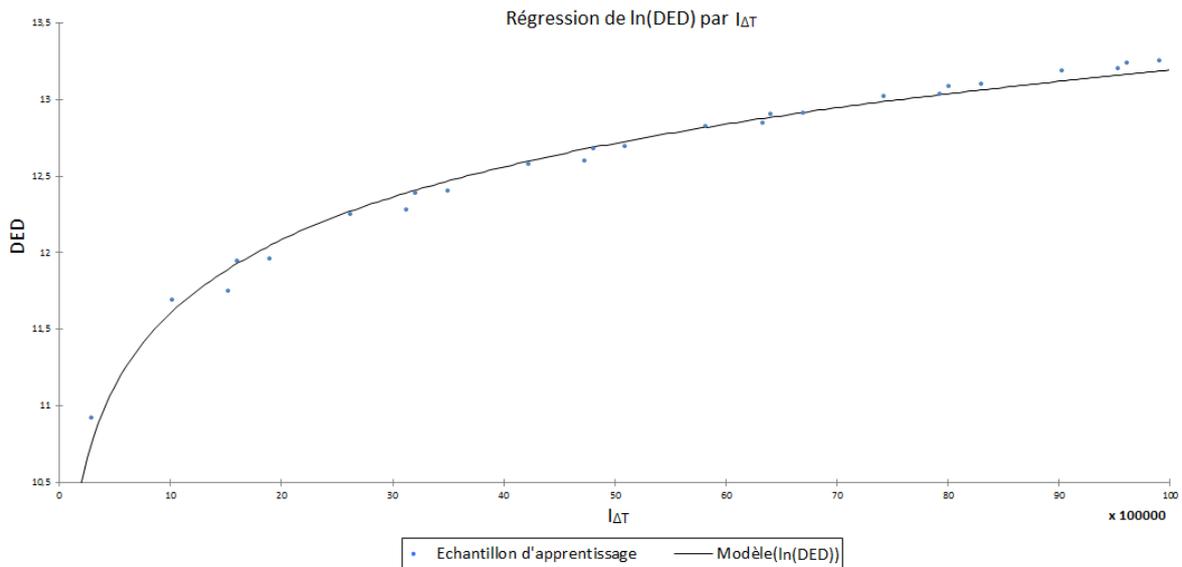


FIGURE 3.22 – Régression logarithmique par $I_{\Delta T}$

Une EQM ainsi qu’une SCR faible (respectivement 5×10^{-3} et 10^{-1}) indiquent que ce modèle interprète convenablement la série de données étudiée.

3.2.3 Analyse des surfaces de réponse

Nous avons construit des approximations pour exprimer la densité d’énergie de déformation plastique du joint d’assemblage en fonction de données de mesure : soit une déformation en surface de puce soit la température de l’assemblage. Pour chaque résultat, différentes méthodes de régression ont été testées et comparées pour déterminer la plus adaptée à la série de données considérée.

La déformation se révèle difficile à relier à la DED. La construction d’une surface de réponse a mis en évidence des difficultés à trouver une relation satisfaisante, en particulier sur les premiers points de données. Ceci pourrait s’expliquer par des phénomènes mécaniques (tels que l’écrouissage) liés à la plasticité des différents matériaux, qui introduiraient un régime transitoire. De plus, même en excluant ces points de données, nous pouvons observer que les points de données restent distribués de part et d’autre du modèle (c.f. figure 3.18). Ces variations en escaliers ne sont pas convenablement prises en compte dans le modèle et impactent son exploitabilité dans un cas réel. D’autre part, d’un point de vue intégration, une jauge de déformation reste difficile à intégrer dans un module de puissance, et pose des problèmes de calibration (présence de contraintes résiduelles impossibles à évaluer).

En ce qui concerne la température, nous observons également des variations en escalier dans la série de données, malgré une tendance linéaire marquée. L’utilisation d’une échelle logarithmique pour la DED permet de construire un modèle mathématiquement meilleur, mais qui ne permet tout de même pas la prise en compte de ces petites variations. À l’inverse de la déformation, aucun régime transitoire n’est présent (ce qui est parfaitement logique, puisque dans le cas d’un cyclage passif la température de l’assemblage est imposée par celle de son environnement), ce qui tend à simplifier la construction d’un modèle. Enfin, une mesure de température de l’assemblage est relativement simple à obtenir, puisque cela ne requiert pas de greffer un capteur sur la puce. Comme nous l’avons évoqué lors de l’étude du positionnement des capteurs (c.f. section 2.4.1), bien qu’un gra-

dient de température soit indéniablement présent dans l'assemblage lors de la sollicitation active du composant, c'est avant tout la variation de température au cours du temps qui doit nous permettre de remonter à l'endommagement de l'assemblage.

La plus grande facilité de traitement des données de température ainsi que la difficulté à obtenir en premier lieu de réelles données de déformation nous conduisent à ne plus considérer que la température dans la suite de ces travaux.

3.2.4 Expression générale de la DED

Dans la section 3.2.2.4, nous avons déterminé une méthode de régression pour exprimer la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'assemblage en fonction de la température (sous sa forme intégrée, c.f. équation 3.6). Cette régression conduit à une expression de la forme suivante :

$$\ln(\text{DED}) = \alpha \ln(I_{\Delta T}(t)) + \beta \quad (3.11)$$

Ou encore :

$$\ln(\text{DED}) = \alpha \ln\left(\int_0^t |T_{ref} - T(\tau)| d\tau\right) + \beta \quad (3.12)$$

Les coefficients α et β sont propres à un point d'expérience. Par conséquent, pour déterminer l'expression générale de la DED, il est nécessaire de répéter le processus de construction de surface de réponse pour lier la valeur de ces coefficients à celle des extrêmes de température que nous faisons varier dans le plan d'expériences.

Tout d'abord, on construit le modèle défini par l'équation 3.11 pour chaque point d'expérience de notre plan. Chaque point d'expérience ayant été calculé à partir d'un couple $[T_{min}; T_{max}]$ différent, nous cherchons alors l'expression des coefficients α et β en fonction de $[T_{min}; T_{max}]$. Une nouvelle fois, on construit une surface de réponse pour chaque coefficient. La figure 3.23 présente les séries de données brutes des coefficients α et β .

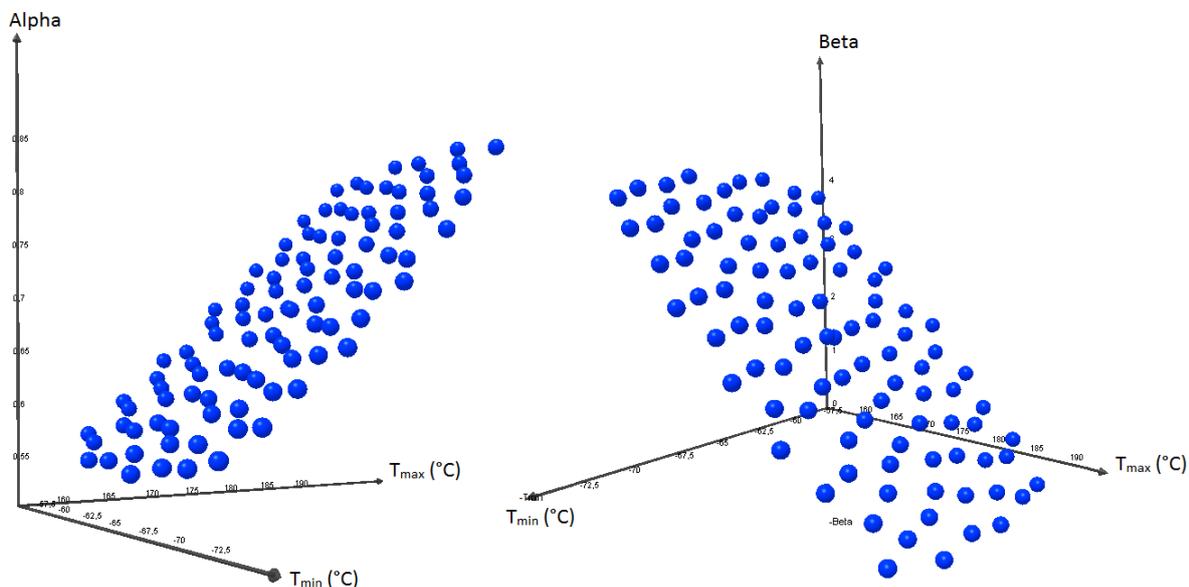


FIGURE 3.23 – Coefficients α et β : nuage de points

Une régression bilinéaire constitue un très bon modèle pour ces séries de données, avec des coefficients R^2 et R_{adj}^2 supérieurs à 0,99 pour α comme pour β , et des EQM respectives de l'ordre de 10^{-5} et 10^{-2} . La figure 3.24 représente ces surfaces de réponse.

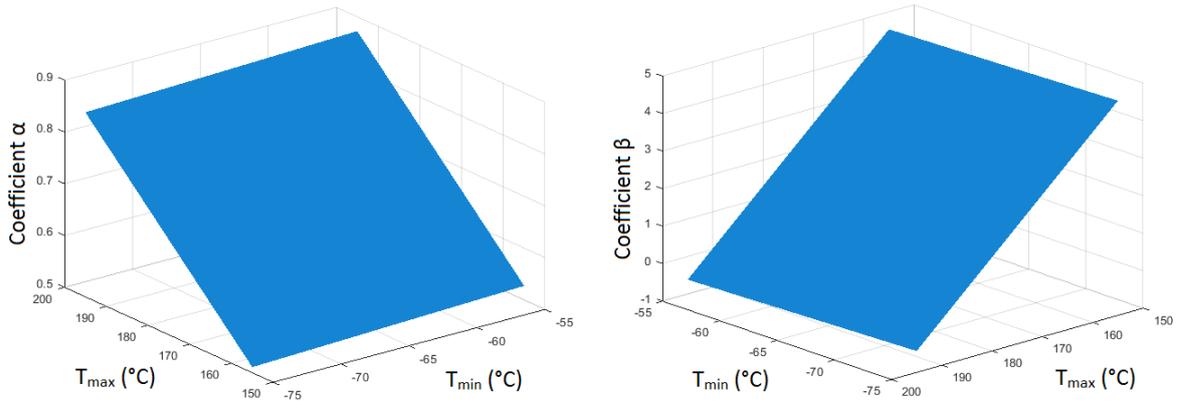


FIGURE 3.24 – Régressions bilinéaires pour les coefficients α et β

Les coefficients α et β sont donc donnés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \alpha(T_{min}; T_{max}) = a \times T_{min} + b \times T_{max} + c \\ \beta(T_{min}; T_{max}) = d \times T_{min} + e \times T_{max} + f \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec :

- $a = 8.1 \times 10^{-4}$
- $b = 8.6 \times 10^{-3}$
- $c = -7.7 \times 10^{-1}$
- $d = -9.3 \times 10^{-3}$
- $e = -1.3 \times 10^{-1}$
- $f = 2.4 \times 10^{-2}$

Ainsi, nous obtenons un premier modèle pour l'expression générale de la DED, nous permettant de suivre notre indicateur de vieillissement au cours d'un cyclage thermique :

$$DED(t) = \left(\int_0^t |T_{ref} - T(\tau)| d\tau \right)^{\alpha(T_{min}; T_{max})} e^{\beta(T_{min}; T_{max})} \quad (3.14)$$

Cette expression n'est cependant valable que lors d'un cyclage. Le besoin de connaître les températures T_{min} et T_{max} n'est pas adapté à l'étude d'un cas quelconque. Il est donc nécessaire de s'affranchir de cette limitation pour pouvoir déterminer la DED dans le cas d'un chargement thermique non cyclique.

D'autre part, les coefficients normalisés représentés en figure 3.25, nous apportent plus de détails quant aux contributions de chacune des températures dans les modèles des coefficients α et β .

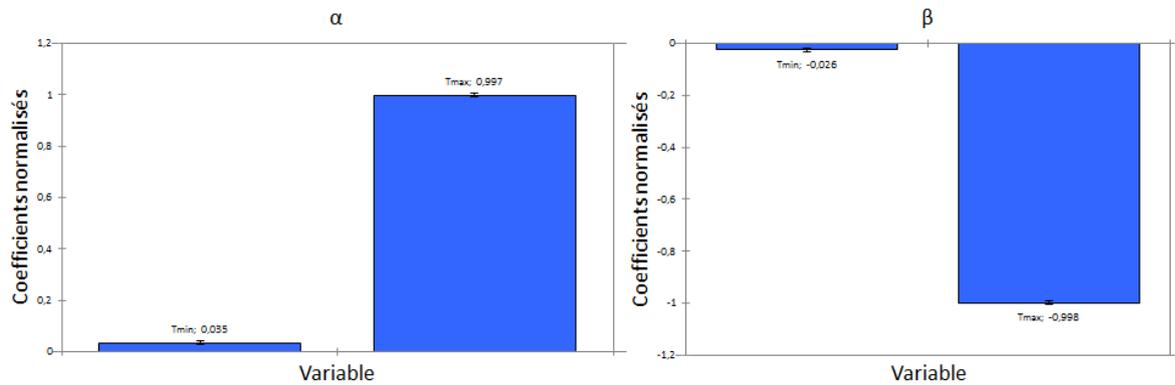


FIGURE 3.25 – Contributions des températures aux modèles des coefficients α et β

Nous pouvons observer que les variables T_{min} et T_{max} n'ont pas des influences équivalentes sur les coefficients. Ce déséquilibre important peut souligner le besoin d'autres paramètres pour caractériser convenablement la relation entre température et densité d'énergie de déformation plastique. La figure 3.26 représente les coefficients α et β exprimés en fonction des prédictions du modèle. Ainsi, plus un point est proche de la bissectrice, plus le modèle correspond aux données. Pour un modèle parfait, tous les points seraient donc sur une même droite (représentée en pointillés).

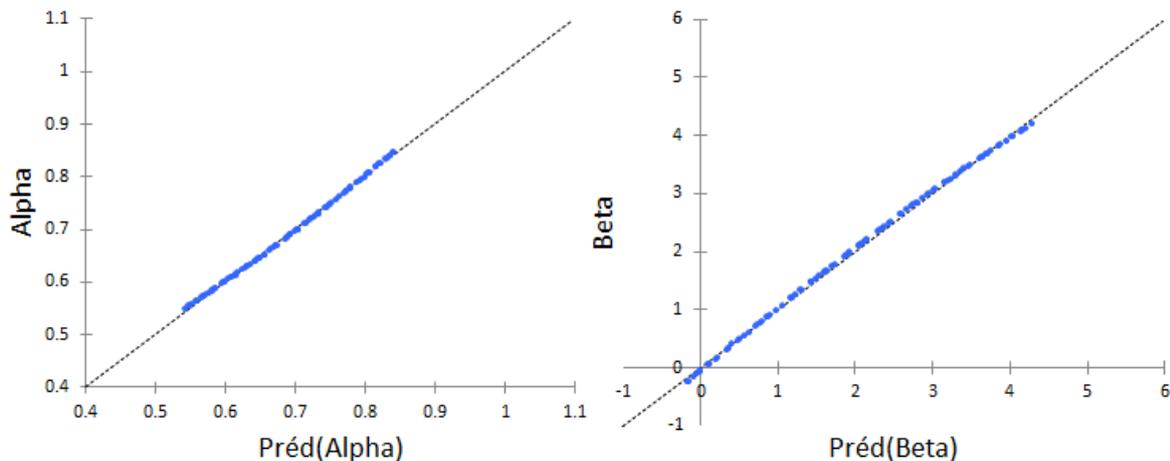


FIGURE 3.26 – Graphes des prédictions-observations

3.2.5 Bilan et améliorations

Dans cette section, nous avons mis en place une démarche d'application de la méthode des surfaces de réponse pour construire une expression approchée de la densité d'énergie de déformation plastique d'un joint d'assemblage de puissance.

En premier lieu, le plan d'expériences a été déterminé en utilisant une méthode de remplissage optimal de l'espace de conception. Les données ainsi obtenues sont donc représentatives du comportement de l'assemblage de puissance sur les plages de températures considérées.

À partir de ces données, une première étude des données brutes a permis de constater que la DED et nos grandeurs de suivi (température et déformation) présentaient un profil d'évolution très différent. Afin de faciliter la construction des surfaces de réponse, une transformation a été appliquée à nos grandeurs, désormais utilisées sous une forme intégrée, présentant l'avantage d'être accumulatives tout comme la DED.

Par la suite, des surfaces de réponse ont été calculées et comparées pour la déformation ainsi que pour la température et ont permis de mettre en évidence l'intérêt des indicateurs de qualités présentés au chapitre précédant. Les difficultés rencontrées à correctement décrire le comportement des séries de données brutes ont également été soulignées. Après avoir sélectionné l'expression paramétrique de la surface de réponse la plus adaptée, nous avons calculé une surface de réponse pour chaque point du plan d'expériences. Les valeurs de leur paramètres ont été utilisées pour construire d'autres surfaces de réponse, permettant de calculer la valeurs de ces paramètres en fonction des conditions du cyclage passif. Ainsi, il nous a été possible de proposer une première expression générale pour calculer la DED en fonction de grandeurs mesurables.

Toutefois, nous avons constaté lors du calcul des différentes surfaces de réponse que notre méthode fournit des résultats qui, s'ils ont le mérite de représenter une évolution globale de la DED, ne suffisent pas à déterminer avec précision l'état d'endommagement de l'assemblage.

En premier lieu, lors du calcul de la relation entre température ou déformation et DED, nous avons observé des variations en marches d'escalier qui ne sont pas reflétées correctement par les modèles obtenus. Pour pallier à cet inconvénient, il est nécessaire de modifier notre approche et de considérer l'étude des variations de la DED au cours des différentes phases d'un cycle plutôt que sur la globalité d'une succession de plusieurs cycles. Chaque cycle se décompose en effet en deux plateaux (un haut, un bas) et de deux transitions de température (l'une croissante, l'autre décroissante). Dans la suite de ces travaux, nous nous intéresserons à l'évolution de la DED au cours de chacune de ces phases prises séparément, afin de caractériser cette évolution de façon plus précise. Cela permettra également de construire des modèles qui ne reposent pas sur un chargement cyclique. Puisque l'accroissement de la DED sera exprimé pour des régimes de température spécifiques, il sera possible de considérer un chargement quelconque comme la somme de chargements élémentaires pour lesquels nos modèles pourront fournir une valeur de l'accroissement de la DED.

D'autre part, lors de la construction du lien entre les paramètres de régression α et β et les températures T_{min} et T_{max} , nous avons constaté un déséquilibre important entre leurs contributions respectives à la valeur des paramètres. Ceci peut résulter d'un manque de variables explicatives. Dans un souci de simplicité, nous nous étions limités aux températures extrêmes, ce qui s'est révélé insuffisant. La durée des différentes phases du cyclage sera ajoutée aux températures extrêmes comme variables explicatives. Ainsi, nous introduisons une quatrième variable, le taux de variation de température. Celle-ci est indirecte, car déduite des trois premières, et devrait permettre de mieux caractériser l'évolution de la densité d'énergie de déformation du joint d'assemblage lors des variations de températures qu'il subit.

3.3 Évolution de la démarche

3.3.1 Paramètres du plan d'expériences

Compte tenu des résultats obtenus à l'aide du premier plan d'expériences, quelques modifications doivent être apportées aux paramètres utilisés pour améliorer notre seconde itération.

La méthode d'échantillonnage ne change pas et la distribution de type hypercube latin optimisé est conservée. Le nombre de points d'expérience est également maintenu, pour les mêmes raisons que celles avancées pour le premier plan d'expériences (c.f. section 3.2.1).

En ce qui concerne les variables de contrôle, les températures minimale et maximale du cycle sont toujours considérées et leurs intervalles de variation ne changent pas. Dans toutes les simulations effectuées pour ces travaux de recherche, un cycle de vieillissement est décomposé en quatre phases (deux plateaux et deux transitions de température) de durées égales. La valeur nominale de cette durée est fixée à trente minutes, pour obtenir une vitesse de transition à 8°C par minute (avec les températures minimales et maximales nominales) de façon à se placer dans des conditions de variations rapides de température (VRT). Nous souhaitons néanmoins introduire une variabilité en temps, afin de caractériser l'influence de la durée d'un palier de température ainsi que du taux de variation de température. Pour ce faire, la durée d'une phase de cycle est ajoutée aux variables du problème. Cette durée, d'une valeur nominale de 30 minutes, varie entre 15 et 45 minutes.

L'espace de conception est donc désormais défini par trois variables. Le plan d'expériences résultant est illustré par la figure 3.27.

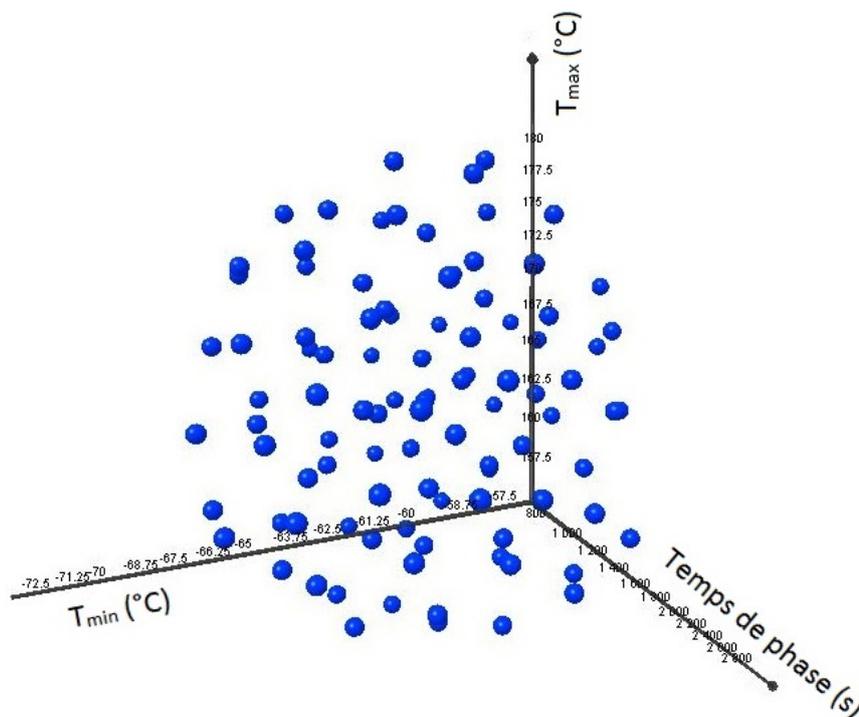


FIGURE 3.27 – Second plan d'expériences

3.3.2 Décomposition des phases de cyclage

En plus de l'ajout d'une grandeur de contrôle, l'approche utilisée pour déterminer la densité de déformation plastique du joint d'assemblage est également modifiée. Dans la section 3.2, l'objectif était de reconstituer une loi d'évolution en fonction des sollicitations thermiques imposées à l'assemblage. Les limites de cette approche ont été mises en évidence précédemment et nous conduisent à nous intéresser à l'incrément de DED correspondant à une variation de température au cours d'un temps donné plutôt qu'à l'expression de son évolution globale. Ainsi, cette nouvelle itération de plan d'expériences doit permettre de caractériser les différents modes d'accroissement de la DED au cours des quatre phases du cyclage, pour construire un modèle ne représentant plus l'évolution globale de la DED mais ses différents régimes d'accroissement pour toute variation élémentaire de température entre deux instants.

Pour construire cette relation, les cycles sont décomposés. Les accroissements de DED lors de chaque phase du cyclage et pour tous les points d'expérience constituent quatre séries de données associant la DED, les températures de cycle et les durées de cycle. Ces phases seront traitées séparément pour déterminer une loi d'accroissement propre au régime qui lui est associé (transition croissante ou décroissante et plateau haut ou bas) et qui dépend des paramètres de cyclage. Une fois cette loi exprimée, l'identification du régime observé et la connaissance de ses paramètres (températures initiales et finales ainsi que durée) permettront de calculer l'incrément de la DED engendré par le chargement mesuré par les capteurs. Cette démarche est présentée plus en détail dans la section 3.4.

Par ailleurs, nous avons émis l'hypothèse (c.f. section 3.2.3) qu'il pourrait exister un régime transitoire lié à des phénomènes d'écrouissage. Ainsi, pour limiter l'influence de ces phénomènes sur les résultats, chaque calcul débutera par plusieurs cycles nominaux : la température de ces cycles varie entre $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $175\text{ }^{\circ}\text{C}$, et les phases de cyclage durent trente minutes. Les cycles suivant sont simulés avec les valeurs de paramètres générées par le plan d'expériences. Pour avoir une quantité de données suffisante, cinq cycles supplémentaires sont réalisés avec des paramètres propres à chaque point d'expérience.

3.3.3 Construction des surfaces de réponse

Une fois les données générées par Ansys, celles-ci sont collectées de la même façon que pour le plan d'expériences précédent. Pour chaque point d'expérience, elles sont regroupées selon la phase du cyclage qui leur correspond. Ceci est illustré par la figure 3.28.

Le taux de variation de température, noté \dot{T} , est utilisé pour caractériser le régime étudié. Dans le cas d'un taux non nul, nous parlons de régime variable (ou de transition de température) tandis que dans le cas d'un taux nul, nous parlons de régime stationnaire (ou de palier). Bien que le taux de température soit dépendant de la durée et des températures de phases (T_{min} et T_{max}), il permet de prendre en compte dans les modèles une interaction entre les variables que ne peut proposer spontanément l'outil de calcul des surfaces de réponse.

L'accroissement de la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint au cours de la phase considérée est noté ΔDED et si on le normalise par rapport au temps de la phase associée, on obtient le taux d'accroissement de la DED, noté $\Delta\text{DED}/dt$. On ne s'intéresse pas ici à l'évolution de la DED à l'intérieur de chaque phase. En effet, l'approximation faite ici est que pour un temps suffisamment court (par exemple celui séparant deux mesures sur notre assemblage), cet accroissement peut raisonnablement être approximé

Palier Haut		dT/dt	
		0.00	
$\Delta \int T_{ref}-T dt$	ΔDED	$\Delta DED/dt$	
85425	11643	11.1	
85425	11269	10.7	
85425	11823	11.2	
85425	11198	10.6	
85425	11456	10.9	
85425	11375	10.8	
Moyenne	11461	10.9	

Transition Croissante		dT/dt	
		0.23	
$\Delta \int T_{ref}-T dt$	ΔDED	$\Delta DED/dt$	
211195	15383	14.6	
211195	15208	14.4	
211195	15664	14.9	
211195	15352	14.6	
211195	15460	14.7	
211195	15858	15.1	
Moyenne	15488	14.7	

Palier Bas		dT/dt	
		0.00	
$\Delta \int T_{ref}-T dt$	ΔDED	$\Delta DED/dt$	
336965	13825	13.1	
336965	13564	12.9	
336965	13296	12.6	
336965	13782	13.1	
336965	13475	12.8	
336965	13932	13.2	
Moyenne	13646	13.0	

Transition Décroissante		dT/dt	
		-0.23	
$\Delta \int T_{ref}-T dt$	ΔDED	$\Delta DED/dt$	
211195	40923	38.9	
211195	41132	39.1	
211195	41322	38.5	
211195	40576	39.2	
211195	39786	37.8	
211195	41617	39.5	
Moyenne	40893	38.8	

FIGURE 3.28 – Données regroupées selon la phase du cyclage

par une fonction affine par morceaux. C'est le principe de la méthode des trapèzes, qui sera utilisée et présentée plus en détail dans la section 3.4. Par conséquent, seul le taux de variation de la DED nous intéresse.

Dans les sections suivantes, nous décrivons les surfaces de réponse construites simultanément pour des régimes similaires de température (constante ou variable) en raison des comportements similaires des données à traiter. Ceci est permis par les similarités des méthodes utilisées pour analyser des régimes aux taux de variation de température identiques (en valeur absolue). En outre, les valeurs utilisées pour l'accroissement de DED sont obtenues en moyennant les valeurs d'accroissement pour les différents cycles d'un même point d'expérience. De cette façon, nous limitons le risque de prendre en compte des irrégularités dans l'évolution de la DED.

3.3.3.1 Variable explicative et intégration numérique

Puisque l'on s'intéresse à l'accroissement de la DED, il est cohérent de ne plus utiliser l'intégrale $I_{\Delta T} = \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ (qui représente tout l'historique de chargement de l'assemblage), au profit de son accroissement. On définit donc l'incrément de $I_{\Delta T}$ entre le temps initial t_i et le temps final t_f d'un régime de température :

$$\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau = \int_{t_i}^{t_f} |T_{ref} - T(\tau)| d\tau \quad (3.15)$$

$\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ représente donc l'augmentation de l'aire définie par la figure 3.10 au cours d'un palier ou d'une transition de température. On note par ailleurs que cette grandeur est constante pour une même phase du cycle (cf. figure 3.28). Ceci est normal, puisqu'elle est définie de façon géométrique par rapport au chargement thermique im-

posé.

En utilisant la méthode des trapèzes (c.f. section 3.2.2.2) pour calculer cette intégrale, et puisque le taux de variation de la température est constant entre t_i et t_f (au cours d'une même phase du cycle), on peut simplifier l'équation 3.9 de la façon suivante :

$$\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau = (t_f - t_i) \left| T_{ref} - \frac{T_f + T_i}{2} \right| \quad (3.16)$$

C'est cette formule qui est utilisée pour obtenir les valeurs de $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ présentées sur la figure 3.28.

3.3.3.2 Paliers

Pour la construction de cette première surface de réponse, nous considérons la grandeur $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$, définie par l'équation 3.15. La figure 3.29 représente le taux d'accroissement de la DED en fonction de $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ au cours des paliers haut et bas d'un cycle.

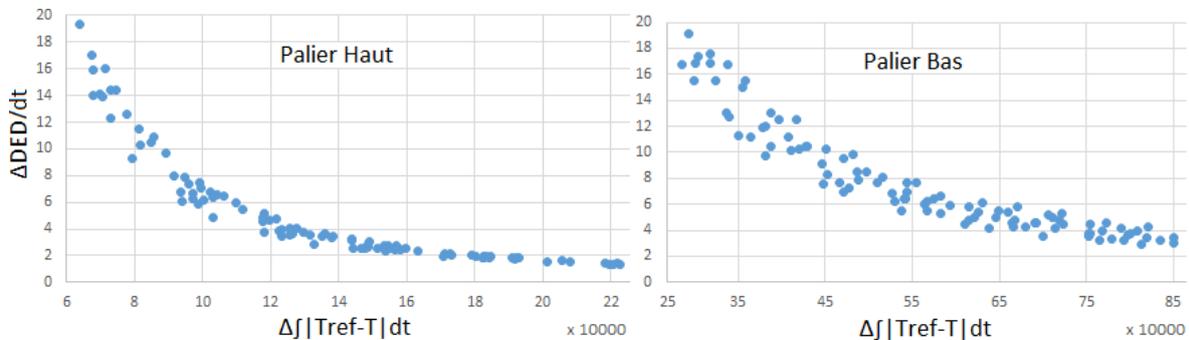


FIGURE 3.29 – DED et $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$: nuages de points

Une première régression de type exponentielle est construite, et illustrée (pour le cas du palier haut) en figure 3.30. Un modèle de cette forme correspond à première vue à l'allure générale du nuage de points. Toutefois, une SCR (*somme des carrés des résidus*, c.f. section 2.5.2.3) élevée indique que ce modèle n'est pas satisfaisant. Nous remarquons en outre que le modèle, pour les valeurs les plus élevées de $\int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$, se détache nettement de la tendance adoptée par le nuage de points, pourtant compact sur ce domaine.

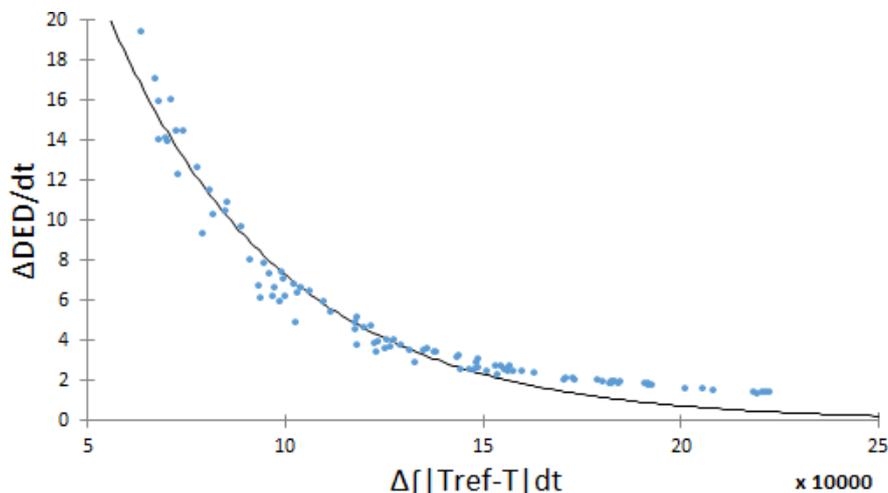


FIGURE 3.30 – Régression non linéaire sur $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$

De la même façon que pour les surfaces de réponse précédemment construites, l'utilisation du logarithme népérien de $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ permet d'améliorer ce point en réduisant significativement la SCR (de ≈ 75 à ≈ 38 , dans le cas du palier haut). Dans une moindre mesure, l'EQM est également réduite (de $\approx 0,8$ à $\approx 0,4$).

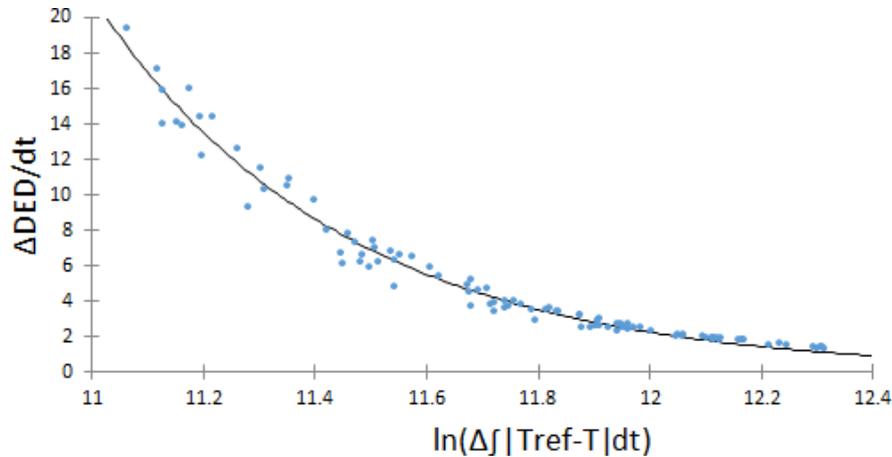


FIGURE 3.31 – Régression non linéaire sur le logarithme de $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$

D'autres méthodes (polynomiales ou hyperboliques) ont été testées sans parvenir à améliorer ces résultats. Toutefois, nous n'avons jusqu'à présent cherché à calculer que des régressions simples, à savoir exprimer la DED en fonction d'une unique variable ($\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$, elle-même calculée à partir des paramètres de chargement). Or, nous disposons de plusieurs données, certes prises en compte dans le calcul de $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$, mais qu'il est envisageable d'utiliser telles quelles : la durée de la phase étudiée, les valeurs des extrêmes de température et le taux de variation de température, qui découle des trois paramètres précédents. Dans le cas de l'étude d'un palier, le taux de variation de température est nul. Il est donc peu pertinent de le considérer. De même, il n'est pas utile de considérer la température minimale pour l'étude d'un palier haut, ni la température maximale pour celle d'un palier bas. Nous obtenons donc deux potentielles variables explicatives supplémentaires : la durée d'un palier et sa température.

Dans la suite de cette section, les cas du palier haut et du paliers bas sont traités séparément, en raison des différences de résultats obtenus.

Palier de température haut ($T \in [157, 5; 192, 5]$)

Une première régression bilinéaire est calculée à partir de ces deux variables supplémentaires, mais est écartée car inadaptée. La matrice des corrélations, présentée en figure 3.32, met en évidence que la température de palier a une corrélation linéaire moins importante que la durée du palier avec l'incrément de DED.

Matrice de corrélation :			
	t_{palier}	T_{palier}	$\Delta \text{DED}/dt$
t_{palier}	1	-0.005	-0.842
T_{palier}	-0.005	1	0.261
$\Delta \text{DED}/dt$	-0.842	0.261	1

FIGURE 3.32 – Matrices des corrélations

D'autres régressions multiples sont construites en prenant en compte la variable $\Delta \int |T_{ref} -$

$T(\tau)|d\tau$ de différentes façons (dépendance linéaire ou exponentielle décroissante) sans améliorations. Le modèle multiple donnant les meilleurs résultats est décrit par l'équation suivante :

$$\Delta\text{DED}/dt = k_1 + k_2 t_{\text{palier}} + k_3 T_{\text{palier}} + k_4 \ln\left(\Delta \int |T_{\text{ref}} - T(\tau)| d\tau\right) \quad (3.17)$$

Où :

- Les k_i sont des constantes définies sur \mathbb{R}
- T_{palier} est la température du palier
- t_{palier} est la durée du palier

Les indicateurs de qualité de la surface de réponse montrent cependant que ce modèle à variables multiples reste moins bon que celui obtenu avec la seule variable $\Delta \int |T_{\text{ref}} - T(\tau)| d\tau$ (c.f. figure 3.31). C'est donc un modèle décrit par l'équation 3.18 qui est retenu.

$$\frac{\Delta\text{DED}}{dt} = k_1 \left(\Delta \int |T_{\text{ref}} - T(\tau)| d\tau\right)^{k_2} \quad (3.18)$$

Remarquons qu'en enlevant la dépendance à la température de palier, la SCR et l'EQM doublent : malgré une corrélation relativement faible avec la DED, cette variable joue donc un rôle non négligeable dans le modèle.

Palier de température bas ($T \in [-71, 5; -58, 5]$)

Une régression bilinéaire est tout d'abord construite à l'aide de T_{palier} et t_{palier} . Bien que ce modèle ne s'avère pas satisfaisant, la matrice des corrélations montre que pour le palier bas comme pour le palier haut, la température a une corrélation linéaire moins forte avec l'incrément de ΔDED que la durée du palier (c.f. figure 3.32).

Matrice de corrélation :			
	t_{palier}	T_{palier}	$\Delta\text{DED}/dt$
t_{palier}	1	-0.014	-0.908
T_{palier}	-0.014	1	0.159
$\Delta\text{DED}/dt$	-0.908	0.159	1

FIGURE 3.33 – Matrices des corrélations

Les meilleurs résultats sont obtenus avec une régression multiple, en combinant une régression bilinéaire pour les variables T_{palier} et t_{palier} et une régression non linéaire pour $\Delta \int |T_{\text{ref}} - T(\tau)| d\tau$. Nous obtenons une expression de $\Delta\text{DED}/dt$ de la forme suivante :

$$\Delta\text{DED}/dt = k_1 + k_2 t_{\text{palier}} + k_3 T_{\text{palier}} + k_4 \left(\Delta \int |T_{\text{ref}} - T(\tau)| d\tau\right)^{k_5} \quad (3.19)$$

Avec $k_{1,2,3,4}$ des constantes définies sur \mathbb{R} et k_5 sur \mathbb{R}_+ . La SCR de ce modèle (≈ 67) est sensiblement meilleure que celle du modèle utilisant seulement $\Delta \int |T_{\text{ref}} - T(\tau)| d\tau$ (≈ 89) et l'EQM est également légèrement améliorée (respectivement $\approx 0,7$ et $\approx 0,9$). Une fois de plus, malgré une corrélation faible avec la grandeur d'intérêt qui pourrait laisser penser que cette variable est peu pertinente, on constate une hausse de ces indicateurs lorsque la température de palier n'est pas prise en compte dans le modèle.

La figure 3.34 permet d'évaluer l'adéquation entre les données et le modèle associé, pour le palier haut et le palier bas..

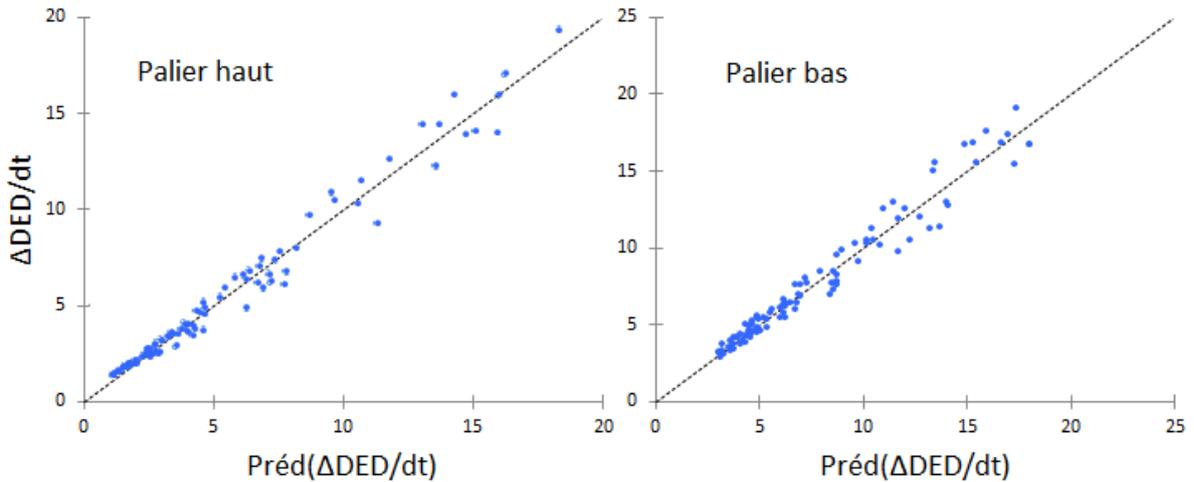


FIGURE 3.34 – Graphe des prédictions-observations

3.3.3.3 Transitions

Afin de déterminer la meilleure surface de réponse pour les phases de variation de température durant le cycle, nous procédons de la même façon que dans le cas des paliers : en premier lieu, un modèle liant $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ à l'accroissement de la DED est recherché. Puis, nous utiliserons les paramètres du cycle pour construire une régression à paramètres multiples.

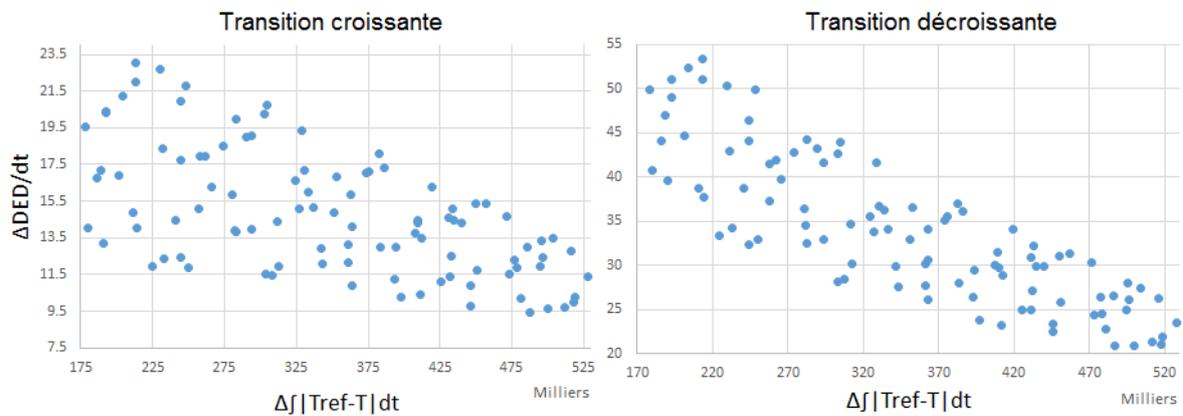


FIGURE 3.35 – DED et $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$: nuages de points

L'observation du nuages de données en figure 3.35 nous permet d'avancer qu'un modèle reposant sur la seule variable $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ ne sera pas suffisant. Ceci est confirmé par les différentes méthodes essayées et qui ne permettent pas de calculer un modèle représentant convenablement ces séries de données. Ainsi, d'autres variables explicatives sont nécessaires : les températures minimale et maximale de transition (respectivement $T_{min} \in [-71,5; -58,5]$ et $T_{max} \in [157,5; 192,5]$) la durée de la transition $t_{transition}$ ainsi que le taux de variation de température sont ajoutés.

Une régression multilinéaire fournit une bonne approximation de la relation recherchée (c.f. 3.36), avec une EQM de l'ordre de 10^{-1} pour la transition croissante et 10^{-2} pour la transition décroissante. La SCR est sensiblement plus élevée (≈ 10 pour la transition croissante et ≈ 16 pour la transition décroissante), mais reste inférieure à celles obtenus pour d'autres modèles. Le R^2_{adj} est supérieur à 0,9 pour les deux cas.

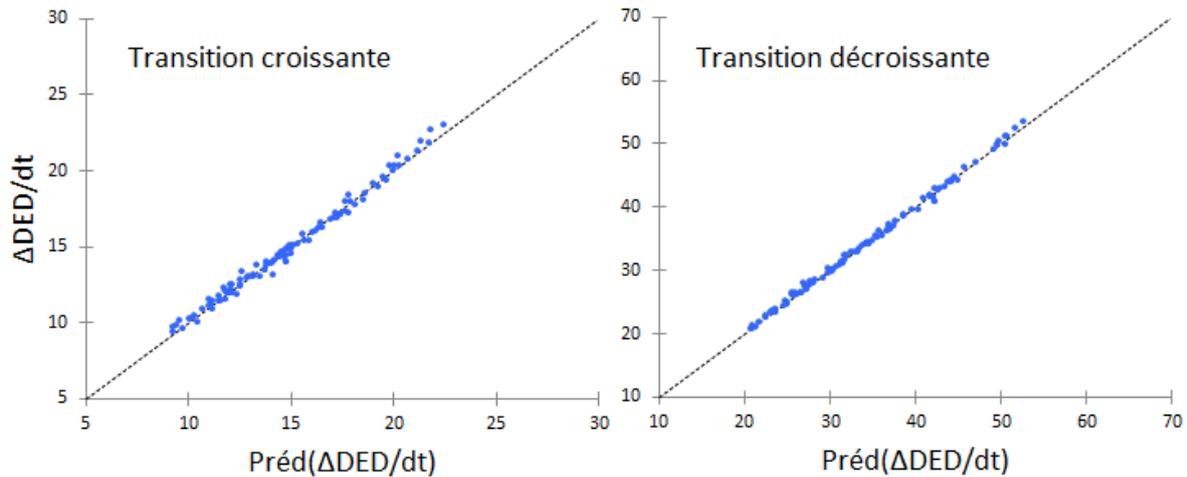


FIGURE 3.36 – Graphe des prédictions-observations

Plusieurs autres méthodes de régression multiples (notamment en ajoutant les termes croisés) ont été utilisées pour tenter de trouver un modèle plus adaptée, mais la régression multilinéaire est celle fournissant les meilleurs résultats. La matrice des corrélations, présentée en figure 3.37, montre une fois encore que la température minimale semble avoir une influence moindre dans le modèle que les autres variables.

Matrice de corrélation :		Transition croissante				
	Temps Cycle	Taux (°C/min)	Tmin	Tmax	$\Delta f T_{ref}-T dt$	$\Delta DED/dt$
Temps Cycle	1	-0.952	-0.014	-0.005	0.995	-0.549
Taux (°C/min)	-0.952	1	-0.034	0.134	-0.956	0.616
Tmin	-0.014	-0.034	1	-0.009	-0.047	-0.061
Tmax	-0.005	0.134	-0.009	1	-0.094	0.806
$\Delta f T_{ref}-T dt$	0.995	-0.956	-0.047	-0.094	1	-0.611
$\Delta DED/dt$	-0.549	0.616	-0.061	0.806	-0.611	1

Matrice de corrélation :		Transition décroissante				
	Temps Cycle	Taux (°C/min)	Tmin	Tmax	$\Delta f T_{ref}-T dt$	$\Delta DED/dt$
Temps Cycle	1	-0.952	-0.014	-0.005	0.995	-0.790
Taux (°C/min)	-0.952	1	-0.034	0.134	-0.956	0.849
Tmin	-0.014	-0.034	1	-0.009	-0.047	0.054
Tmax	-0.005	0.134	-0.009	1	-0.094	0.592
$\Delta f T_{ref}-T dt$	0.995	-0.956	-0.047	-0.094	1	-0.837
$\Delta DED/dt$	-0.790	0.849	0.054	0.592	-0.837	1

FIGURE 3.37 – Matrices des corrélations

Toutefois, construire une régression multilinéaire en omettant cette variable dégrade le modèle, comme dans les cas précédents.

Le modèle retenu (pour les deux transitions, avec des constantes propres à chacune) est donc de la forme :

$$\frac{\Delta \text{DED}}{dt} = k_1 + k_2 t_{trans} + k_3 T_{min} + k_4 T_{max} + k_5 \dot{T} + k_6 \left(\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau \right) \quad (3.20)$$

3.3.4 Analyse des surfaces de réponse

Nous avons retenu quatre modèles, un pour chaque phase d'un cycle, destinés à établir un lien entre l'incrément de densité d'énergie de déformation plastique d'un joint d'assemblage avec les paramètres qui la définissent. Plusieurs modèles ont été construits et comparés, afin de sélectionner celui qui correspond le mieux à la série de données à modéliser.

À l'aide de l'intégrale $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$, nous avons tout d'abord construit une expression approchée de ΔDED pour les paliers à température constante. L'allure générale des nuages de points permet d'orienter le choix vers une régression de forme exponentielle. En l'appliquant au logarithme de $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$, on parvient à améliorer les indicateurs de qualité du modèle, même si la somme des carrés des résidus reste élevée, signifiant que certains points expérimentaux sont mal expliqués par le modèle. Ceci peut s'expliquer par le choix d'étudier les phases de cyclage indépendamment les unes des autres, plutôt que de traiter l'évolution globale de la DED au cours du cyclage. Cette approche permet de s'intéresser à l'accroissement de la DED lors de régimes de température spécifiques mais fait ressortir les contrastes présents dans les données. Utiliser plus de variables explicatives permet dans certains cas de réduire ces résidus et donc d'améliorer le modèle. C'est la raison pour laquelle la température et la durée du palier ont été incluses dans les modèles suivants. Les régressions multiples présentent des résultats différents selon le jeu de données considéré. Dans le cas du palier bas, les meilleurs résultats sont obtenus avec une régression multiple, linéaire avec les paramètres de palier mais non linéaire par rapport à notre variable $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$. La SCR obtenue est deux fois supérieure à celle de la régression simple, ce qui exclut ce modèle. En ce qui concerne le palier haut, une régression multiple du même type que pour le palier bas (linéaire par rapport à la température et au temps de palier mais non linéaire par rapport à $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$) permet de construire un modèle de meilleure qualité, avec une SCR en baisse de 25%. Pour les deux paliers, les graphes prédictions-observation mettent en évidence que le modèle est meilleur pour des valeurs faibles d'accroissement de DED. Ces points mal prédits expliquent la SCR élevée et l'EQM faible. On peut supposer que pour des variations importantes de DED, certains mécanismes d'endommagement non représentés par nos variables explicatives apparaissent et perturbent la construction d'un modèle. Puisqu'il s'agit de paliers de températures (solicitation constante), on peut notamment mentionner les effets de la viscosité, qui interviennent avec un retard sur la sollicitation qui les a engendrés.

Par la suite, nous avons cherché à modéliser l'accroissement de DED durant les phases de transition de température. Aucun modèle ne reposant sur la seule variable $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ n'a donné de résultats satisfaisants. Une régression multiple a donc été utilisée en ajoutant quatre variables explicatives : les températures minimales, maximales, la durée de transition, ainsi que le taux de variation de température. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une régression multilinéaire. Contrairement au cas des paliers, les graphes prédictions-observation sont très homogènes et indiquent que le modèle ne favorise pas

plus un domaine qu'un autre. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que durant une transition de température, les effets linéaires (dilatation thermique, par exemple) prédominent sur les phénomènes non linéaires, favorisant ainsi la construction d'un modèle multilinéaire.

Par ailleurs, nous avons remarqué que la variable T_{min} (qui correspond soit à la température minimale d'une transition, soit à la température de palier basse température) présentait la corrélation la plus faible avec notre variable d'intérêt, $\Delta DED/dt$. Tout d'abord, précisons qu'une corrélation mathématique (ou son absence) ne signifie pas l'existence d'un lien de causalité (ou son absence) [4, 5]. Il s'agit purement d'un lien mathématique entre des séries de données. Nous ne devons pas conclure sur l'influence d'une variable en se basant sur cet outil. Dans le cas qui nous intéresse, nous avons fixé l'intervalle de variation des différentes variables à $\pm 10\%$ autour de leur valeur nominale. Par conséquent, la variable T_{min} est celle qui a le moins d'amplitude de variation. Or, la corrélation de deux variables fait intervenir leur covariance ainsi que leurs écarts-types respectifs. Par conséquent, l'amplitude réduite de T_{min} relativement aux autres variables de contrôle du problème (T_{max} et T_{palier}) a un impact sur sa corrélation avec $\Delta DED/dt$. Cela explique également pourquoi malgré cette faible corrélation, les indicateurs de qualité des différentes surfaces de réponse sont impactés négativement lorsqu'on ignore T_{min} : cette variable a un impact plus important sur le modèle que ce que sa corrélation avec la variable d'intérêt ne suggère.

3.3.5 Modèles d'accroissement de la densité d'énergie de déformation

Les surfaces de réponse précédemment construites nous permettent de calculer l'incrément de la DED à partir des conditions de températures rencontrées par l'assemblage. Nous pouvons considérer tout chargement comme un enchaînement de quatre régimes élémentaires, et le taux d'accroissement de la DED est donné par l'un des modèles qui y est associé. Pour réaliser le suivi de vieillissement de notre assemblage d'étude (c.f. section 2.3.1), une unité de calcul embarquée peut exploiter ces modèles pour calculer la DED à partir de mesures de température.

Si $\dot{T} = 0$ et $T \in [157, 5; 192, 5]$, le taux d'accroissement de DED est défini par :

$$\frac{\Delta DED}{dt} = k_1 \left(\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau \right)^{k_2} \quad (3.21)$$

Les constantes k_i sont données dans le tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 – Coefficients de régression – Palier haut

k_1	k_2
$1,05 \times 10^{12}$	-2,24

Si $\dot{T} = 0$ et $T \in [-71, 5; -58, 5]$, le taux d'accroissement de DED est défini par :

$$\frac{\Delta DED}{dt} = k_1 + k_2 t_{palier} + k_3 T_{palier} + k_4 \left(\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau \right)^{k_5} \quad (3.22)$$

Où T_{palier} et t_{palier} sont respectivement la température et la durée du palier. Les constantes k_i sont données dans le tableau 3.2.

TABLEAU 3.2 – Coefficients de régression – Palier bas

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
-47,96	$6,06 \times 10^{-3}$	$9,03 \times 10^{-2}$	$1,69 \times 10^4$	-0,44

Si $\dot{T} > 0$ et $T \in [-71, 5; 192, 5]$, le taux d'accroissement de DED est défini par :

$$\frac{\Delta \text{DED}}{dt} = k_1 + k_2 t_{trans} + k_3 T_{min} + k_4 T_{max} + k_5 \dot{T} + k_6 \left(\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau \right) \quad (3.23)$$

Les constantes k_i sont données dans le tableau 3.3.

TABLEAU 3.3 – Coefficients de régression – Transition croissante

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
-51,63	$-5,37 \times 10^{-2}$	0,16	0,50	-0,28	$2,50 \times 10^{-4}$

Si $\dot{T} < 0$ et $T \in [-71, 5; 192, 5]$, le taux d'accroissement de DED est défini par :

$$\frac{\Delta \text{DED}}{dt} = k_1 + k_2 t_{trans} + k_3 T_{min} + k_4 T_{max} + k_5 \dot{T} + k_6 \left(\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau \right) \quad (3.24)$$

Les constantes k_i sont données dans le tableau 3.4.

TABLEAU 3.4 – Coefficients de régression – Transition décroissante

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
-71,61	$-9,22 \times 10^{-2}$	0,52	0,84	0,76	$4,29 \times 10^{-4}$

3.3.6 Conclusions sur l'approche décomposée

À l'aide d'un second plan d'expériences, nous avons cherché à caractériser l'évolution de la densité d'énergie de déformation plastique d'un joint d'assemblage en distinguant des différentes étapes du cyclage. Différents modèles ont été comparés afin d'obtenir une approximation de la relation entre l'incrément de DED et les conditions de température imposées à l'assemblage.

La variable $I_{\Delta T}$, introduite dans la première partie de ce chapitre, a été modifiée pour accommoder le changement de stratégie d'analyse mis en place dans ce second plan d'expériences, ce qui a conduit à exploiter son incrément au court du temps. Les quatre phases d'un cycle ont été analysées séparément pour établir le lien entre cet incrément et les conditions de températures propres à chacune de ces phases.

En premier lieu, les paliers de température ont été étudiés. Les résultats obtenus montrent que pour des taux d'accroissement élevés de DED, les modèles obtenus ne sont pas parfaitement adaptés. Pour construire des modèles plus complets, représentant mieux ce comportement, comprendre les phénomènes en jeu est essentiel. On peut par exemple

supposer qu'une relaxation de contraintes intervient durant les paliers, ce qui fait nécessairement intervenir l'historique de température de l'assemblage : à temps et température de palier constant, un assemblage ayant subi une importante variation de température sur un temps court sera endommagé de manière différente qu'un autre assemblage ayant subi une variation de température plus faible sur un temps plus long. Il est donc nécessaire d'introduire un couplage entre les conditions du paliers et celles rencontrées précédemment pour parvenir à prendre en compte ces effets dans un modèle d'évolution de l'accroissement de la DED.

Dans un second temps, les transitions de température ont été modélisées à l'aide d'une régression multilinéaire. Le fait qu'un modèle multilinéaire soit le plus adapté pour caractériser ces phases du cycle vient conforter l'hypothèse émise lors de l'analyse des paliers de température : lors des transitions, les effets de la thermoélasticité (linéaires avec la température) masquent ceux de la viscosité du joint d'assemblage, ce qui explique la bonne adéquation d'un modèle linéaire durant une transition, mais pas dans le cas d'un palier de température.

En outre, en observant les matrices de corrélation des différents modèles, nous avons constaté que la variable T_{min} présentait une corrélation faible avec la variable d'intérêt $\Delta DED/dt$ sans que son influence sur le modèle soit marginale. Il s'agit vraisemblablement d'un biais lié à l'amplitude de variation relativement faible de cette variable, ce qui remet en question le choix (arbitraire) d'une variation de $\pm 10\%$.

Enfin, remarquons que la démarche proposée telle que nous l'avons appliquée dans cette partie ne donne pas d'information sur la DED durant un palier entre $-58,5^\circ\text{C}$ et $157,5^\circ\text{C}$. Cela signifie qu'un hypothétique chargement comportant un palier de température à 25°C est en dehors des espaces de définition des modèles que nous avons établi, et souligne l'influence du choix du chargement sur les domaines de validités des surfaces de réponse.

3.4 Suivi de vieillissement

Cette section a pour objectif de proposer une démarche permettant d'exploiter les différents modèles construits et présentés dans les parties précédentes. Il s'agit de la forme que pourrait prendre une solution de suivi de vieillissement reposant sur des mesures de capteurs embarqués dans un module de puissance.

Le processus présenté s'articule autour de deux phases : la première est constituée de l'ensemble des travaux de modélisation, de simulation et d'analyse des données préalables à la réalisation du suivi de vieillissement à proprement parler. Ce sont essentiellement les concepts et outils utilisés pour cette première étape qui ont été présentés et justifiés dans ces travaux. La seconde partie consiste à exploiter les données acquises lors de l'étude préliminaire afin de caractériser l'évolution de notre indicateur de vieillissement lorsque l'assemblage est soumis à une utilisation.

Au cours de la description des différentes étapes, les prérequis, les hypothèses considérées ou les limitations qui peuvent exister seront détaillés afin de souligner les nombreux axes d'amélioration susceptibles d'enrichir le concept de cette approche.

3.4.1 Étude préalable

Pour parvenir à suivre le vieillissement de l'assemblage, nous devons tout d'abord construire le lien entre l'indicateur de vieillissement et les mesures permettant le suivi, à la manière de ce que nous avons cherché à faire dans les sections 3.2 et 3.3. Ce lien est propre à chaque assemblage et doit donc être construit pour tout ensemble de composant, substrat, joint d'attache et boîtier, car chaque élément est susceptible de l'impacter.

3.4.1.1 Modélisation de l'assemblage

En tout premier lieu, l'assemblage doit être modélisé. Cette modélisation est le support de calcul de tous les modèles numériques nécessaires pour réaliser le suivi de vieillissement. Il revêt par conséquent une importance particulière. Cette étape correspond à la mise en place du modèle thermomécanique de notre assemblage (c.f. section 2.3.2).

La géométrie de l'assemblage dont on souhaite suivre le vieillissement doit être représentée. Rappelons que tous les surfaces de réponse construites par la suite sont destinées à caractériser l'évolution de la densité d'énergie de déformation du joint d'attache en fonction des températures rencontrées par l'assemblage. Le choix de ne pas représenter ni le câblage ni le packaging découle donc du fait que ces éléments ne jouent pas de rôle direct dans l'évolution de la DED, mais uniquement sur celle de la température au sein du module qui elle, régit l'accumulation des dommages.

Le choix du type et de la finesse du maillage ainsi que les conditions limites ont aussi une importance fondamentale. Ils doivent permettre de tirer partie de la géométrie pour garantir une efficacité maximale lors de la résolution du modèle sans entraîner de perte d'informations dans les résultats. Notons que l'utilisation de la moyenne des résultats sur plusieurs éléments de maillage permet de limiter l'influence de la taille des éléments sur les résultats (c.f. section 3.1.3).

Les propriétés des matériaux représentent probablement l'aspect le plus critique du modèle de l'assemblage. Nous avons mentionné les différents modèles utilisés pour décrire les matériaux (c.f. section 2.3.2.3), en particulier l'argent fritté qui constitue le joint d'assemblage. Ce matériau présente une loi de comportement complexe à caractériser, que nous avons fait le choix d'approximer à l'aide du modèle d'Anand et sur lequel repose le calcul de la densité d'énergie de déformation plastique. Toutefois, ce modèle est incomplet pour décrire le vieillissement en fatigue de ce matériau fortement viscoplastique, et nous avons mis en évidence cette limitation dans les section 2.3.2.3 et 3.1.4. Ainsi, une amélioration du modèle utilisé pour décrire le joint d'attache (qu'il soit fritté ou brasé) a un impact direct sur la précision et la fiabilité des résultats que fournit le modèle thermomécanique de l'assemblage.

Le chargement choisi pour réaliser les simulations représente un essai en cyclage passif. Nous savons que les variations de températures causent une dilatation des différents matériaux de l'assemblage. Cette dilatation n'est pas homogène, puisque les coefficients de dilatation thermique dépendent du matériau. Ces hétérogénéités entraînent l'apparition de contraintes, à l'origine de l'accumulation de la DED. L'hypothèse adoptée est que la source de la chaleur n'est pas critique n'influe pas de manière significative sur l'évolution de la DED au cours du temps : l'endommagement causé par un gradient de température dans l'assemblage est faible devant celui causé par les différences de coefficients de dilatation thermique des matériaux de l'assemblage. Ce choix présente l'avantage de simplifier la mise en place des simulations puisqu'un chargement représentant

un cyclage passif suffit. Modéliser un cyclage en auto-échauffement requiert d'adapter le chargement (génération de chaleur, conditions limites thermiques) à chaque assemblage, tandis que le chargement passif est indépendant de la géométrie considérée.

D'autre part, la définition du chargement a un impact sur le domaine de définition des modèles d'accroissement de la DED. En effet, comme nous l'avons mentionné dans la section 3.3.6, les domaines de définitions des modèles d'accroissement de la DED sont fixés par les intervalles de variation des paramètres du cyclage. Nous avons (arbitrairement) défini ces variations à $\pm 10\%$ autour des valeurs nominales des paramètres du chargement. Puisque nous utilisons ces paramètres pour construire des surfaces de réponse, cela signifie que les modèles construits sont définis sur ces intervalles. Il en découle que le modèle d'accroissement de la DED au cours d'un palier de température n'est défini que sur deux gammes de températures disjointes (correspondant aux intervalles de variation des températures minimales et maximales, $[157,5;192,5]$ et $[-71,5;-58,5]$ dans notre exemple). Ainsi, une température intermédiaire à ces intervalles (soit sur l'intervalle $]-58,5; 157,5[$ dans notre cas) ne peut être interprétée.

Face à cette limitation, deux stratégies sont possibles : soit caractériser les gammes de températures auxquelles sera exposé l'assemblage et adapter le chargement pour qu'il y corresponde, soit modifier l'approche pour permettre de prendre un compte un domaine unique où peuvent intervenir des paliers ou des transitions de température sans distinction. La première solution présente l'avantage de restreindre les intervalles de variation des températures donc de limiter le nombre de points d'expérience, au prix d'une contrainte importante sur la validité du modèle (la gamme de température médiane n'est pas représentée par un modèle d'évolution en palier de température). La seconde solution requiert une augmentation du nombre d'expériences (donc du temps de calcul) pour permettre la construction d'un modèle plus général, décrivant aussi bien un palier qu'une variation sur une gamme de température continue. Le choix de l'une ou l'autre de ces alternatives doit être fait en considérant l'application concernée : si l'on sait par avance qu'aucun palier de température n'aura lieu dans un gamme de température intermédiaire, l'économie du temps de calcul sera généralement préférée. À l'inverse, si une caractérisation d'un palier ou d'une variation de température sur une gamme de température continue est requise, alors il est nécessaire d'élargir le plan d'expérience pour couvrir l'intégralité de cet intervalle, au détriment du coût en calcul.

3.4.1.2 Construction des modèles d'accroissement de la DED

Une fois le modèle éléments finis de l'assemblage mis en place, un plan d'expériences peut être construit pour générer les données à partir desquelles les différentes surfaces de réponse sont calculées. Nous avons mis en évidence, en analysant les surfaces de réponse construites pour nos deux plans d'expériences, que les variables explicatives utilisées pour calculer la DED (ou son accroissement) ont un fort impact sur la précision du modèle. Définir le bon jeu de variables explicatives simplifie considérablement le processus de construction des surfaces de réponse. L'augmentation du nombre de variables peut introduire des biais mathématiques (par exemple l'augmentation du coefficient R^2 mentionné dans la section 2.5.2.3) auxquels il faut prêter une attention particulière et qui incitent à ne considérer que les variables nécessaires.

De plus, les variables introduites dans cette étude pour tenter de caractériser l'accroissement de la DED au cours du vieillissement ne sont pas les seules à avoir un rôle dans le processus d'endommagement. Nous avons ignoré l'aspect vibratoire, mais il est évident

que l'intensité vibratoire d'un environnement a également un impact sur l'endommagement, ainsi que sur la DED critique, dont nous parlons dans la section suivante.

Enfin, rappelons que les modèles construits par la méthode des surfaces de réponse pour déterminer l'évolution d'une grandeur par une ou plusieurs variables ne représente pas un lien de causalité mais décrivent simplement la corrélation mathématique entre des données.

3.4.1.3 Détermination de seuils critiques de DED

Tout l'intérêt d'une approche de suivi de vieillissement est d'être capable d'anticiper la défaillance. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer une valeur de l'indicateur de vieillissement à partir de laquelle on considère que l'équipement doit être remplacé. Nous ne discuterons pas des marges et coefficients de sécurité nécessaires à éviter (de manière statistique) qu'une défaillance ait lieu durant la vie d'un équipement, mais uniquement d'une proposition de méthode pour obtenir la valeur seuil de la DED à laquelle ces marges et coefficients sont appliqués.

L'inconvénient majeur d'une approche énergétique est l'impossibilité, dans un contexte d'application industrielle, à mesurer cette énergie. C'est la raison pour laquelle une analyse par surface de réponse a été employée. Toutefois, cela signifie qu'il n'existe pas de moyen de recalibrer les valeurs obtenues par simulation numérique et celles intervenant lors d'un essai réel. Or, un modèle est nécessairement une description limitée et orientée de la réalité et à ce titre, nécessite d'être comparé à l'expérience pour acquérir un sens (ce qu'on appelle "recaler un modèle"). Pour pouvoir exploiter les modèles que nous avons construits dans ces travaux, il est donc nécessaire d'établir une correspondance entre la défaillance et la DED. Puisqu'il n'est pas possible de mesurer la DED accumulée dans un joint d'assemblage défaillant après un cyclage passif, une méthode de "calque" est proposée pour établir cette correspondance. Dans un premier temps, un essai de cyclage est réalisé pour déterminer le nombre de cycles avant l'apparition d'une défaillance de l'assemblage étudié. Puis ce cycle est modélisé, et la valeur de la DED accumulée à l'issue du nombre de cycles précédemment déterminé peut être considérée comme le seuil de DED correspondant à l'apparition d'une défaillance pour un assemblage donné.

Cependant, une valeur seuil de DED obtenue de cette façon n'a qu'une valeur indicative et ne peut constituer une référence absolue. De la même façon que la transition fragile-ductile est impactée par le taux de déformation et la température, le seuil de DED est vraisemblablement influencée par la gamme de température du cycle et le taux de variation de la température. Une possibilité pour améliorer la fiabilité de cette "mesure" serait d'appliquer cette méthode de détermination pour plusieurs jeux de paramètres de cyclage (températures, taux de variation, temps de palier) pour déterminer une moyenne des valeurs obtenues.

3.4.2 Exploitation des modèles

Une fois que nous avons construit un modèle d'évolution de la DED pour notre assemblage, nous pouvons l'utiliser pour réaliser un suivi de son vieillissement.

Les modèles que nous avons construits dans la section 3.3 (dont un récapitulatif est présenté en section 3.3.5) font appel à plusieurs variables d'entrée : la température du joint d'assemblage (soit du palier, soit la température initiale et finale de transition), la durée associée à cette température, le taux de variation de la température et la valeur de

$\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$. Ces variables résultent de deux informations élémentaires : la température du joint d'attache et le temps. Les étapes proposées ci-après supposent donc que l'on dispose d'un module "intelligent" (équipé de capteurs de température) et d'une unité de calcul embarquée afin de traiter les informations des capteurs. Il est alors possible de calculer, à partir du modèle d'accroissement de la DED alimenté par les mesure de température, l'évolution de la DED au cours de la vie du module (c.f. figure 3.38).

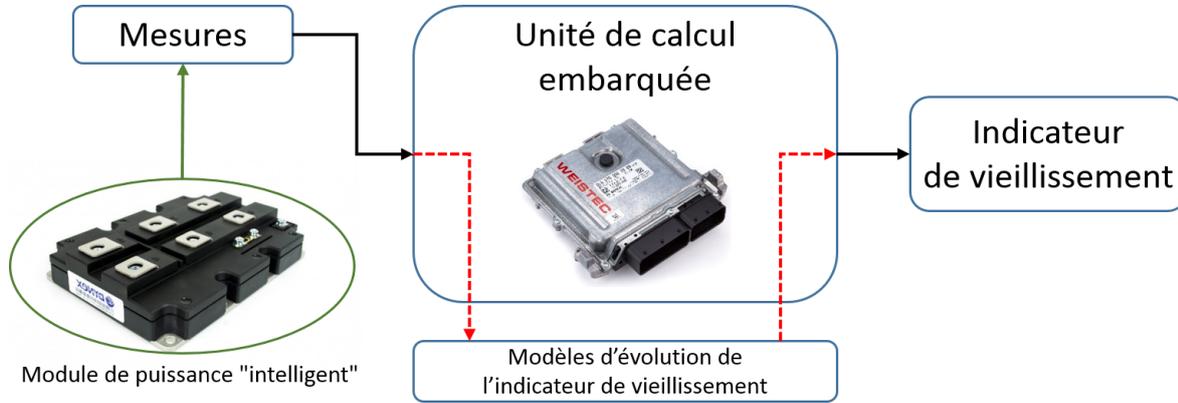


FIGURE 3.38 – Suivi de vieillissement à l'aide de capteurs embarqués

Si l'on est capable de mesurer la température à intervalles réguliers proches, il est possible d'identifier le régime dans lequel l'assemblage se trouve en analysant les données de la courbe de température en fonction du temps. Notons t_i l'instant auquel la dernière mesure de température, notée T_i est effectuée. Un certain historique de mesures est conservé et la température T_{i-1} associée à l'instant t_{i-1} est connue. Par conséquent :

- Si $T_i - T_{i-1} = 0$, alors l'assemblage subit un palier de température
- Si $T_i - T_{i-1} > 0$, alors la température est décroissante
- Si $T_i - T_{i-1} < 0$, alors la température est croissante

Nous pouvons alors employer le modèle adapté pour calculer l'incrément de DED associé à la transformation $T_{i-1} \rightarrow T_i$ et à sommer cet incrément avec la DED accumulée jusqu'à l'instant t_{i-1} . La DED à chaque instant est ainsi obtenue de proche en proche.

Le modèle d'accroissement de la DED pendant un **palier de température** fait appel à la durée du palier, donné par $t_{palier} = t_i - t_{i-1}$ ainsi qu'à la température de palier $T_{palier} = T_i$. Le modèle d'accroissement de la DED associé à une **variation de température** nécessite de connaître :

- La température minimale de la variation $T_{min} = T_i$ ou T_{i-1} selon que la variation est respectivement décroissante ou croissante
- La température maximale de la variation $T_{max} = T_i$ ou T_{i-1} selon que la variation est respectivement croissante ou décroissante
- La durée de la variation $t_{variation} = t_i - t_{i-1}$
- Le taux de variation de température $\dot{T} = \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$
- La valeur de l'intégrale $\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau = \int_{t_{i-1}}^{t_i} |T_{ref} - T(\tau)| d\tau$ qui peut se calculer à partir des variables précédentes par la méthode des trapèzes (c.f. équation 3.16) :

$$\Delta \int |T_{ref} - T(\tau)| d\tau = (t_i - t_{i-1}) \left| T_{ref} - \frac{T_i + T_{i-1}}{2} \right|$$

3.5 Capteurs de température

La démarche présentée dans ce chapitre repose sur la mesure de température de l'assemblage. Pour réaliser ces mesures qui alimentent les modèles caractérisant l'évolution de notre indicateur de vieillissement, nous devons donc disposer de capteurs. C'est la raison pour laquelle nous avons étudié la tenue en vieillissement de capteurs de températures.

Dans le cadre du projet CAPTIF (c.f. section 1.2), nous nous sommes intéressés à des capteurs fournis par la société Nanolike, l'un des partenaires du projet. Cette société conçoit et fabrique des capteurs exploitant les propriétés physiques des nanoparticules. Ces capteurs sont utilisés dans des applications diverses pour réaliser par exemple des mesures de couple, force ou température et allient taille réduite et ultra faible consommation d'énergie. Le rôle de Nanolike dans le projet CAPTIF est d'étudier les solutions que nécessite l'intégration de capteurs au plus proche de l'assemblage et répondre aux besoins en mesures associés à la problématique du projet.

Nanolike et l'IMS ont donc collaboré pour mener une étude de vieillissement de capteurs de températures. L'objectif de ces essais est de caractériser les capteurs, notamment en termes de dérive des mesures dans le temps.

3.5.1 Mise en place des essais

3.5.1.1 Véhicules de test

Les dispositifs testés sont des capteurs de température. Ils sont composés de deux électrodes, entre lesquelles sont tendues des chaînes de nanoparticules d'or constituant la zone active du capteur. Un substrat isolant permet de soutenir cet ensemble et d'éviter les courts-circuits avec le support du capteur. La résistance du capteur est dépendante de sa température, ce qui permet de la déterminer. La figure 3.39 est une représentation de la géométrie d'un capteur.

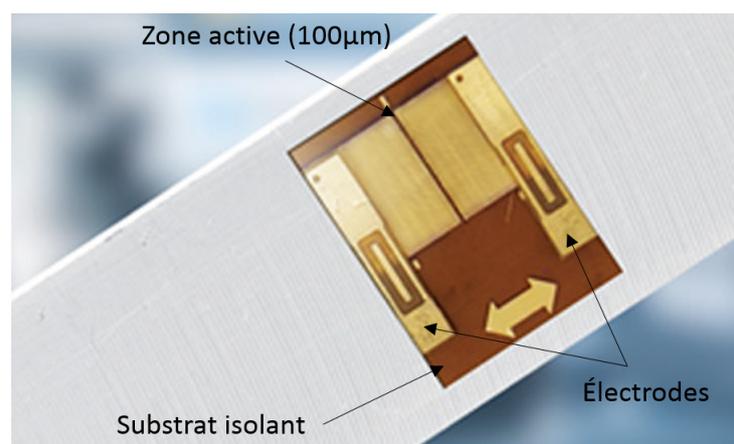


FIGURE 3.39 – Capteur à nanoparticules

Pour les essais de vieillissement, une série de dix capteurs est disposée sur un support en aluminium. En raison de l'impossibilité de braser des fils de mesure directement sur les électrodes, des fils sont reportés sur les électrodes à l'aide d'une colle conductrice puis brasés sur des pads auxquels sont également brasés les fils de mesure. La figure 3.40 présente les capteurs disposés sur leur support, avant vieillissement.



FIGURE 3.40 – Les véhicules de test avant vieillissement

3.5.1.2 Équipements et appareils de mesure

Les capteurs sont soumis à un cyclage passif. Pour réaliser ces essais de vieillissement, une enceinte climatique **Climats Excal 1423-TE** est utilisée (c.f. figure 3.41).



FIGURE 3.41 – Enceinte climatique utilisée Excal 1423-TE

La température à l'intérieur de l'enceinte est enregistrée à l'aide d'un thermocouple de précision. Les valeurs des résistance de chaque véhicule de test est enregistrée à l'aide d'une centrale d'acquisition **Keysight 34970A** (c.f. figure 3.42). Durant toute la durée de l'essai, une mesure sera enregistrée chaque minute.



FIGURE 3.42 – Centrale d’acquisition Keysight 34970A

3.5.1.3 Chargements

Deux vitesses de variation de température vont être appliquées pour deux essais successifs. Le premier essai sera réalisé avec des variations de température de 5°C / min durant 500 cycles, suivi d’un second essai à 10°C / min pour augmenter la sévérité des essais.

La tenue en température des véhicules de tests ayant déjà été validée jusqu’à 65°C, nous imposerons une température maximale de 60°C. La température minimale est fixée à -55°C et lors des paliers, la température est maintenue constante durant 20 minutes. La figure 3.43 présente la température relevée dans l’enceinte climatique (à l’aide d’un thermocouple) durant le premier essai.

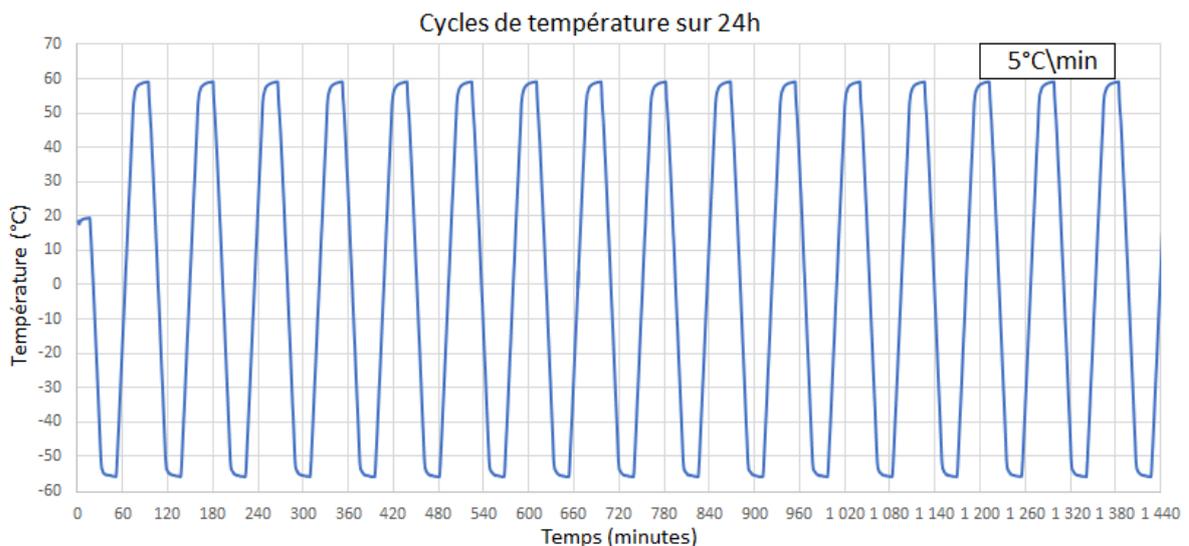


FIGURE 3.43 – Température imposée aux capteurs durant le vieillissement

3.5.2 Résultats des essais

Après l’enregistrement, les données doivent être traitées avant de pouvoir exprimer les résistances relevées sur les véhicules de test sous forme de température. En effet, la relation liant la résistance R d’un capteur à la température est de la forme :

$$T = \frac{1}{A + B \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + C \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)^2 + D \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)^3} - 273,15 \quad (3.25)$$

Où A, B, C et D sont des constantes à définir pour chaque résistance⁴.

4. Le protocole de calibration de ces constantes n’est pas connu : elles ont été déterminées par Nanolike pour chaque capteur avant d’être transmises à l’IMS.

3.5.2.1 Vieillessement à 5° / min

Les courbes de température données par l'ensemble des capteurs sur les premières vingt-quatre heures d'essai sont représentées en figure 3.44.

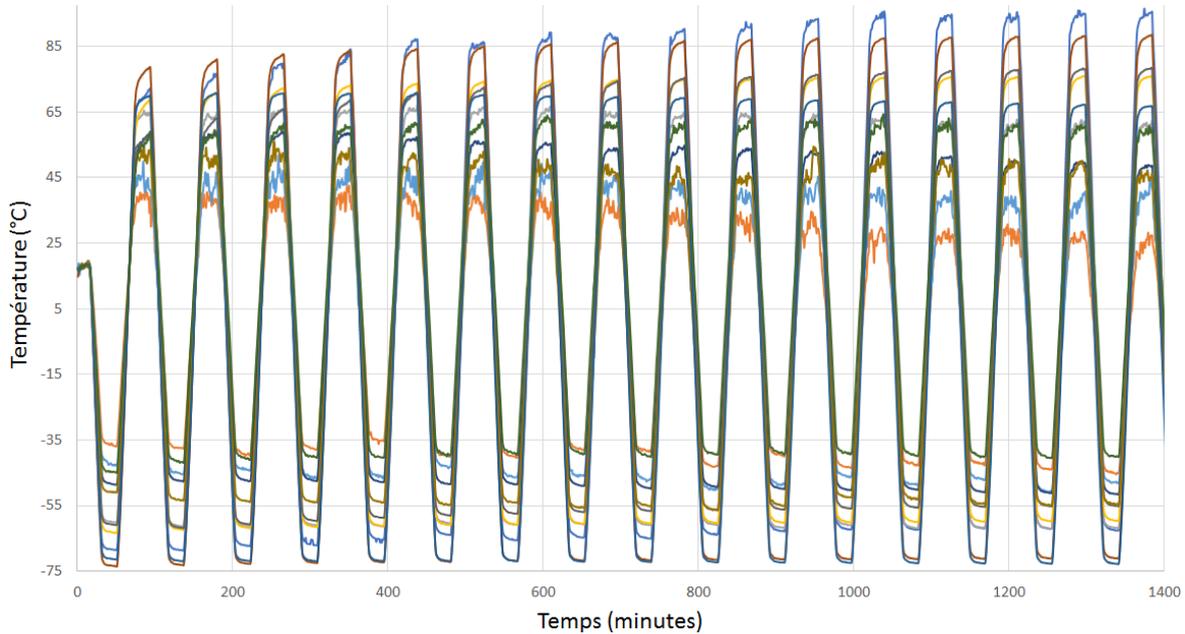


FIGURE 3.44 – Cyclage de capteurs à 5° / min

Nous pouvons déjà remarquer une importante dispersion des valeurs de température indiquées par les capteurs. D'autre part, certains véhicules de test dérivent dès les premiers cycles. Les capteurs dont sont issues les mesures présentées en figure 3.45 sont inexploitable en raison de signaux trop instables durant les paliers de températures.

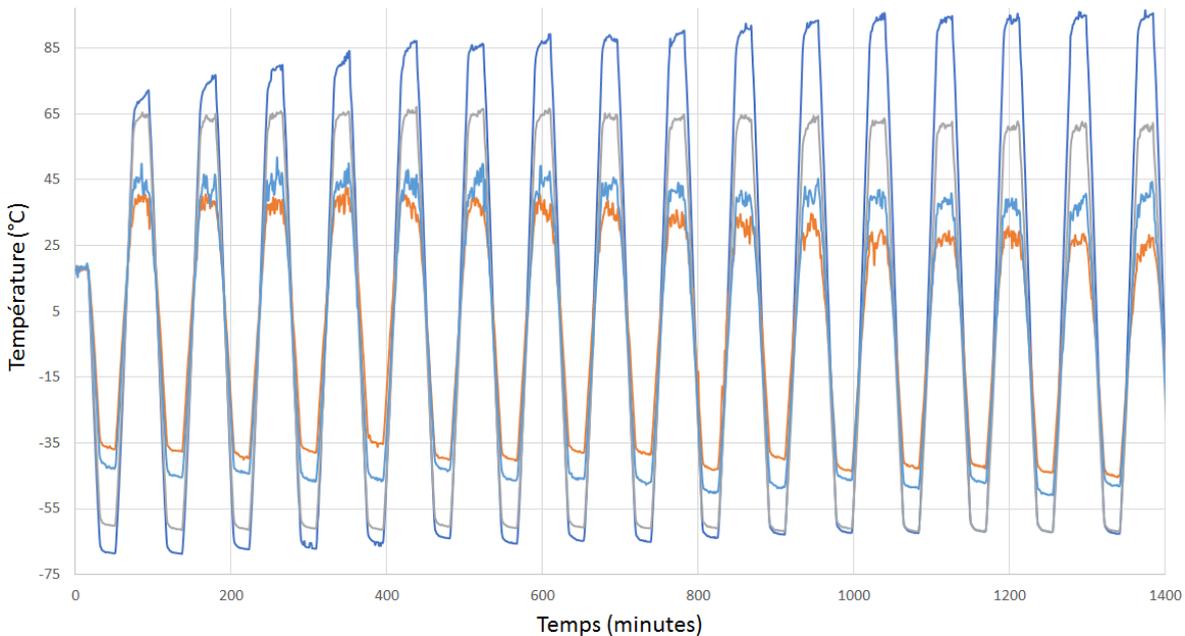


FIGURE 3.45 – Signaux de véhicules de test défaillants

Les capteurs dont les mesures sont illustrés en figure 3.46, présentent une dérive positive au cours des cycles. On constate une augmentation de 9,8°C et 19,5°C après quinze cycles, soit une dérive moyenne respective de 0,65°C et 1,3°C par cycle.

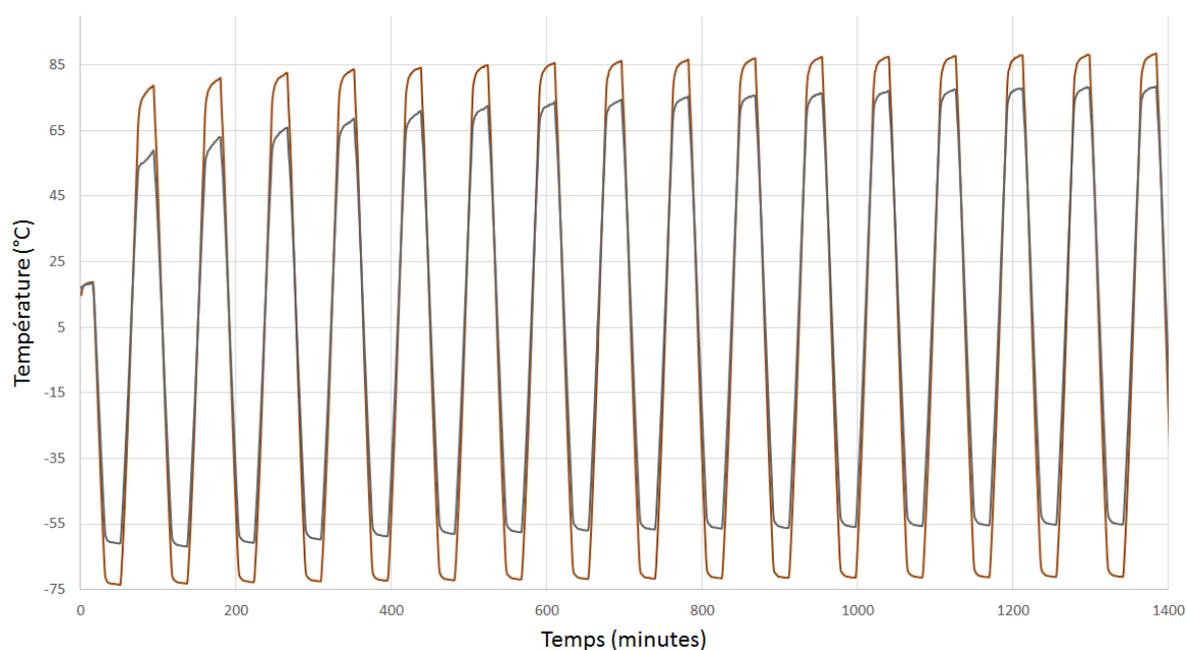


FIGURE 3.46 – Dérive des véhicules de test

Si l'on s'intéresse à l'évolution sur le long terme de $\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$ pour ces mêmes capteurs, on constate que cette dérive n'est pas seulement liée aux début des essais, mais se poursuit sur le long terme (c.f. 3.47). Elle semble toutefois plus marquée au tout début de l'essai qu'à la fin, où la tendance se stabilise.

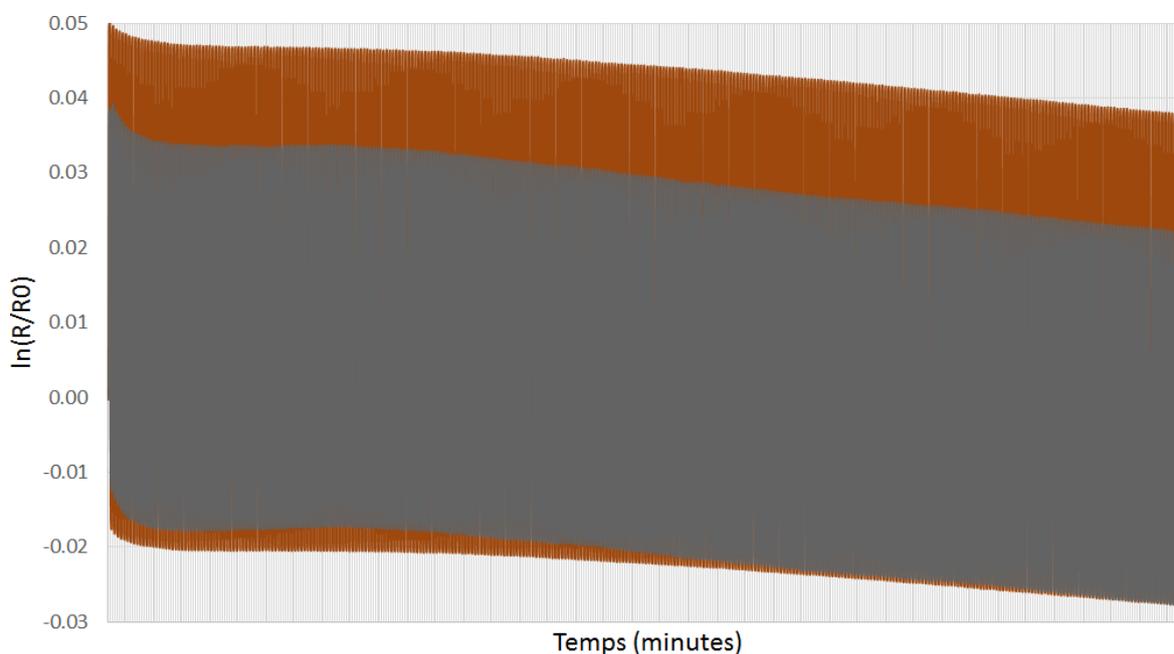


FIGURE 3.47 – Dérive sur 20 jours

Les meilleurs résultats sont obtenus sur les véhicules de test dont les relevés sont présentés en figure 3.48. Ces capteurs présentent également une dérive, mais plus faible que les précédents : respectivement $+7,4^{\circ}\text{C}$ et $-2,8^{\circ}\text{C}$ après quinze cycles, soit une dérive de $+0,49^{\circ}\text{C}$ et $-0,18^{\circ}\text{C}$ par cycle.

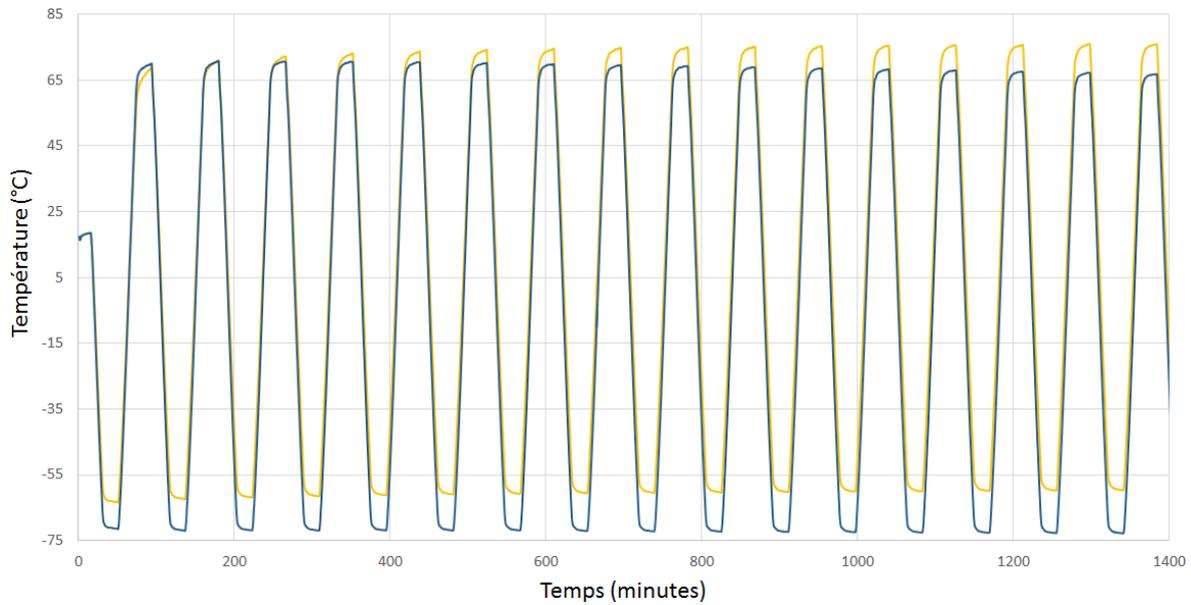


FIGURE 3.48 – Dérive des véhicules de test

Après concertation avec le fabricant des capteurs, l'explication la plus probable aux dérives observées est liée à l'encapsulation. En effet, la zone active du capteur est très sensible à l'humidité et un défaut de protection peut fausser les valeurs qu'ils renvoient.

3.5.2.2 Vieillessement à 10° / min

Après ces cycles VLT (variation lente de température) à 5°C par minute, les véhicules de test sont soumis à cinq cent nouveaux cycles de VRT (variation rapide de température) à 10°C par minute. Les courbes de température données par des véhicules de test pour les premières vingt-quatre heures d'essai sont données en figure 3.49.

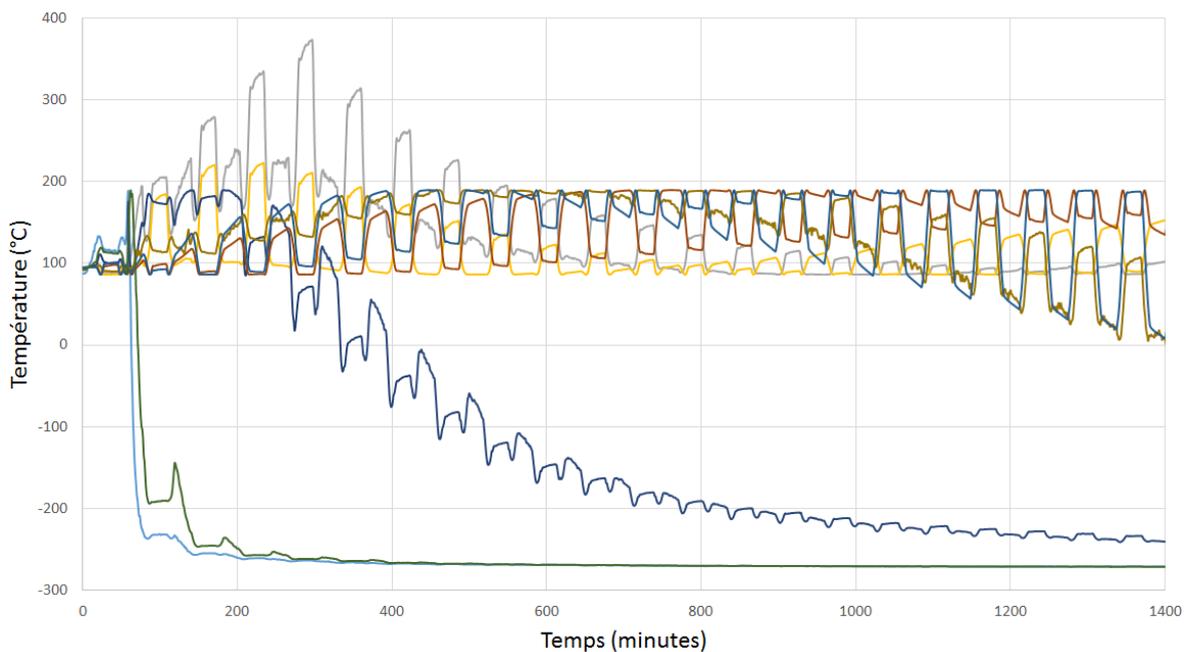


FIGURE 3.49 – Cyclage de capteurs à 10° / min

D'importantes déviations sont observées dès le premier cycle, ce qui signifie que les véhicules de test n'ont pas supporté le vieillissement en VRT. Contrairement aux déviations observées lors des cycles en VLT, celles observées en VRT ne peuvent pas être expliquées uniquement par des problèmes d'encapsulation et signifient donc que les capteurs sont défaillants après la VRT.

3.5.3 Bilan sur les capteurs

Nous avons soumis des capteurs de température à nanoparticules à deux essais de vieillissement pour évaluer leur capacité à répondre aux besoins associés au suivi de vieillissement.

Tout d'abord, un essai en variation lente de température (à 5°C par minute) a été mené. Nous avons pu constater une dérive des mesures au cours de cinq cent cycles. Le comportement de certains capteurs font penser à un défaut d'encapsulation. Compte tenu de la proximité avec la température maximale admissible par le capteur (température maximale du cycle : 60°C; température maximale admissible du capteur : 65°C), il est probable que ces déviations soient également liées à la vitesse de variation de la température (en plus d'un potentiel défaut d'encapsulation). En effet, la tenue maximale en température a été obtenue par des essais en quasi statique (de l'ordre de 0,5°C par minute). Une variation plus rapide de la température tend à faire diminuer cette valeur maximale. Un second essai à 10°C par minute a été réalisé par la suite. Très rapidement, les capteurs se sont montrés défaillants.

Cette technologie de capteur à nanoparticules se révèle donc inadaptée à des applications hautes températures et impliquant les variations de températures rencontrées lors d'essais de vieillissement habituellement pratiqués en l'électronique de puissance. Ils ne présentent donc pas une solution satisfaisante pour fournir les mesures nécessaires à l'exploitation des modèles que nous avons construits pour réaliser le suivi de vieillissement d'un assemblage. Afin de réaliser une mesure de température de l'assemblage, il est par exemple possible d'utiliser un capteur intégré à la puce, sous la forme d'une jonction dédiée à la mesure.

3.6 Conclusion

Après avoir présenté les outils et concepts utiles à la mise en place de notre démarche de modélisation, nous les avons appliqués à un assemblage pour proposer une réponse à la problématique du suivi de vieillissement d'un assemblage d'électronique de puissance.

La stratégie choisie pour notre première application a été de caractériser l'évolution globale de la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'assemblage au cours de plusieurs cycles, à partir des paramètres du cyclage, et de déterminer l'influence de ces paramètres sur la forme de cette expression. Deux analyses par surfaces de réponse successives ont donc été employées : la première pour déterminer la forme fonctionnelle de la DED en fonction d'une variable explicative, et la seconde afin de trouver l'expression des paramètres de ce premier modèle en fonction des paramètres du cyclage.

Une variable explicative a été construite spécifiquement pour faciliter le calcul des modèles. Compte tenu du profil d'évolution strictement croissant de la DED, utiliser une grandeur ayant la même monotonie rend cette tâche bien plus simple et fournit de meilleurs résultats qu'en utilisant des grandeurs comportant une composante cyclique. C'est pour-

quoi nous avons introduit des formes intégrées de la déformation et de la température au cours du cycle. À partir de ces nouvelles variables explicatives, nous avons pu construire des surfaces de réponse et proposer une première expression générale de la DED au cours du temps en fonction des paramètres du cyclage. Les résultats obtenus conduisent à supposer la présence d'un régime transitoire qui perturbe la construction des modèles. De plus, nous avons observé que les données oscillent autour du modèle d'évolution de la DED. Ces variations de faible amplitude ne sont pas prises en compte convenablement dans les modèles et suggèrent de ne plus s'intéresser à une expression globale de la DED, mais plutôt de caractériser son évolution pour chaque phase du cyclage indépendamment des autres.

Ainsi, pour notre seconde application nous avons dissocié les différentes étapes présentes dans un cycle pour mieux caractériser les régimes d'évolution de la DED qui y correspondent : deux paliers (haut et bas) et deux variations (croissante et décroissante) de température. Les résultats obtenus à l'aide du premier plan d'expériences ont également révélé un besoin de variables explicatives supplémentaires. Chaque régime est donc caractérisé par sa (ou ses) température(s) propre(s) ainsi que sa durée, qui a été prise en compte dans le calcul des nouvelles surfaces de réponse.

L'étude des régimes constants (paliers de température) a mis en évidence que durant ces phases, nos modèles représentent mieux les variations lentes de DED. Au contraire, lorsque la DED varie rapidement, les prédictions de nos modèles sont moins fiables. L'hypothèse émise pour expliquer ces phénomènes repose sur la manifestation de phénomènes non linéaires qui deviendraient prédominants lors de ces variations rapides. On peut également supposer que cette moindre qualité des modèles est liée à un manque de variables explicatives représentant ces phénomènes. Nous pouvons par exemple citer les effets de la viscosité et l'influence de la phase de transition précédant un palier. En conséquence, une étude plus approfondie des conditions à l'origine de ces variations qui expliquent la variabilité de cet accroissement de DED pourrait permettre d'identifier des éventuelles variables manquantes, et donc de mieux modéliser l'accroissement de la DED au cours d'un palier de température.

À l'inverse, les surfaces de réponse construites pour décrire l'accroissement de la DED lors d'une variation de température se sont révélées plus simples que celles des paliers de température. Les modèles obtenus sont de qualité satisfaisante sur tout leur domaine de définition et approximent les données d'expérience avec des écarts contenus et homogènes. Ceci tend à soutenir l'hypothèse émise sur l'apparition de phénomènes non linéaires durant les paliers de température : lors des variations de température, les phénomènes de thermoélasticité prédominent, ce qui explique la linéarité des modèles correspondant à ces régimes. C'est la viscosité du matériau, phénomène non linéaire, qui devient dominant au cours d'un palier et requiert l'introduction de non linéarités dans les modèles.

Cette seconde mise en application a permis de mettre en évidence les limitations ainsi que certains axes d'amélioration de notre approche. Celle-ci se décompose en deux étapes majeures. Premièrement, une étude de l'assemblage nécessaire à la construction des modèles d'accroissement de la densité d'énergie de déformation du joint d'assemblage, qui correspond aux deux applications présentées dans les sections 3.2 et 3.3. Puis, l'exploitation de ces modèles pour suivre l'accroissement de notre indicateur de vieillissement au cours de la vie de l'assemblage.

Les travaux préalables à la mise en pratique du suivi de vieillissement font intervenir la modélisation de l'assemblage, de ses matériaux et de son chargement. La mise en place

de ces éléments dans une modélisation introduit plusieurs approximations qui impactent la validité des modèles d'accroissement de la DED que nous cherchons à construire. Deux de ces approximations, les plus importantes, concernent les propriétés du joint d'attache ainsi que les domaines de définitions des modèles. La loi de comportement du matériau constituant le joint d'attache est décrite par un modèle. Nous avons choisi le modèle d'Anand, bien qu'il ne soit pas tout à fait adapté à l'étude de l'endommagement du matériau dû à la fatigue mécanique. Ainsi, le choix du modèle de loi de comportement a un impact très important sur le calcul de la DED du joint d'attache, et constitue le plus important des axes d'amélioration. En outre, le choix des gammes de température utilisées pour le chargement définit les domaines de définition du modèle d'accroissement de la DED, puisque celui-ci est calculé à partir des températures du chargement. Par conséquent, le chargement doit être défini en adéquation avec les gammes de températures auxquelles l'assemblage dont on souhaite suivre le vieillissement est susceptible d'être exposé.

Les modèles construits lors de cette phase d'étude préparatoire sont ensuite exploités grâce à des mesures de température de l'assemblage. A cette fin, on réalise un maillage temporel : à intervalle régulier, un relevé de température est effectué. L'identification du régime de température (constant ou variable) sur un intervalle de temps se fait grâce à la comparaison de deux mesures consécutives. Les données de température et de temps alimentent le modèle adapté pour calculer l'incrément de DED résultant. La somme des incréments successifs permet d'obtenir la DED à chaque instant et donc de suivre le vieillissement de l'assemblage.

Afin d'utiliser ces modèles d'accroissement de DED, nous devons être capables de mesurer la température de l'assemblage. Dans ce but, Nanolike s'est associé à l'IMS dans le cadre du projet CAPTIF pour étudier le comportement de ses capteurs de température lors d'essais en cyclage passif. L'objectif de ces essais est de déterminer leur tenue au vieillissement. Deux essais ont été mis en place : un premier vieillissement en variation lente de température, suivi d'un second vieillissement en variation rapide de température. L'essai en VLT a permis de révéler un défaut d'encapsulation de certains véhicules de test. Les capteurs dont le signal s'est montré exploitable présentent une dérive variant entre $-2,8^{\circ}\text{C}$ et $+20^{\circ}\text{C}$ par minute. Les relevés durant l'essai en VRT montrent qu'aucun capteur n'a résisté aux variations de température de 10°C par minute, et tous se sont révélés défaillants après le premier cycle. Quoi qu'il en soit, la tenue en température de ces capteurs (65°C) est insuffisante pour des applications haute température et il faut s'orienter vers d'autres moyens pour effectuer les mesures de température sur lesquelles s'appuie notre approche.

3.7 Références

- [1] R. Darveaux. Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation and fatigue life prediction. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF ELECTRONIC PACKAGING*, 124(3) :147–154, 2002. 74
- [2] J. Pang, T.H. Low, B.S. Xiong, X. Luhua, and C.C. Neo. Thermal cycling aging effects on sn–ag–cu solder joint microstructure, imc and strength. *Thin Solid Films*, 462 :370–375, 2004. 78
- [3] F. Arabi. *Étude de vieillissement et caractérisation d'assemblage de module de puissance 40 kW pour l'aéronautique*. PhD thesis, Bordeaux, 2017. 78

- [4] L. March. Parallélisme, corrélation, causalité. *Revue de l'Institut International de Statistique*, pages 9–22, 1933. 102
- [5] T. Foucart. L'interprétation des résultats statistiques. *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences*, (153), 2001. 102

Conclusion générale

La recherche constante de l'amélioration des performances dans les industries du transport entraîne le remplacement de nombreux dispositifs par des équivalents électriques, afin de réaliser une économie de masse et d'énergie. L'alimentation en énergie électrique de ces équipements est gérée par des modules d'électronique de puissance. Ces modules de conversion d'énergie sont soumis à des contraintes d'utilisation importantes qui conduisent à leur dégradation. Des études de fiabilité sont menés sur ces équipements, afin de caractériser leur endurance à ces sollicitations et ainsi garantir la fiabilité des systèmes qui les embarquent. C'est dans ce contexte que nous avons étudié le vieillissement des assemblages au cœur de ces modules, afin de proposer une approche innovante de gestion de la fiabilité en électronique de puissance.

Par rapport à une méthode classique de prévision de durée de vie, réaliser un suivi de vieillissement présente deux avantages. Tout d'abord, en connaissant l'endommagement d'un module et son potentiel maximal, il est possible d'anticiper la défaillance de manière plus efficace qu'avec une prédiction de durée de vie, en s'adaptant aux conditions réelles rencontrées par l'équipement. Cela permet de s'assurer que celui-ci dispose du potentiel de service nécessaire pour mener à bien sa mission, contribuant ainsi à la sécurité d'exploitation du véhicule. D'autre part, le suivi de vieillissement permet de n'opérer le remplacement d'un dispositif que lorsque celui-ci a réellement atteint sa fin de vie, quand son potentiel de service a été intégralement exploité. Cela permet de réaliser des économies de ressources et donc d'optimiser la valeur générée par un équipement.

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre du projet CAP-TIF (CAPTeurs innovants Intégrés et logiciels au cœur d'un dispositif d'électronique de puissance), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Ce projet s'intéresse aux solutions de surveillance reposant sur des capteurs multiples (électromagnétiques et thermomécaniques) pour améliorer la gestion de la fiabilité d'un module de puissance. Cette thèse porte plus spécifiquement sur le comportement thermomécanique d'un assemblage de puissance. Pour identifier et caractériser un indicateur de vieillissement dont l'étude nous permettrait de suivre le vieillissement d'un module de puissance, nous nous sommes intéressés à plusieurs outils mathématiques de modélisation et de simulation.

Dans un premier temps, une étude de l'architecture des modules de puissance a été menée, afin d'identifier les éléments qui les constituent. Les mécanismes de défaillance associés à ces éléments ont également été étudiés, afin d'identifier les éléments présentant un intérêt pour la suite des recherches. Deux constituants de l'assemblage se sont montrés singuliers : le câblage représente l'élément le plus sensible. Sa rupture est souvent utilisée comme critère pour caractériser une défaillance. Toutefois, la complexité de sa géométrie et sa fragilité en font un élément difficile à étudier. Le joint d'assemblage est également un point faible du module de puissance. Il a la lourde tâche de transférer l'énergie électrique au composant tout en permettant l'évacuation des calories. Il est donc particulièrement sollicité, et son vieillissement se manifeste par des dommages dans sa

structure. Ce comportement nous permet de supposer qu'il est possible de caractériser son vieillissement à l'aide de caractéristiques mécaniques et ainsi d'utiliser le joint d'attache comme un repère pour suivre le vieillissement de tout l'assemblage.

Dans la continuité de ces observations, nous nous sommes appliqués dans le deuxième chapitre, à choisir un indicateur de vieillissement pertinent pour réaliser le suivi d'un assemblage. Dans ce but, le phénomène de fatigue mécanique a été introduit, et les modèles de prédiction de durée de vie en fatigue les plus couramment utilisés ont été étudiés afin d'identifier leurs fondements et mettre en évidence leurs limitations. En reprenant l'hypothèse de l'un d'entre eux, le modèle de Pan, nous avons choisi d'utiliser une grandeur énergétique pour caractériser l'endommagement du joint d'attache : la densité d'énergie de déformation plastique. Cette grandeur représente la quantité d'énergie dissipée dans la plasticité d'un matériau. Au cours des cycles d'utilisation, elle s'accumule dans les matériaux plastiques. Bien que d'autres éléments de l'assemblage soit plus fragiles (en particulier les fils de câblage), s'intéresser au joint d'assemblage permet de se doter d'un repère plus accessible pour suivre le vieillissement de l'ensemble de l'assemblage. C'est la raison pour laquelle nous avons fait le choix d'étudier la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'attache.

Par la suite, nous avons cherché à construire un lien entre cette densité d'énergie de déformation plastique et les données obtenues à l'aide de capteurs embarqués. Pour ce faire, un modèle éléments finis de l'assemblage a été mis en place et nous permet de simuler le cyclage passif d'un assemblage. Ce choix résulte de l'hypothèse que, dans le cas d'un vieillissement lié à l'échauffement de l'assemblage, l'origine de la température n'a pas d'influence sur le vieillissement du joint d'assemblage. En d'autres termes, que l'échauffement vienne du composant lui-même ou du milieu extérieur, l'endommagement du joint d'attache et par conséquent l'accumulation de densité d'énergie de déformation plastique sera le même. Ce choix permet de simplifier la mise en place des simulations pour se concentrer sur la caractérisation de l'indicateur de vieillissement lors d'une sollicitation thermique.

Grâce à ces simulations, nous avons observé la répartition de la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'attache, ainsi que son évolution au cours du temps. Ces informations nous ont permis de déterminer les zones les plus adaptées à l'intégration de capteurs. Ces capteurs pouvaient être de deux natures : soit de température, soit de déformation. Pour lier ces données à notre indicateur de vieillissement, il n'existe pas d'expression analytique. C'est pourquoi nous avons décidé de faire appel à une analyse de surfaces de réponse. Cette méthode consiste à explorer, à l'aide d'outils mathématiques, la relation existant entre deux variables d'un problème. Le modèle éléments finis de l'assemblage permet de générer des données en faisant varier des paramètres du cyclage, et ces données sont par la suite exploitées pour construire un modèle de la relation existant entre les données de mesures et l'indicateur de vieillissement. La qualité de ces modèles est évaluée à l'aide d'outils et de critères mathématiques qui ont également été présentés.

Le dernier chapitre porte sur la mise en application de ces outils pour construire un modèle d'évolution de la densité d'énergie de déformation plastique en fonction des données de capteurs. Après la construction d'un premier plan d'expériences, nous avons appliqué la méthode des surfaces de réponse pour construire une approximation de la densité d'énergie de déformation plastique et identifier quel type de capteur (température ou déformation) serait le plus adapté pour réaliser le suivi de vieillissement d'un assemblage. Ceci nous a apporté deux informations importantes. En premier lieu, un capteur de déformation ne présente que peu d'intérêt pour notre application, en raison de sa difficulté

d'intégration, de la moindre corrélation avec la densité d'énergie de déformation plastique et de la nécessité d'avoir une information sur la température de l'assemblage pour utiliser le modèle construit. Nous nous sommes donc orientés vers l'utilisation d'un capteur de température, qui présente l'avantage de pouvoir être positionné plus librement sur l'assemblage sans que l'information de température au cours du temps ne soit fondamentalement modifiée. Ce n'est en effet pas le cas d'une jauge de déformation, dont les mesures dépendent fortement de la loi de comportement du matériau sur lequel elle est reportée. D'autre part, aucune variabilité de la durée d'un cycle n'avait été introduite. Les résultats obtenus suggèrent que cette durée joue un rôle important dans l'évolution de la densité d'énergie de déformation plastique et donc dans les modèles censés décrire cette évolution. En outre, nous avons recherché un modèle pour décrire l'évolution de la densité d'énergie de déformation plastique au cours de plusieurs cycles. Ce choix s'est révélé être une mauvaise stratégie, car un cycle présente quatre régimes de température indépendants auquel sont associés des comportements distincts d'accroissement de la densité d'énergie de déformation plastique.

De ce fait, nous avons construit un nouveau plan d'expériences, en introduisant une variable supplémentaire sous la forme de la durée d'un cycle. Conjointement, en concordance avec les observations faites pour le plan d'expériences précédent, le choix a été fait de caractériser l'accroissement de la densité d'énergie de déformation plastique pour chaque régime de température du cycle. L'idée sous-jacente est de suivre l'accroissement de la densité d'énergie de déformation plastique de proche en proche, en calculant son incrément pour un régime de température donné (régime caractérisé par sa durée, sa température initiale et sa température finale). Ainsi, quatre modèles ont été construits, un pour chaque régime de température. La densité d'énergie de déformation plastique est donnée par le modèle correspondant aux conditions dans lesquelles est placé l'assemblage.

Par ailleurs, le domaine de validité de ces modèles est défini par les intervalles de définition des variables du plan d'expériences. Nous avons basé ces intervalles sur des valeurs nominales correspondant à des essais "classiques" de vieillissement en électronique de puissance, et considéré une variation de $\pm 10\%$. Ce choix a deux conséquences : premièrement, l'amplitude de variation de la température minimale de cycle est naturellement plus faible que celle de la température maximale. Par un biais mathématique, certains indicateurs de qualité de modèles peuvent laisser penser que la température minimale a donc un poids plus faible dans le modèle, ce qui ne représente pas convenablement la réalité. Secondement, les intervalles de variation des températures étant disjoints, il en résulte une plage de température pour laquelle un palier de température n'est représenté par aucun modèle. Nous remarquons donc que certains choix dans la définition du plan d'expériences ont des conséquences importantes et directes sur l'exploitation des modèles construits par la suite. Pour notre cas d'application, nous aurions pu ne pas considérer un intervalle de variation centré sur les valeurs nominales, de façon à étendre les domaines de validité des modèles pour prendre en compte cette plage intermédiaire de température. Ceci aurait permis d'obtenir une gamme de température unifiée, dans laquelle nos modèles étaient applicables sans discontinuités. Il aurait néanmoins été nécessaire de vérifier les conditions de continuité des modèles là où leurs intervalles de définition se rencontrent.

Nous avons également observé, lors de la construction des modèles pour les paliers de température, que les prédictions du modèle étaient moins bonnes lorsque le taux d'accroissement de la densité d'énergie de déformation plastique est plus élevé. Ceci pose la question de l'influence d'autres paramètres que ceux considérés sur l'accumulation de la den-

sité d'énergie de déformation plastique. Nous savons que les vitesses de chargement (qu'il soit thermique ou mécanique) ont une influence sur le comportement d'un matériau. Il n'est donc pas exclu que selon l'intensité des conditions de température (forte variation de température, durée très faible), la cinétique d'accumulation de la densité d'énergie de déformation plastique présente des régimes d'évolution soumis à des lois différentes. On peut ainsi envisager de compléter cette décomposition des phases d'un cycle en traitant séparément les forts taux de variation de température ou les paliers longs, de façon à mieux prendre en compte les mécanismes qui interviennent durant ces conditions particulières.

Après avoir construit et présenté des modèles d'accroissement de la densité d'énergie de déformation plastique pour un assemblage de test, nous avons proposé une démarche formalisée de suivi de vieillissement. Le travail effectué dans le cadre de cette thèse et présenté dans ce manuscrit ne représente en effet que la démarche d'analyse et de modélisation nécessaire pour surveiller le vieillissement d'un assemblage. Nous avons donc formulé plus en détails les étapes que pourrait comporter une démarche complète de suivi de vieillissement. Cela nous a permis de mettre en avant les perspectives d'améliorations et les axes de développement de l'approche proposée. Ainsi, trois points majeurs ont particulièrement retenu notre attention.

Tout d'abord, puisque cette approche repose sur l'accumulation de la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'attache, cela signifie que les propriétés mécaniques du matériau qui le constitue ont une influence considérable sur les résultats obtenus. Or, nous avons fait usage d'un modèle, donc d'une approximation, pour exprimer certaines propriétés de ce matériau. Le modèle choisi, proposé par L. Anand, n'est toutefois pas prévu pour représenter les modifications du comportement de l'argent fritté lorsque celui-ci est endommagé. C'est la raison pour laquelle la densité d'énergie de déformation plastique dans le joint d'assemblage croît de manière régulière d'un cycle à l'autre, là où on s'attendrait plutôt à constater un phénomène d'emballement, avec un accroissement grandissant de la densité d'énergie de déformation plastique à chaque cycle supplémentaire. Cela soulève donc la question de la validité de ce modèle pour notre application. Il est envisageable de caractériser un matériau à plusieurs niveaux d'endommagement pour déterminer les paramètres du modèle d'Anand, mais également de faire appel à un autre modèle pour caractériser le comportement en fatigue de ce matériau viscoplastique.

D'autre part, afin de pouvoir exploiter la connaissance de cet indicateur de vieillissement, il est nécessaire de fixer un critère de fin de vie, c'est à dire une valeur critique de la densité d'énergie de déformation plastique. Cette grandeur étant obtenue à l'aide de simulation et n'étant pas mesurable sur un joint d'assemblage après vieillissement, nous avons proposé une solution pour déterminer la valeur critique d'énergie admissible par un assemblage qui repose sur un parallèle entre simulation et expérimentation. Toutefois, cette méthode présente plusieurs limitations importantes. Tout d'abord, elle repose sur l'utilisation du modèle d'Anand et hérite donc des approximations liées à l'utilisation de ce modèle. D'autre part, la densité d'énergie de déformation plastique s'accumule différemment selon le taux de déformation du matériau. Par conséquent, les paramètres du cycle utilisé (taux de variation de la température, température et durée des paliers) ont nécessairement une influence sur la détermination de la valeur obtenue. S'intéresser à la caractérisation de la densité d'énergie de déformation plastique critique d'un assemblage est donc un verrou scientifique important de la stratégie de suivi de vieillissement que nous avons élaboré dans ces travaux.

Enfin, l'intégralité de cette démarche repose sur la capacité à mesurer la température de l'assemblage. Cela suppose que nous disposons de capteurs adaptés à une intégration dans un module de puissance et capables d'endurer le même type de contraintes que celui-ci sans présenter de dérive (ou présentant une dérive que l'on soit en mesure de caractériser pour la corriger lors de l'interprétation des mesures). Rappelons que le relevé de température fournit les données d'entrée de nos modèles, et constitue le point de départ d'une chaîne de suivi de vieillissement, dont un schéma de principe est fourni en figure 3.50.

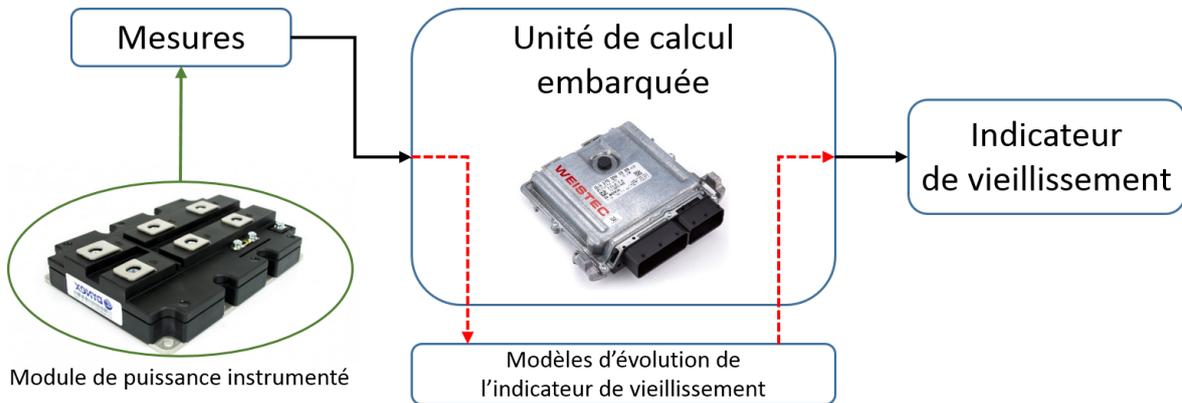


FIGURE 3.50 – Principe d'un suivi de vieillissement à l'aide de capteurs embarqués

Dans la dernière étude présentée dans ce document, nous nous sommes donc intéressés à des capteurs nanotechnologiques développés par un partenaire du projet CAP-TIE. Des essais en vieillissement ont été menés, malgré la tenue en température insuffisante pour une application haute température en électronique, afin d'évaluer l'intérêt d'une telle technologie en terme de régularité dans le temps. Malgré des résultats non concluants pour ces capteurs fabriqués à base de nanoparticules d'or, nous ne pouvons pas exclure l'ensemble des capteurs faisant appel à des nanotechnologies. En tout état de cause, le développement d'un capteur de température capable d'endurer les conditions d'usage d'un module de puissance représente une condition *sine qua non* à l'approche proposée dans cette thèse.

Perspectives

La capacité de suivre le vieillissement d'un module de puissance ouvre la voie vers de nouvelles fonctionnalités de gestion de l'énergie. La simplicité des modèles présentés dans cette thèse permet leur implémentation dans des unités de calcul embarquées au bénéfice d'une gestion électronique améliorée.

Les applications requérant l'utilisation de modules d'électroniques de puissance exploitent des groupes de modules. En associant un module "intelligent" (disposant de capteurs intégrés) et une solution embarquée pour effectuer le traitement des données de mesure, nous pouvons envisager une gestion automatisée de la flotte de modules ayant pour objectif de maximiser la fiabilité de l'ensemble du système plutôt que d'un module unique. Ainsi, un cas d'endommagement trop prononcé d'un module, la sollicitation de ce module pourrait être allégée et la charge de travail répartie sur les autres composants du système. La fonctionnalité complète du système est conservée, et son usure est maintenue homogène, afin d'éviter un effet de surcharge sur un élément plus faible d'un système de conversion d'énergie. La connaissance de l'endommagement permet également

de fournir une information quantitative sur l'état du système et de ses éléments. Une prédiction de durée de vie résiduelle peut être émise en tenant compte des conditions récentes d'utilisation. Cela offre également un retour d'informations concernant la robustesse d'un module face aux cas de charge rencontrés, laissant la possibilité d'adapter la sollicitation des équipements pour limiter leur usure et maximiser leur durée de vie.

L'intérêt des simulations et modélisations associées à l'approche présentée dans cette thèse réside dans les possibilités qu'elles offrent d'explorer un nombre très important de pistes de conception, et donc de dépasser des barrières technologiques que l'expérimentation seule ne permet plus de franchir. Dans le contexte de l'électronique de puissance, les simulations font appel à plusieurs disciplines (thermique, mécanique, physique des matériaux) pour toujours approfondir la compréhension des phénomènes à l'origine des comportements que nous observons, et pour nous permettre de parvenir à améliorer leur efficacité et leur fiabilité. Malgré cela, ce sont des outils dont la mise en application est complexe, car elle repose sur un grand nombre de compromis (hypothèses, modèles, considérations simplificatrices) dont l'influence sur les résultats est potentiellement importante et qu'il convient d'étudier avec soin.

Modélisations et méthodes numériques pour l'intégration d'une solution de suivi de vieillissement d'un assemblage de puissance.

Résumé :

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet ANR "CAPTIF" (CAPTeurs innovants Intégrés et logiciels au cœur d'un dispositif d'électronique de puissance). Ce projet s'intéresse aux solutions de suivi de vieillissement en temps réel de modules d'électronique de puissance pour réduire les coûts de maintenance et augmenter la fiabilité des systèmes de conversion d'énergie.

Les limitations des modèles de fiabilité actuels sont mises en évidence et conduisent à la recherche d'une approche plus représentative des mécanismes entraînant la défaillance des modules de puissance et à une remise en question du traditionnel nombre de cycles moyens avant défaillance en tant qu'outil de gestion de la fiabilité. À partir de l'identification des mécanismes de vieillissement des assemblages de puissance, une nouvelle méthodologie de modélisation est proposée pour caractériser la durée de vie résiduelle d'un module, en s'appuyant sur un indicateur d'endommagement énergétique. La fonction de corrélation entre cet indicateur de vieillissement et les données issues de capteurs embarqués est alors construite à l'aide de méthodes de régression numérique. Une mise en application sur un assemblage représentatif illustre l'intérêt de la méthodologie.

Mots clés : Modélisation, Méthodes numériques, Fiabilité, Suivi de vieillissement, Électronique de puissance.

Modelling and numerical methods applied to health monitoring of power electronics devices

Abstract:

This work is part of the french Research National Agency project called "CAPTIF" (meaning "Innovative embedded sensors and software for power electronics devices"). This research project deals with power electronics health monitoring solutions in order to increase electric conversion devices reliability and decrease maintenance costs.

Traditionnal reliability models limitations led to a reconsideration of life prediction methods and mean time to failure as a reliability management tool for power electronics devices. An investigation to develop an approach more representative of failure mechanisms observed in power electronics devices was conducted. Based on ageing mechanisms of power electronics assemblies, an ageing indicator was proposed and used with a modelling methodology to characterise the residual life of a device exposed to thermal loads. The functional link between this ageing indicator and data provided by embedded sensors is approached using a numerical design of experiment and a response surface methodology. This modelling process is illustrated by an application to a simplified power assembly.

Keywords: Modelling, Numerical methods, Reliability, Health monitoring, Power electronics.