

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Génie Electrique

Préparée au sein de l'Université de Rouen Normandie

Fiabilité et Robustesse des Cartes d'Alimentation des Nouvelles Généralisations des Modules RADAR

Présentée et soutenue par
Chadia LACHKAR

Thèse soutenue publiquement le (date de soutenance)
devant le jury composé de

M. Pierre Richard DAHOO	Professeur des Universités – Université de Versailles	Rapporteur
M. Farid TEMCAMANI	Professeur des Universités - ENSEA	Rapporteur
Mme. Sylvie BARANOWSKI	Maitre de Conférences –HDR- Université de Lille	Examineur
M. Fabien NDAGIJIMANA	Professeur des Universités- Université Grenoble Alpes	Examineur
M. Moncef KADI	Enseignant/Chercheur HDR - ESIGELEC	Directeur de thèse
M. Jean-Paterne KOUADIO	Enseignant/Chercheur - ESIGELEC	Encadrant
M. Jean-François Goupy	Ingénieur fiabilité – Thales Air System	Invité
M. David Delaux	Directeur fiabilité - Valeo	Invité

Thèse dirigée par : M. Moncef KADI

laboratoire : IRSEEM

A mes très chers parents

A ma petite sœur Fadoua et mon petit Frère Ayoub

A mon Fiancé Abdellatif

A la mémoire de mon cher grand-père et ma chère grand-mère

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire **Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués (IRSEEM)** de l'**ESIGELEC**, au sein du pôle "électronique et systèmes". Je tiens particulièrement à remercier Monsieur **Moncef Kadi**, enseignant-chercheur au sein de l'**ESIGELEC** et chef du pôle "électronique et Systèmes" qui a dirigé cette thèse avec beaucoup de passion, persévérance et compétence. Je le remercie d'avoir toujours été disponible lors des multiples discussions et je lui suis très reconnaissante pour tout ce qu'il a fait pour que je puisse achever ma thèse.

Je tiens également à remercier **Monsieur Jean-Paterne Kouadio** mon encadrant de thèse et enseignant-chercheur à l'**ESIGELEC** à qui je présente ma grande considération pour ses précieux conseils. Je suis très reconnaissante à Monsieur **Jean-François Goupy** intervenant industriel de la société **Thales Air Systems**, Ymare pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour son collaboration fructueuse et pour avoir accepté d'être membre et invité de mon jury de thèse.

Je remercie les différents membres du projet **FIRST-MFP : Centre vibro acoustique et fiabilité (CEVAA), Analyse et Surfaces, Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Muller BBM, LESCATE**,... et je tiens particulièrement à remercier Monsieur **David Delaux**, Directeur **Valeo** et le leader du Projet **FIRST-MFP** pour tes efforts pour que le projet soit mené dans de bonnes conditions et aussi pour d'avoir accepté d'être un membre de mon jury de thèse. Je tiens à remercier Monsieur **Pierre Richard Dahoo**, Professeur des Universités à **Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines** et Monsieur **Farid Temcamani**, Professeur des Universités à **l'École nationale supérieure de l'électronique et de ses applications**, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail. Madame **Sylvie Baranowski**, Maitre de Conférences – HDR à **l'Université de Lille**, et Monsieur **Fabien Ndagijimana**, Professeur des Universités, **Université Grenoble Alpes**, d'avoir accepté de se joindre à ce jury comme examinateur.

Je tiens à remercier Monsieur **Hichame Maanane**, PhD. Ingénieur chez **Thales Optronics** qui grâce à lui que j'ai eu l'opportunité de faire une thèse. Je remercie particulièrement le personnel du service technique de l'**ESIGELEC** (Monsieur Gwenaël, Patrick et Dédier) pour leur aide. Je tiens aussi à remercier Madame Mireille Candelon et Madame Vanessa Picard pour m'avoir aidé sur tout ce qui est procédure administrative. Je remercie également mes collègues de travail et ceux avec qui j'ai partagé mon bureau (Yvon, Léa, Kawthar, Marwa), pour l'affectueuse amitié dont ils

ont toujours fait preuve. J'ai pu travailler dans un cadre particulièrement agréable, grâce à l'ensemble des membres du laboratoire. Merci à tous pour votre bonne humeur et pour toutes ces séances de rires et de sourires. Je tiens aussi à remercier ma chère cousine Fatima Benkhalifa pour son support moral et ma chère copine Soukaina Belk et ses enfants adorables Imane et Hassan que j'aime beaucoup.

Enfin, je dédie ce travail à tous les membres de ma famille pour leurs encouragements et pour leur soutien depuis le début et m'ont supporté tout au long de cette période.

RESUME

Aujourd'hui, les exigences croissantes en termes de compétitivité requièrent la conception de systèmes électronique de puissance ayant un encombrement minimal tout en gardant une bonne fiabilité. La combinaison de ces deux caractéristiques est absolument requise au niveau d'un système aussi bien qu'au niveau d'un composant. On cite notamment le cas des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide, qui sont largement utilisés comme réservoir de stockage de l'énergie électrostatique. Cette fonction est nécessaire dans les systèmes électroniques de puissance pour fournir l'énergie aux différentes parties à chaque appel de courant. D'après la littérature, l'étude et l'évaluation de la fiabilité de ces systèmes reposent fortement sur celle des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide ainsi que sur d'autres composants identifiés comme critiques (Transistors MOS de découpage, isolants dans les transformateurs, ...etc.).

Le premier chapitre débute par une présentation de la technologie des condensateurs est détaillée en indiquant les différents paramètres qui les caractérisent et les différents travaux réalisés dans la littérature sur l'étude et l'évaluation de la fiabilité de ces composants.

Dans le deuxième chapitre, les essais de vieillissement sont élaborés en se basant sur le profil de mission du système. Ensuite, les évolutions des caractéristiques ayant une dégradation significative sont modélisées.

Le troisième chapitre porte sur la caractérisation physico-chimique du condensateur afin de comprendre et expliquer les modes de défaillance enregistré pendant les essais de vieillissement.

Le dernier chapitre est consacré à la réalisation des essais de vieillissement sur système simulant la dissipation de la chaleur des composants adjacents aux condensateurs. Des mesures électriques sont faites en temps réel afin de superviser la tension à leurs bornes. Enfin, un essai de stress mécanique est réalisé afin de permettre d'évaluer l'impact des vibrations sur la connectique des condensateurs neufs et vieillis.

Mots clés : Condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide, Systèmes électroniques de puissance, Essais de vieillissement, Modélisation du vieillissement des composants, Analyse physicochimique.

ABSTRACT

Today, the increasing demands in terms of competitiveness require the design of electronic power systems having a minimal bulk while maintaining a good reliability. The combination of these two features is required at a system level as well as at a component level. It is particularly the case of liquid electrolyte aluminum capacitors, which are widely used as storage tanks for electrostatic energy. This function is necessary in electronic power systems to provide energy to the different parts with each current draw. According to the literature, the study and the evaluation of the reliability of these systems rely heavily on that of liquid electrolyte aluminum capacitors as well as on other components identified as critical (MOS switching transistors, insulators in transformers, etc.).

The first chapter begins with a detailed presentation of the technology of capacitors by indicating the various parameters that characterize them and the different work done in the literary on the study and evaluation of the reliability of these components.

In the second chapter, aging tests are developed based on the mission profile of the system. Then, the evolutions of characteristics having a significant degradation are modeled.

The third chapter deals with the physico-chemical characterization of the capacitor in order to understand and to explain the failure modes recorded during the aging tests.

The last chapter is devoted to performing aging tests on a system which is simulating the heat dissipation of components adjacent to capacitors. Electrical measurements are realized in real time to monitor the voltage at their terminals. Finally, a mechanical stress test is carried out to evaluate the impact of vibrations on the connection of new and aged capacitors.

Keywords: Aluminum capacitors using liquid electrolyte, Electronic power systems, Aging tests, Aging modeling of component, Physicochemical analysis.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	- 3 -
RESUME	- 5 -
ABSTRACT	- 6 -
LISTE DES FIGURES	- 10 -
LISTE DES TABLEAUX	- 16 -
INTRODUCTION GENERALE	- 17 -
Chapitre 1.CONTEXTE GENERAL ET ETAT DE L'ART	- 20 -
1.1 CONTEXTE DE LA THESE	- 20 -
1.2 CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE	- 22 -
1.2.1 CONDENSATEURS ELECTROLYTIQUES D'ALUMINIUM	- 22 -
1.2.2 CARACTERISTIQUES	- 27 -
1.2.3 MODELE DE DUREE DE VIE DU CONDENSATEUR.....	- 31 -
1.2.4 MODES DE DEFAILLANCES	- 33 -
1.3 FIABILITE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES	- 34 -
1.3.1 DEFINITION.....	- 34 -
1.3.2 METRIQUES DE FIABILITE [22] [23].....	- 34 -
1.3.3 PRINCIPALES LOIS DE PROBABILITE [22] [23].....	- 37 -
1.4 ETAT DE L'ART DES TRAVAUX SUR LA FIABILITE DES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTIQUE LIQUIDE.....	- 40 -
1.4.1 TRAVAUX PORTANT SUR LA MODELISATION DE LA FIABILITE DES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE	- 40 -
1.4.2 MECANISMES DES DEFAILLANCES [7] [31].....	- 52 -
1.5 CONCLUSION	- 53 -
Chapitre 2.ESSAIS DE VIEILLISSEMENT SUR COMPOSANTS ET SUR SYSTEME	- 55 -
2.1 INTRODUCTION	- 55 -
2.2 MESURE DES PARAMETRES.....	- 55 -

2.2.1	MESURES DE LA VALEUR DE LA CAPACITE ET DE L'ESR.....	- 55 -
2.2.2	MESURE DU COURANT DE FUITE I_f	- 56 -
2.2.3	MESURES DIMENSIONNELLES.....	- 56 -
2.2.4	MESURES MASSIQUES	- 57 -
2.3	CONDITIONS DES ESSAIS DE VEILLISSEMENT	- 58 -
2.4	PROGRAMME DES ESSAIS.....	- 61 -
2.4.1	ESSAIS THERMIQUES	- 63 -
2.4.2	ESSAIS THERMOELECTRIQUES	- 64 -
2.5	RESULTATS DES ESSAIS DE VEILLISSEMENT	- 67 -
2.5.1	ESSAIS THERMIQUES	- 67 -
2.5.2	ESSAIS THERMOELECTRIQUES	- 72 -
2.5.3	EVOLUTION DE L'EPAISSEUR DU BOITIER	- 73 -
2.6	ANALYSES ET EXPLOITATION DES RESULTATS D'ESSAIS.....	- 79 -
2.6.1	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE	- 80 -
2.6.2	INFLUENCE DES PARAMETRES THERMOELECTRIQUES	- 84 -
2.7	ANALYSE PRELIMINAIRE	- 88 -
2.8	CONCLUSION	- 89 -

Chapitre 3. ANALYSE PHYSICOCHIMIQUE DES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE..... - 91 -

3.1	INTRODUCTION	- 91 -
3.2	STRUCTURE DES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE ETUDIES	- 91 -
3.3	PREMIÈRES OBSERVATIONS SUR LES CONDENSATEURS AGES	- 95 -
3.4	CARACTERISATIONS PHYSICOCHIMIQUES DES CONDENSATEURS	- 96 -
3.4.1	MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE	- 96 -
3.4.2	SPECTROSCOPIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE DU PROTON	- 98 -
3.5	CONCLUSION	- 103 -

Chapitre 4.ETUDE DE LA FIABILITE D'UN SYSTEME ELECTRONIQUE DE PUISSANCE SOUS LES CONDITIONS OPERATIONNELLES	- 104 -
4.1 INTRODUCTION	- 104 -
4.2 CONTEXTE DE FONCTIONNEMENT DE LA CARTE D'ALIMENTATION	- 105 -
4.3 ESSAI DE VIEILLISSEMENT SUR LES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE MONTES SUR CARTE	- 108 -
4.3.1 BANC DE TEST SYSTEME	- 108 -
4.3.2 SYSTEME DE SUPERVISION DES TEMPERATURES	- 112 -
4.3.3 MISE EN ŒUVRE D'UN ESSAI SUR CARTE	- 114 -
4.4 RESULTATS DES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT SYSTEME.....	- 116 -
4.4.1 ESSAI ELECTRIQUE A HAUTE TEMPERATURE	- 116 -
4.4.2 ESSAI « ON-OFF » AVEC CYCLAGE THERMIQUE	- 122 -
4.4.3 ESSAI DE VIBRATION	- 123 -
4.5 CONCLUSION	- 129 -
CONCLUSION GENERALE	- 130 -
REFERENCES	- 133 -

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Profil de mission thermique des condensateurs électrolytiques d'aluminium utilisés dans la carte électronique de puissance étudiée [5].....	- 21 -
Figure 1-2 : Famille de condensateurs en fonction de leur capacité [7]	- 22 -
Figure 1-3 : Gamme de tension nominale pour différentes familles de condensateurs [7].....	- 23 -
Figure 1-4 : Structure d'un condensateur d'aluminium à électrolyte liquide.....	- 24 -
Figure 1-5 : Bobinage d'un condensateur d'aluminium à électrolyte liquide.....	- 26 -
Figure 1-6 : Condensateur d'aluminium à électrolyte liquide ayant une forme cylindrique	- 27 -
Figure 1-7 : Condensateur dit "Cubique".....	- 27 -
Figure 1-8 : Schéma équivalent des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide	- 27 -
Figure 1-9 : Schéma équivalent série	- 28 -
Figure 1-10 : Mesure du courant de fuite.....	- 29 -
Figure 1-11: Les modes et les mécanismes de défaillances d'un condensateur d'aluminium à électrolyte liquide.....	- 34 -
Figure 1-12 : Taux de défaillance en fonction du temps.....	- 36 -
Figure 1-13 : Définition graphique des durées moyennes.....	- 37 -
Figure 1-14 : Algorithme d'estimation de la valeur de l'ESR	- 44 -
Figure 1-15 : Filtre de Kalman pour l'identification des paramètres internes du condensateur-	45 -
Figure 1-16 : Procédure de réalisation expérimentale du système de surveillance de maintenance prédictive des condensateurs	- 47 -
Figure 1-17 : Fiabilité des condensateurs et du temps de fonctionnement en utilisant la distribution de Weibull [38].....	- 49 -
Figure 1-18 : La distribution annuelle de la température ambiante	- 50 -
Figure 1-19 : Evaluation de la fiabilité basée sur le profil de mission.....	- 51 -
Figure 1-20 : Fuite de l'électrique sur un composant vieilli [7].....	- 52 -

Figure 1-21 : Fissure dans les joints d'étanchéité [31].....	- 52 -
Figure 1-22 : Image aux rayons X montrant la déformation du boîtier	- 53 -
Figure 1-23 : Des défauts sur l'anode d'un condensateur vieilli.....	- 53 -
Figure 2-1 : Mesure de la capacité et de l'ESR avec un LCR-mètre	- 55 -
Figure 2-2 : Circuit de mesure du courant de fuite d'un condensateur	- 56 -
Figure 2-3 : Dimensions du boîtier du condensateur	- 57 -
Figure 2-4 : Mesure de l'épaisseur du boîtier du condensateur	- 57 -
Figure 2-5 : Balance pour mesure la masse du condensateur.....	- 58 -
Figure 2-6 : Fuites d'électrolyte visibles au niveau de la borne de connexion gauche.....	- 58 -
Figure 2-7 : Commande du transistor permettant de charger et décharger le condensateur	- 60 -
Figure 2-8 : Profil opérationnel de la tension lors du processus charge/décharge du condensateur	- 61 -
Figure 2-9 : Enceintes climatiques utilisées lors des trois essais thermiques (ST-1, ST-2 et CT).....	- 64 -
Figure 2-10 : Schéma électrique utilisé pour les essais de vieillissement thermoélectrique.....	- 65 -
Figure 2-11 : Tension mesurée entre les bornes des condensateurs lors d'un cycle charge/décharge	- 65 -
Figure 2-12 : Banc d'essai mis en œuvre pour les essais de vieillissement	- 66 -
Figure 2-13 : Mise en place des condensateurs pour un test thermoélectrique.....	- 66 -
Figure 2-14 : Mesure de la tension aux bornes des condensateurs utilisés dans l'essai ET1 à t = 0 heure	- 67 -
Figure 2-15 : Evolution de la capacité des condensateurs ayant subi l'essai vieillissement ST1 (a).	- 68 -
Figure 2-16 : Evolution de la capacité des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement CT...	- 68 -

Figure 2-17 : Evolution de l'épaisseur du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement thermique ST1	- 69 -
Figure 2-18 : Evolution de l'épaisseur du boîtier des condensateurs ayant subi les essais de vieillissement thermiques ST1 (a) et ST2 (b).....	- 70 -
Figure 2-19 : Perte de masse des condensateurs ayant subi l'essai ST1	- 71 -
Figure 2-20 : Perte de masse des condensateurs ayant subi l'essai ST2	- 71 -
Figure 2-21 : Evolution de la valeur de la capacité des condensateurs ayant subi l'essai TE1	- 72 -
Figure 2-22 : Evolution de la valeur de la capacité des condensateurs ayant subi l'essai TE4	- 73 -
Figure 2-23 : Evolution de l'épaisseur relative du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement TE1	- 74 -
Figure 2-24 : Evolution de l'épaisseur relative du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement TE2.....	- 74 -
Figure 2-25 : Evolution de l'épaisseur relative du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement TE3.....	- 75 -
Figure 2-26 : Evolution de l'épaisseur relative du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement TE4.....	- 75 -
Figure 2-27 : Evolution de la perte de la masse au cours de l'essai de vieillissement TE1	- 76 -
Figure 2-28 : Evolution de la perte de la masse au cours de l'essai de vieillissement TE2.....	- 76 -
Figure 2-29 : Evolution de la perte de la masse au cours de l'essai de vieillissement TE3	- 77 -
Figure 2-30 : Evolution de la perte de la masse au cours de l'essai de vieillissement TE4.....	- 77 -
Figure 2-31 : Vues Micro-tomographiques aux rayons X du condensateur ST1-1 avant et après 4000 heures de vieillissement	- 78 -
Figure 2-32 : Vues Micro-tomographiques aux rayons X du condensateur TE1-1 avant et après 3000 heures de vieillissement	- 79 -
Figure 2-33 : Vues Micro-tomographiques aux rayons X du condensateur ET4-1 avant et après 4000 heures de vieillissement	- 79 -

Figure 2-34 : Ajustement des mesures au modèle de régression proposé pour l'épaisseur du boîtier de ST1-4	- 81 -
Figure 2-35 : Ajustement des mesures au modèle de régression proposé pour l'épaisseur du boîtier de ST2-4	- 82 -
Figure 2-36 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la masse du condensateur ST1-4.	- 83 -
Figure 2-37 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la masse du condensateur ST2-4.	- 84 -
Figure 2-38 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la capacité.....	- 85 -
Figure 2-39 : Ajustement des mesures au modèle de régression proposé pour l'épaisseur du boîtier de TE1-1	- 86 -
Figure 2-40 Ajustement des mesures au modèle de régression proposé pour l'épaisseur du boîtier de TE4-5	- 86 -
Figure 2-41 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la masse du condensateur TE1-1.	- 87 -
Figure 2-42 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la masse du condensateur TE4-5.	- 88 -
Figure 3-1 : Boîtier et bobinage d'un condensateur d'aluminium à électrolyte liquide.....	- 92 -
Figure 3-2 : Condensateur d'aluminium à électrolyte liquide de forme cubique ; (a) Image montrant le condensateur étudié ; (b) Image montrant un joint en élastomère ; et (c) Brasage par laser permettant de souder le couvercle avec le boîtier du condensateur	- 94 -
Figure 3-3 : Comparaison entre le spectre IRTF de l'électrolyte d'un condensateur non vieilli et celui du gamma-butyrolactone extrait d'une base de données IRTF.....	- 95 -
Figure 3-4 : Fuite d'électrolyte à travers les bornes d'un condensateur ayant subi des essais de vieillissement.....	- 96 -
Figure 3-5 : Image montrant une fuite d'électrolyte à travers les bornes d'un condensateur ayant subi un test de cycle de charge / décharge à haute température pendant 3050 heures.....	- 96 -

Figure 3-6 : Des images SEM d'électrodes d'un condensateur vieilli ayant subi les conditions de l'essai TE1 (TMAX et sous la tension U_a)	- 97 -
Figure 3-7 : Comparaison des spectres RMN 1H de l'électrolyte d'un condensateur non vieilli et des substances identifiées, à savoir le triéthylphosphite et la gamma-butyrolactone	- 99 -
Figure 4-1 : Schéma simplifié des condensateurs montés dans leur système	- 104 -
Figure 4-2 : Circuit simplifié du fonctionnement d'une voie de la carte d'alimentation	- 105 -
Figure 4-3 : Profil thermique de l'essai « ON-OFF » avec cyclage thermique.....	- 107 -
Figure 4-4 :Face avant du rack charges actives.....	- 109 -
Figure 4-5 : Banc de test de la fonction alimentation	- 111 -
Figure 4-6 : Schéma des interconnexions du banc d'essai	- 112 -
Figure 4-7 : Installation des thermocouples sur les composants de la fonction alimentation .	- 114 -
Figure 4-8 : Cablage des thermocouples sur la carte d'alimentation	- 114 -
Figure 4-9 : Banc de test niveau système	- 115 -
Figure 4-10 : Stabilisation de la température des composants de la carte à la température environnante imposée par l'étuve	- 115 -
Figure 4-11 : Trace d'électrolyte sur le capot après un vieillissement électrique	- 116 -
Figure 4-12 : Photos de la carte après 3000 heures de test électrique à haute température	- 117 -
Figure 4-13 :Tension aux bornes des condensateurs à des instants différents de l'essai de vieillissement d'une voie de la carte	- 117 -
Figure 4-14 : Evolution de la valeur de la capacité des condensateurs montés sur la carte ayant subi l'essai électrique à haute température	- 118 -
Figure 4-15 : Evolution de la valeur de l'ESR des condensateurs montés sur la carte ayant subi l'essai électrique à haute température	- 119 -
Figure 4-16 : Evolution de la valeur de l'épaisseur des condensateurs montés sur la carte ayant subi l'essai électrique à haute température	- 120 -

Figure 4-17 : Température des composants les plus chauds de la carte sous test à t = 0 heure	- 121 -
Figure 4-18 : Température des composants les plus chauds de la carte d'alimentation sous test à t = 3000 heures	- 121 -
Figure 4-19 : Température des condensateurs la carte d'alimentation sous test à t = 3000 heures ...	- 122 -
Figure 4-20 : Tension aux bornes des condensateurs à des instants différents de l'essai de vieillissement d'une voie de la carte	- 123 -
Figure 4-21 : Evolution de la valeur de la capacité des condenteurs ayant subit les conditions de l'essai ST3	- 124 -
Figure 4-22 : Evolution de la valeur de l'ESR des condenteurs ayant subit les conditions de l'essai ST3	- 125 -
Figure 4-23 : Evolution de la valeur de l'épaisseur des condenteurs ayant subit les conditions de l'essai ST3	- 125 -
Figure 4-24 :Spécifications du test d'endurance pour chaque axe.....	- 126 -
Figure 4-25 :Essai de vibration selon l'axe X	- 126 -
Figure 4-26 : Essai de vibration selon l'axe Y	- 127 -
Figure 4-27 : Essai de vibration selon l'axe X	- 127 -
Figure 4-28 : Valeur de la capacité avant et à la fin de l'essai de vibration.....	- 128 -
Figure 4-29 : Valeur de l'ESR avant et après l'essai de vibration	- 128 -

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Planning des essais de vieillissement.....	- 63 -
Tableau 2-2 : Paramètres du modèle de dégradation de l'épaisseur du boîtier des condensateurs ST1-4 et ST2- 4	- 81 -
Tableau 2-3 : Paramètres du modèle de dégradation de la masse des condensateurs ST1-4 et ST2-4.....	- 83 -
Tableau 2-4 : Paramètres du modèle de dégradation de la valeur de capacité du condensateur TE4-5.....	- 85 -
Tableau 2-5 : Paramètres du modèle de dégradation de l'épaisseur des condensateurs TE1-1 et TE4-5.....	- 86 -
Tableau 2-6 : Paramètres du modèle de dégradation de la masse des condensateurs TE1-1 et TE4-5.....	- 87 -
Tableau 3-1 : Concentration du gamma-butyrolatone et du triéthylphosphite dans la solution électrolytique des condensateurs non vieillis et vieillis.....	- 100 -
Tableau 3-2 : Pourcentage des quantités de substances basées sur les calculs de la zone de pics (sans prendre en compte le GBL et le triéthylphosphite).....	- 102 -

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, les équipements mécatroniques dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique intègrent de plus en plus les systèmes électroniques de puissance, qui sont souvent considérés comme le constituant clef puisqu'ils interagissent avec les différentes parties de ces équipements afin de leur fournir l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement.

D'un point de vue structural, les systèmes mécatroniques sont constitués de plusieurs sous-ensembles et sont généralement intégrés dans les matériels à des emplacements bien définis. C'est pour cela qu'une optimisation de l'encombrement est sérieusement prise en compte lors de leur conception.

Aujourd'hui, dans le marché des systèmes mécatroniques, les exigences croissantes en termes de compétitivité requièrent la conception de systèmes ayant un encombrement minimal tout en gardant une bonne fiabilité. La combinaison de ces deux caractéristiques est absolument requise au niveau d'un système aussi bien qu'au niveau d'un composant. On cite notamment le cas des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide, qui sont largement utilisés dans les systèmes électroniques de puissance. D'après la littérature, les condensateurs de cette technologie sont à la fois encombrants, insuffisamment fiables et considérés comme des composants critiques. Ceci est en raison de leur sensibilité à la température. Par conséquent, l'étude et l'évaluation de la fiabilité de ces systèmes reposent fortement sur celle des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide ainsi que sur d'autres composants identifiés comme critiques (Transistors MOS de découpage, isolants dans les transformateurs, ...etc.).

Ces travaux de thèse rentrent dans le cadre du projet de recherche FIRST-MFP (Fiabilité et Renforcement des Systèmes Technologiques Mécatroniques de Forte Puissance) piloté par Valeo qui s'est entouré de 18 partenaires, dont 3 grands groupes, 2 ETI, 6 PME, 3 associations et 4 laboratoires de recherche. Les objectifs du projet sont principalement :

- ✓ Une réduction du temps de développement, du coût et des risques d'exploitation des systèmes mécatroniques de forte puissance permise par la mise à disposition :
 - De modèles de fiabilité long terme basés sur les dégradations physiques et qui sont recalés par le développement d'une série d'essais accélérés et aggravés ainsi que du REX (amélioration des modèles FIDES),

- De modèles numériques et statistiques permettant d'optimiser la fiabilité de l'architecture produit.
- ✓ Un accroissement de la compétence « Fiabilité » de la communauté et des acteurs de la filière automobile et aéronautique à travers la mise à disposition :
 - D'un guide méthodologique de démonstration de la fiabilité de composants et dispositifs mécatroniques de rupture.

Le système étudié dans nos travaux de thèse est une carte électronique de puissance des nouvelles générations des modules RADAR. Comme tous les systèmes électroniques de puissance, les défaillances se produisent à cause des hautes valeurs de température ainsi que d'autres paramètres électriques. Plus particulièrement, dans ces systèmes, les pannes peuvent se manifester au niveau des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide.

La particularité des composants utilisés dans ce système est qu'ils ont une forme parallélépipédique (pavé), commercialisé dans le marché de l'électronique sous le nom « cubique », permettant ainsi d'obtenir une structure moins encombrante en réduisant la hauteur du boîtier

D'une manière générale, en termes de fiabilité, la faiblesse des condensateurs électrolytiques est due à la détérioration du diélectrique et des bandes de connexion et aux fuites de l'électrolyte. Technologiquement, la géométrie considérée « cubique » est plus étanche, supporte mieux la pression interne et empêche la fuite de l'électrolyte, ce qui permet d'améliorer la fiabilité du composant.

Compte tenu de la criticité des condensateurs électrolytiques d'aluminium utilisés dans l'application étudiée, il est nécessaire d'étudier leur fiabilité sous les conditions opérationnelles plus critiques.

Afin de mener à bien l'étude de fiabilité de ce type de composant, il est nécessaire d'en identifier expérimentalement tous les paramètres montrant l'état du composant. Il a été démontré que les paramètres électriques classiques caractérisant les condensateurs ne sont pas suffisants, à savoir la capacité, la résistance équivalente série (ESR) et le courant de fuite. C'est pour cela qu'une caractérisation physique et chimique est nécessaire pour compléter le profil de dégradation. De point de vue physique, les exigences de l'encombrement font que le gonflement du boîtier à cause de la pression interne doit être évalué et fait partie des modes de défaillances principaux. D'un

autre côté, l'étude de l'aspect chimique du condensateur permettra de mieux expliquer ses modes de défaillances.

L'essentiel des méthodologies et des résultats obtenus sont présentés dans ce mémoire de thèse qui se structure en quatre chapitres :

Le premier chapitre débute par une description du contexte général. Ensuite, une présentation de la technologie des condensateurs est détaillée en indiquant les différents paramètres qui les caractérisent. Enfin, les différents travaux réalisés dans la littérature sur l'étude et l'évaluation de la fiabilité des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide sont présentés.

Dans le deuxième chapitre, une description détaillée sur le protocole des caractérisations des condensateurs est fournie. Puis, des scénarii des essais de vieillissement sont élaborés en se basant sur le profil de mission du système étudié développé et proposé dans le cadre du projet FIRST-MFP. Ensuite, les évolutions des caractéristiques sont représentées en fonction du temps sous forme de graphe. Enfin, seuls les paramètres ayant une dégradation significative sont modélisés.

Le troisième chapitre porte sur la caractérisation physico-chimique du condensateur afin de comprendre et expliquer les modes de défaillance et les évolutions des paramètres enregistrées dans le chapitre précédent.

Le dernier chapitre est consacré à la réalisation des essais de vieillissement sur les composants montés dans leur système. Le but de ce test est de simuler la dissipation de la chaleur des composants adjacents. Des mesures électriques sont faites en temps réel afin de superviser le profil électrique des condensateurs. Enfin, un essai de stress mécanique est réalisé afin de permettre d'évaluer l'impact des vibrations sur la connectique des condensateurs neufs et vieillis.

Chapitre 1. CONTEXTE GENERAL ET ETAT DE L'ART

1.1 CONTEXTE DE LA THESE

Le développement croissant d'équipements électroniques de puissance touche de nombreux domaines, tant civils que militaires : convertisseurs électriques, stockage d'énergie, alimentation à découpage, filtres, etc. Dans ce cadre, les cartes d'alimentation ont connu ces dernières années, de nombreuses améliorations au niveau de leur architecture et des composants intégrés afin de diminuer leur taux de défaillance indépendamment des conditions environnementales.

Dans le cadre du projet FIRST, nous nous intéressons au sein l'IRSEEM/ESIGELEC, à l'étude de fiabilité de la carte d'alimentation des nouvelles générations des modules RADAR de notre partenaire industriel. En effet, l'utilisation de ces cartes dans un environnement chaud et sec engendre une forte sollicitation des composants électroniques de puissance, conduisant à leur défaillance avant la fin de la période de garantie et réduisant ainsi leur durée de vie. Afin de chiffrer un coût d'achat le plus précis pour le client, la connaissance précise de la durée de vie des équipements est indispensable. Ainsi, quel que soit le type d'environnement, l'évaluation précise de la fiabilité d'un équipement devient un facteur clé pour tout concepteur ainsi qu'un paramètre particulièrement crucial dans un contexte international imposant une amélioration constante de la compétitivité.

Nous étudierons alors la fiabilité et la robustesse de la carte d'alimentation dans le but d'améliorer sa durée de vie dans les conditions extrêmes d'utilisation. D'après le retour d'expérience et la littérature [1] [2] [3], les composants critiques de ce type d'équipement sont les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide.

Dans le système étudié, le rôle des condensateurs est d'assurer un stockage d'énergie électrostatique. Cette fonction de stockage requiert une valeur de 10 000 μ Farad, obtenue par la mise en parallèle de deux condensateurs de 5000 μ F. Cette configuration redondante a pour but d'obtenir une marge de tenue diélectrique suffisante, un supplément de capacité par rapport à la valeur de stockage requise ainsi qu'une réduction de moitié de la résistance équivalente série (ESR) en vue de compenser dans certaines limites, une réduction induite par une dégradation progressive de certaines caractéristiques (augmentation de l'ESR et diminution de la capacité).

La particularité de ces composants est qu'ils ont un format parallélépipédique (commercialisé dans le marché de l'électronique sous le nom de condensateur cubique) qui permet de gagner en espace d'intégration du composant et d'avoir des structures électroniques de puissance plus compactes, d'une part. D'autres part, ces composants sont conçus pour des applications de longue durée de vie, grâce à la structure du boîtier qui est étanche et à la composition de leur électrolyte. Ces caractéristiques seront détaillées dans ce chapitre.

Les données sur le profil de mission de la carte électronique de puissance a permis d'avoir le profil de mission de ces condensateurs du point de vue thermique et du point de vue électrique. Le graphe de la figure 1.1 représente le profil de mission thermique des condensateurs [5]. Les températures sont indiquées par des notations pour des exigences liées à la confidentialité de l'application étudiée et on gardera les mêmes notations pour les autres chapitres.

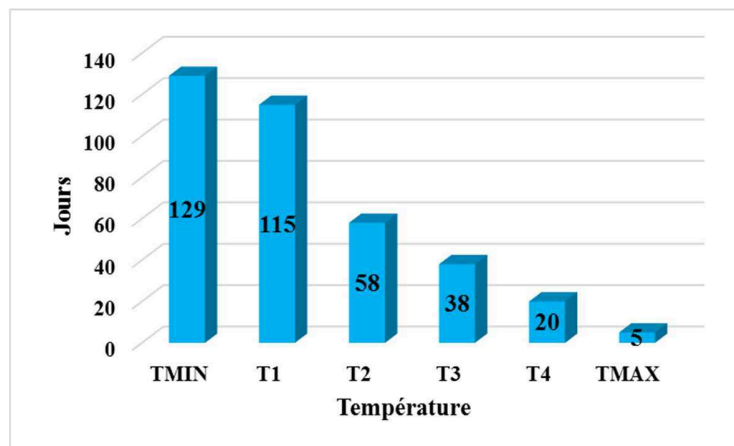


Figure 1-1 : Profil de mission thermique des condensateurs électrolytiques d'aluminium utilisés dans la carte électronique de puissance étudiée [5]

De point de vue électrique, le fonctionnement général de la carte est en mode pulsé qui est caractérisé par un cycle périodique décrit par des créneaux « ON – OFF » :

- ✓ **Au cours de la phase « OFF »** : de plus longue durée (quelques millisecondes), les condensateurs sont chargés à partir de l'alimentation principale du système à travers un convertisseur DC/DC ;
- ✓ **Au cours de la phase « ON »** : ceux-ci sont déchargés transitoirement en un temps très court (quelques centaines de microsecondes) et délivrent un courant impulsionnel de forte amplitude.

Dans un premier temps, on s'intéressera à la définition des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide, en adaptant un modèle électrique équivalent approprié au système électronique de puissance étudié. Dans un deuxième temps, on présentera les outils primordiaux pour l'analyse statistiques de données et la modélisation des évolutions des paramètres suivant des lois de probabilité. Dans un troisième temps, on s'intéressera aux différentes techniques utilisées pour la supervision des paramètres caractérisant les condensateurs montés sur leur système, sans oublier de faire référence aux modes et aux mécanismes de défaillances de ces composants.

1.2 CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE

1.2.1 CONDENSATEURS ELECTROLYTIQUES D'ALUMINIUM

1.2.1.1 Critères du choix du condensateur

Un condensateur est un dispositif pouvant stocker de l'énergie électrostatique. Son choix dépend de la quantité d'énergie à stocker et des conditions électriques de son fonctionnement. Le premier critère déterminera la valeur de la capacité nécessaire, alors que le deuxième sera fixé par la tension qui sera appliquée aux bornes du condensateur et imposé par l'architecture du système.

Les deux figures ci-dessous montrent les différentes familles de condensateurs existant sur le marché en fonction de leur ordre de grandeur de la capacité et celui de la tension d'utilisation [6] [7].

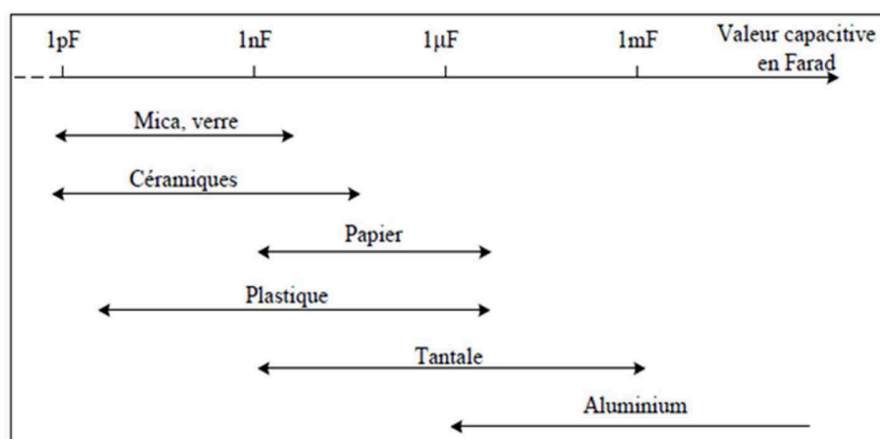


Figure 1-2 : Famille de condensateurs en fonction de leur capacité [7]

Dans notre cas d'étude, les condensateurs servent à stocker de l'énergie électrique assez importante en appliquant une basse tension. Ainsi, le condensateur adéquat pour cette application est le condensateur d'aluminium à électrolyte liquide qui fournit une grande capacité en basse tension d'utilisation.

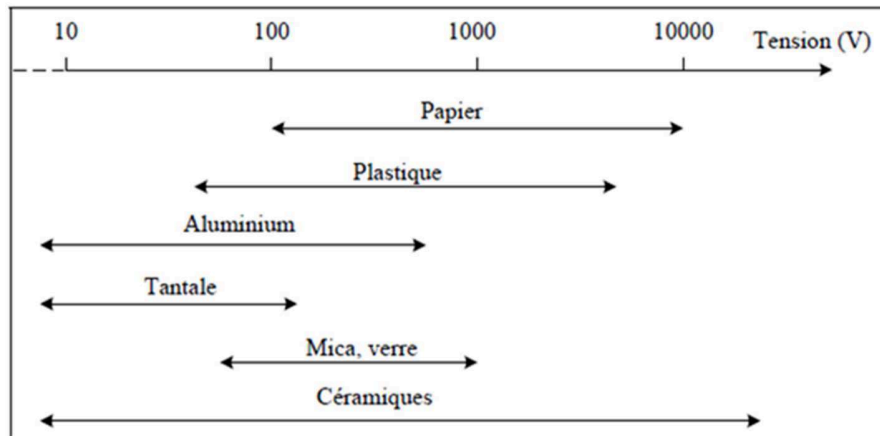


Figure 1-3 : Gamme de tension nominale pour différentes familles de condensateurs [7]

1.2.1.2 Description générale

Le condensateur d'aluminium à électrolyte liquide est constitué d'une première feuille servant d'anode, d'une seconde feuille servant de cathode et d'un papier séparateur. Ces trois éléments sont enroulés ensemble et imprégnés d'un électrolyte. La feuille servant d'anode a une couche d'oxyde d'aluminium agissant comme un diélectrique. Après que la mince feuille d'aluminium a été électro-chimiquement gravée (65 à 100 μm) afin d'augmenter sa surface, le diélectrique est formé par oxydation anodique sur sa surface. En général, la feuille servant de cathode n'utilise pas un processus d'oxydation. La constitution de ce type de condensateur est représentée ci-dessous, cf. Figure 1.4 [7] :

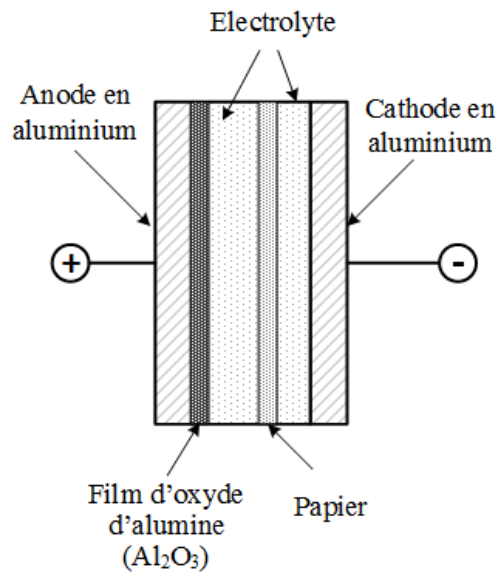


Figure 1-4 : Structure d'un condensateur d'aluminium à électrolyte liquide

1.2.1.3 Formation des électrodes en aluminium

Les électrodes sont composées de feuille d'aluminium de grande pureté (99.99 %) et d'épaisseur de 50 à 100 μm . Étant donné que la valeur de la capacité est proportionnelle à la surface des électrodes, la surface effective doit être suffisamment large et rugueuse avant de déposer la couche du diélectrique. **Equation Chapter (Next) Section 1**

$$C = \varepsilon \frac{S}{e} \quad (1.1)$$

Avec :

S : Surface du diélectrique

ε : Permittivité du diélectrique

e : Epaisseur du matériau diélectrique

Pour ce faire, un processus électrochimique appelé "gravure" est utilisé pour dissoudre une partie du matériau de surface dans le but d'augmenter la surface totale de la feuille sous forme d'un réseau dense de canaux microscopiques. Le processus de gravure consiste à soumettre en continu

la feuille d'aluminium à une solution ionique tout en appliquant une tension AC, DC ou AC/DC entre la solution de gravure et la plaque d'aluminium [8] [9].

1.2.1.4 Diélectrique :

Le diélectrique est une couche isolante qui caractérise principalement un condensateur. Ces propriétés, à savoir son épaisseur, sa surface et sa constante de permittivité, déterminent principalement les propriétés du condensateur par la relation (1.1).

Ainsi, le matériau diélectrique doit posséder :

- ✓ Une résistivité d'isolant élevée pour éviter d'avoir un courant de fuite, qui dissipe l'énergie du condensateur sous forme de chaleur ;
- ✓ Une permittivité appropriée pour avoir la valeur de la capacité désirée ;
- ✓ Une résistance électrique élevée pour résister à de forts gradients de tension, de sorte qu'un matériau mince est requis.

Cependant, il est rarement possible d'obtenir des propriétés optimales en utilisant un seul et un même matériau. Dans la pratique, le diélectrique « claque » lorsque le gradient de tension dépasse la valeur qui peut être supportée par le matériau. Le diélectrique peut se présenter sous forme gazeuse, liquide ou solide. Les diélectriques solides sont rarement homogènes, et sont souvent hygroscopiques. Des charges locales d'espace peuvent apparaître, produisant ainsi des effets d'absorption, des chemins de filaments conducteurs amenant un chauffage local accompagné éventuellement d'une détérioration du matériau. Le claquage dépend de nombreux facteurs, en particulier les facteurs thermiques, et dépend de la durée pendant laquelle la tension est appliquée. D'où, la nécessité de respecter le sens de polarisation du condensateur lors de la mise sous tension.

Le diélectrique des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide est composé d'une couche fine d'oxyde d'aluminium (Alumine), qui est déposé sur la surface gravée de la feuille d'aluminium durant un processus appelé « oxydation anodique ». Ce processus de formation d'oxyde sur une électrode en aluminium nécessite l'application d'une tension continue à 140-200 % de la tension nominale du condensateur, appelé tension de formation U_f . L'épaisseur de la couche d'alumine est de l'ordre de 15 \AA/volt . Au bout d'un certain temps la couche d'alumine ainsi formée atteint une résistance suffisamment importante et le courant diminue fortement pour ne plus laisser circuler qu'un faible courant appelé courant de fuite, noté I_f [9].

1.2.1.5 Bobinage :

Les feuilles d'aluminium (anode et cathode) et le papier imprégné d'électrolyte sont enroulés, cf. Figure 1.5, dans un boîtier en aluminium, lui-même protégé par une enveloppe isolante [8].

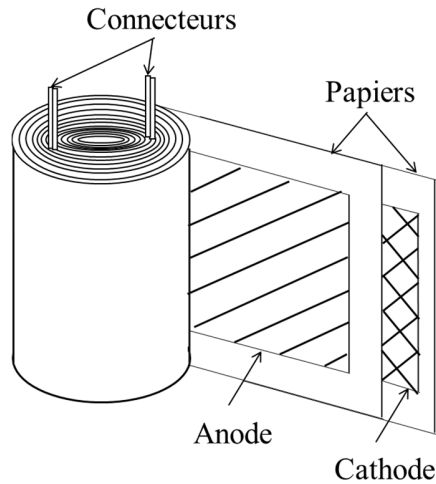


Figure 1-5 : Bobinage d'un condensateur d'aluminium à électrolyte liquide

1.2.1.6 Électrolyte :

Le choix de l'électrolyte dépend de la tension nominale du condensateur, de sa stabilité chimique ainsi que de la pression de vapeur engendrée par un fonctionnement à haute température. L'électrolyte est constitué d'une solution conductrice dissoute dans un solvant, lequel en général est du Gamma-Butyrolactone (GBL) [9].

1.2.1.7 Boîtier :

Les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide disponibles sur le marché sont généralement de forme cylindrique, cf. Figure 1.6. Cependant les condensateurs étudiés ici ont une forme parallélépipédique, permettant de réaliser des structures plus compactes. La Figure 1.7 présente un tel condensateur. Après avoir inséré le bobinage dans le boîtier, ce dernier est fermé entièrement dans un boîtier en aluminium avec un brasage en laser.



Figure 1-6 : Condensateur d'aluminium à électrolyte liquide ayant une forme cylindrique



Figure 1-7 : Condensateur dit "Cubique"

1.2.2 CARACTERISTIQUES

1.2.2.1 Schéma équivalent du condensateur :

Dans la littérature, il existe plusieurs schémas équivalents du condensateur d'aluminium à électrolyte liquide. Nous adapterons un schéma simple représenté ci-dessous, voir Figure 1.8 [10] :

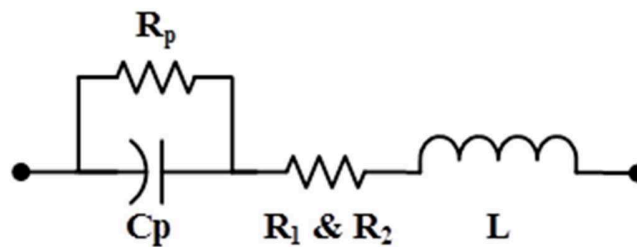


Figure 1-8 : Schéma équivalent des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide

C_p : Capacité anode-cathode (élément principal du condensateur).

R_p : Résistance parallèle (de fuite) due aux couches d'alumine.

R_1 : Résistance des électrodes d'aluminium et des bandes de connexion.

R_2 : Résistance équivalente de l'électrolyte.

L : Inductance équivalente série des connexions et des enroulements.

La capacité C_p dépend principalement de la température et de la tension.

La résistance R_p varie en fonction de la tension appliquée à ses bornes, de la température et du temps de polarisation. Elle représente le courant de fuite du condensateur [6].

Alors que, la résistance R_1 , R_2 et ainsi que l'inductance L varient seulement en fonction de la température.

Ce modèle peut être simplifié par le modèle équivalent série :

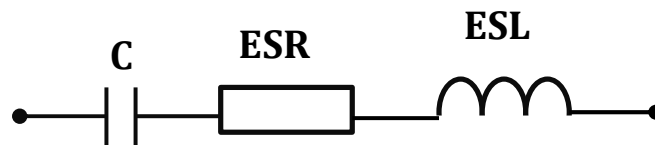


Figure 1-9 : Schéma équivalent série

C : Capacité équivalent série.

ESR : Résistance équivalente série représentant toutes les pertes dans les condensateurs.

ESL : Inductance équivalente série, identique à L , sa valeur est de quelques nH.

D'où l'expression de l'impédance équivalente est donnée par :

$$Z_C = \sqrt{ESR^2 + \left(ESL \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega}\right)^2} \quad (1.2)$$

La capacité équivalente série et la résistance équivalente série dépendent de la fréquence, ce qui est démontré par leurs expressions :

$$C = C_p \cdot \left(1 + \frac{1}{R_p^2 \cdot C_p \cdot \omega^2} \right) \quad (1.3)$$

$$ESR = R_1 + R_2 + \frac{R_p}{1 + R_p^2 \cdot C_p^2 \cdot \omega^2} \quad (1.4)$$

À partir de ces deux grandeurs, on peut définir une autre caractéristique du condensateur qui est le facteur de dissipation :

$$DF = ESR \cdot C \cdot \omega \quad (1.5)$$

Ces trois dernières caractéristiques, ainsi que le courant de fuite, sont parmi les critères d'évaluation d'un condensateur.

1.2.2.2 Courant de fuite :

Pour notre cas d'étude, les condensateurs sont utilisés pour stocker de l'énergie électrique et soumis à une tension continue. Le courant de fuite est donc un indicateur à prendre en compte pour connaître l'état du condensateur.

Ce courant de fuite peut être déterminé par une procédure expérimentale assez simple. Pour ce faire, nous plaçons le condensateur en série avec une résistance sous la tension nominale du condensateur. La résistance sert à limiter le courant et en même temps à le mesurer. Après la période de transition, généralement inférieure à 5 minutes, en fonction de la valeur de résistance, le courant circule de façon constante [11]. Le courant alors mesuré est appelé le courant de fuite. Comme il varie avec la température, cette caractérisation du condensateur se fait à une température de 25°C. Sa valeur maximale admissible est définie par le fabricant.

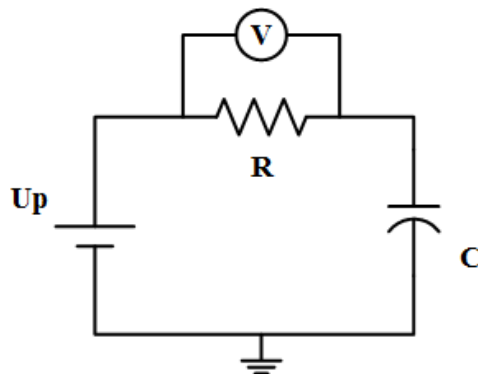


Figure 1-10 : Mesure du courant de fuite

1.2.2.3 La tension de polarisation :

La tension nominale de polarisation du condensateur est la tension d'utilisation maximale conseillée par le fabricant. La surtension et le non-respect du sens de polarisation peut causer la détérioration du diélectrique du condensateur.

1.2.2.4 Influence de la température et de la fréquence :

Le circuit équivalent des condensateurs change avec la température opérationnelle. L'augmentation de la température conduit à l'augmentation de la capacité et à la diminution de l'ESR. Le premier phénomène est dû à l'augmentation de la surface de contact entre l'électrolyte et le diélectrique, alors que le deuxième traduit l'augmentation de la conductivité de l'électrolyte. La valeur de la capacité et la valeur de l'ESR dépendent aussi de la fréquence. En effet, l'augmentation de la fréquence réduit la capacité et l'ESR. Ce comportement est dû au processus de fabrication du condensateur et de sa composition.

1.2.2.5 Courant d'ondulation et Effet Joule :

La valeur efficace maximale acceptable du courant d'ondulation, fourni par le fabricant, dépend de la fréquence d'utilisation du condensateur. D'une manière générale, le fabricant fournit cette valeur à 100 Hz. Pour une fréquence donnée, la valeur maximale de ce courant est calculée en multipliant sa valeur à 100 Hz par un coefficient de multiplication extrait d'un graphe intitulé « Courant d'ondulation en fonction de la fréquence » [12]. Cette valeur ne doit pas être dépassée afin d'éviter l'augmentation de la température du cœur du condensateur conduisant ainsi à l'évaporation de l'électrolyte. Cette température interne est due aux pertes à effet Joule au niveau du cœur du condensateur qu'on peut exprimer par la relation :

$$P_J = ESR \cdot I_R^2 \quad (1.6)$$

I_R : La valeur efficace du courant d'ondulation.

En conséquence, la température interne d'un condensateur, ayant un grand ESR, augmente plus rapidement et accélère le vieillissement du condensateur.

Cette puissance correspond à la puissance thermique dissipée et peut s'exprimer différemment en fonction des caractéristiques thermiques du composant [12] [13] :

$$T_c - T_b = P_J \cdot \theta_{th} \quad (1.7)$$

T_c : Température du cœur du condensateur, en Kelvin.

T_b : Température de boîtier du condensateur, en Kelvin.

Θ_{th} : Résistance thermique entre le cœur et la surface externe du condensateur, en Kelvin par Watt.

1.2.3 MODELE DE DUREE DE VIE DU CONDENSATEUR

Dans la littérature, on trouve plusieurs modèles de durée de vie. Nous donnerons dans cette partie, un modèle général qui prend en considération tous les paramètres cités dans la partie précédente et qui sont mis en avant dans les différents essais de vieillissement effectués dans le cadre des travaux de thèse.

Les conditions, appelées aussi facteurs, électriques et thermiques d'utilisation du condensateur d'aluminium à électrolyte liquide influencent considérablement sa durée de vie qui peut être différente de celle donnée par le fabricant, notée L_0 . D'une manière générale, les niveaux des facteurs appliqués pour déterminer L_0 sont complètement ou partiellement différentes de ceux des conditions opérationnelles. La durée de vie est donc calculée en multipliant la durée de vie de base L_0 par le produit de Ki-facteurs représentant le niveau des contraintes d'utilisation appliquées (électrique et thermique). Dans un environnement d'utilisation donné, le multiplicateur de Ki-facteur est égal à 1 si le facteur est au même niveau que les conditions de calcul de L_0 , sinon il est différent de 1 dans le cas contraire [12] [14].

$$L = L_0 \prod_i K_i \quad (1.8)$$

$$L = L_0 \cdot K_T \cdot K_I \cdot K_V \quad (1.9)$$

K_T : Décrit le comportement du condensateur en fonction de la température du cœur.

K_I : Décrit le comportement du condensateur en fonction de l'ondulation du courant.

K_V : Décrit le comportement du condensateur en fonction de la tension de polarisation.

Les paramètres sont obtenus par les équations :

$$K_T = 2^{\frac{T_0 - T_a}{10}} \quad (1.10)$$

$$K_I = K_i \left[1 - \left(\frac{I_a}{I_n} \right)^2 \right] \frac{\Delta T}{10} \quad (1.11)$$

$$K_v = \left(\frac{U_a}{U_n} \right)^{-n} \quad (1.12)$$

Avec :

T₀ : Température maximale du condensateur, en °C.

T_a : Température ambiante, en °C.

K_i : Coefficient d'accélération dû à l'augmentation de la température à cause du courant d'ondulation, qui est défini par une série de tests accélérés ou défini par le fabricant.

I_n : Valeur efficace du courant d'ondulation permis.

I_a : Valeur efficace du courant d'ondulation appliqué.

ΔT : Gradient de température quand le courant I_a est appliqué.

U_n : Tension de polarisation nominale.

U_a : Tension de polarisation appliquée.

n : Dépend de la forme du boîtier et qui est généralement fourni par le fabricant ou défini par une série des essais accélérés.

Le coefficient **K_T** est obtenu par la simplification de la **loi d'Arrhenius**, qui s'écrit [14] [15] [16] :

$$A = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{T_M - T_C}{T_M T_C} \right)} \quad (1.13)$$

Avec :

T_M : Température maximale du cœur du condensateur, en Kelvin.

T_c : Température du cœur de condensateur, en Kelvin.

E_a : Énergie d'activation, en eV.

k : Constante de Boltzmann, $k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$.

1.2.4 MODES DE DEFAILLANCES

On distingue quatre principaux modes de défaillance [17] :

1.2.4.1 Court-circuit

Le court-circuit entre électrodes peut être induit à cause de la vibration, choc ou la détérioration des bandes de conduction. Il peut être aussi causé par l'application d'une tension polarisation supérieure à la tension nominale, par l'application d'un courant d'ondulation extrême ou par l'application d'impulsion du courant.

1.2.4.2 Circuit-ouvert

Le circuit-ouvert peut être causé si une extrême force est appliquée lors du montage du condensateur sur la carte ou s'il y des vibrations durant la période d'utilisation. Dans ce cas, les connexions entre les bandes de conduction et les deux bornes du condensateur sont déformées ou tordues, ce qui conduit à un circuit-ouvert [18].

1.2.4.3 Chute de la capacité et augmentation des pertes

Si le condensateur est soumis aux conditions ci-dessous, la capacité diminue et l'énergie dissipée augmente :

- ✓ Si la tension inverse est appliquée d'une façon continue.
- ✓ Si le courant d'ondulation appliqué dépasse la valeur maximale.
- ✓ Si le condensateur subit un fort cycle de charge/décharge.

1.2.4.4 Destruction du boîtier

La surpression dans le boîtier est due à l'évaporation de l'électrolyte causée par la tension en inverse, surtension ou un courant d'ondulation extrême. Ce qui en résulte une déformation remarquable du boîtier et particulièrement lorsque ce dernier est bien étanche.

Le schéma ci-dessous résume les modes, les mécanismes et les causes de défaillance constatés par des fabricants des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide [19] [20] [21] :

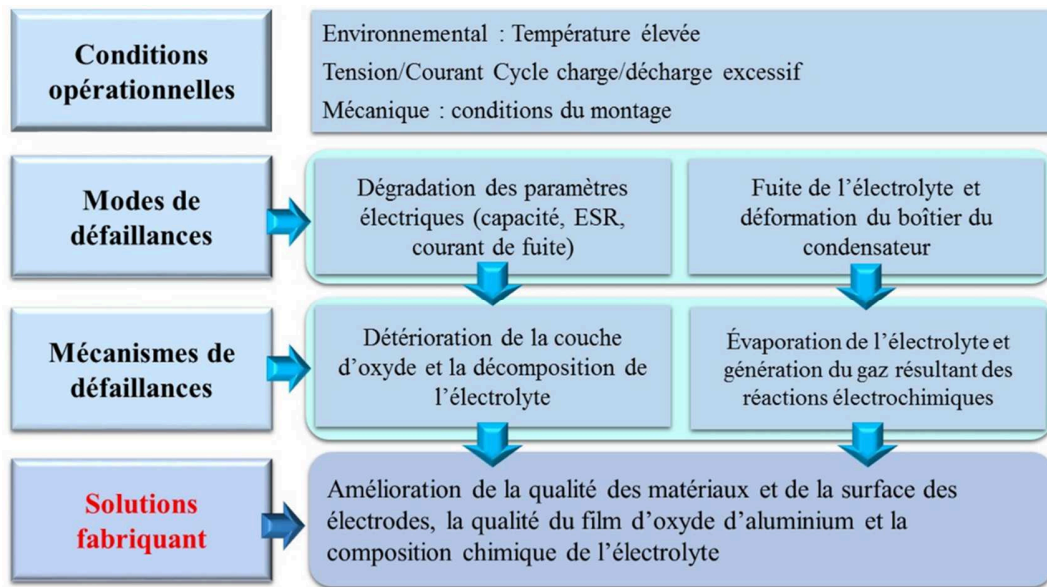


Figure 1-11: Les modes et les mécanismes de défaillances d'un condensateur d'aluminium à électrolyte liquide

1.3 FIABILITE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES

1.3.1 DEFINITION

La fiabilité est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction requise, dans des conditions données et pour une période de temps donnée.

Cette période de temps spécifiée peut être la durée de garantie, la durée de vie, le temps de mission ou une autre période d'intérêt. La durée de vie doit correspondre aux attentes des clients et être compétitive sur le marché [22] [23].

D'après cette définition, la fiabilité est quantifiée par la probabilité, ce qui implique l'utilisation des probabilités et statistiques. Dans le paragraphe suivant, nous décrivons les outils mathématiques pour le calcul de la fiabilité.

1.3.2 METRIQUES DE FIABILITE [22] [23]

1.3.2.1 Densité de défaillance

Elle est notée $f(t)$ et signifie la distribution de la défaillance sur toute la plage de temps et représente la vitesse absolue de défaillance. Plus $f(t)$ est grande, plus la défaillance se produit dans un petit intervalle de temps au voisinage de t .

1.3.2.2 Fonction de répartition de défaillance

Notée $F(t)$, elle est la probabilité qu'un produit tombe en panne en un temps t précis. Mathématiquement, elle est définie par :

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt \quad (1.14)$$

1.3.2.3 Fonction de fiabilité

Elle est notée $R(t)$ et aussi nommée la fonction de survie. $R(t)$ est la probabilité du succès, qui est le complément de $F(t)$ et s'écrit comme suit :

$$R(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) = \int_t^{+\infty} f(t)dt \quad (1.15)$$

1.3.2.4 Taux de défaillance

Le taux de défaillance, $\lambda(t)$, représente la probabilité conditionnelle d'avoir une défaillance dans l'intervalle de temps $[t, t + dt]$, sachant qu'il n'y a pas eu de défaillance dans l'intervalle de temps $[0, t]$. Son unité est le FIT (Failure In Time) et elle représente le nombre de défaillances survenues en 10^9 heures [24].

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \frac{1}{R(t)} \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.16)$$

1.3.2.5 Courbe en baignoire

L'évolution du taux de défaillance en fonction du temps suit une courbe dite «baignoire», cf. Figure 1-12. Elle permet de mettre en évidence de manière empirique, trois phases de la vie d'un produit ou d'un système, qui sont :

- a. **La période de défaillances précoces I** : due aux défauts de jeunesse des dispositifs, où le taux de défaillance $\lambda(t)$ décroît. Les défaillances sont causées par des défauts majeurs latents, qui se manifestent pendant la durée de service. Ces défauts sont induits par le processus de fabrication, le flux de matière et l'erreur dans le design ; le mauvais usage de l'utilisateur est une autre cause de défaillances précoces.

- b. La période intermédiaire II :** où le taux de défaillance est approximativement constant, correspondant à la durée de vie normale. Pendant cette période de temps, les défaillances ne suivent pas un modèle prévisible et se produisent d'une façon aléatoire en raison des changements imprévus dans les contraintes.
- c. La période d'usure III :** où le taux de défaillance augmente en fonction du temps traduisant l'effet irréversible du vieillissement. La dégradation ou l'usure s'accumule et accélère dans le temps. Une maintenance préventive est souvent nécessaire pour remplacer les produits défaillants et minimiser les effets des défaillances.

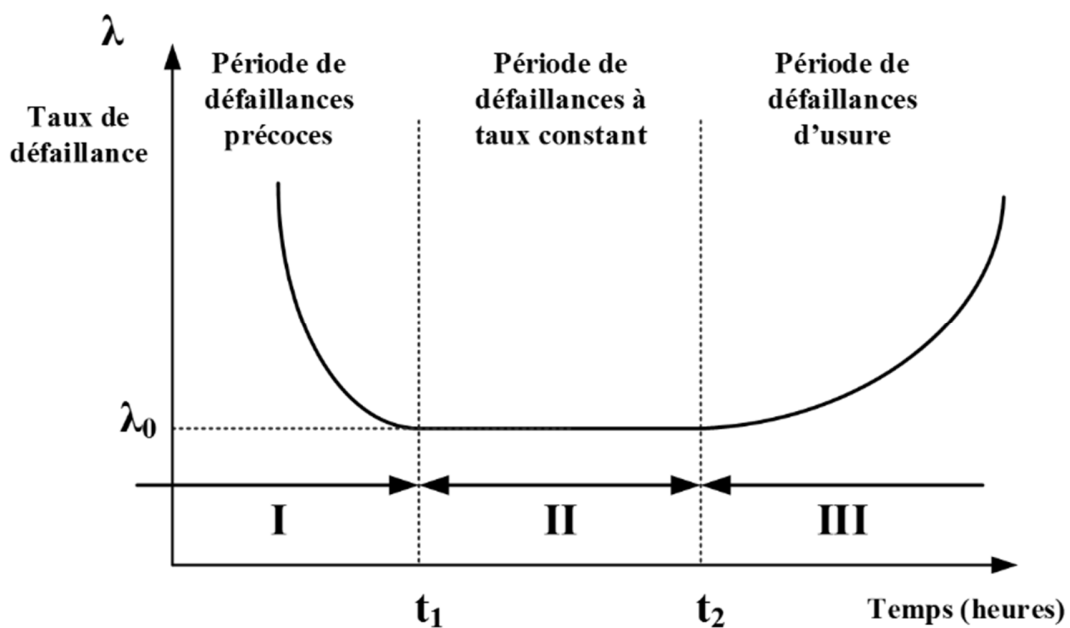


Figure 1-12 : Taux de défaillance en fonction du temps

1.3.2.6 Durées moyennes de la fiabilité

- ✓ Mean Time To Failure (MTTF) : est la durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance et s'écrit :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1.17)$$

- ✓ Mean Time To Repair (MTTR) : est la durée moyenne de réparation.

- ✓ Mean Up Time (MUT) : est la durée moyenne de fonctionnement après réparation.
- ✓ Mean Down Time (MDT) : est la durée moyenne d'indisponibilité après défaillance.
- ✓ Mean time Between Failure (MTBF) : Durée moyenne entre deux défaillances.

$$MTBF = MDT + MUT \quad (1.18)$$

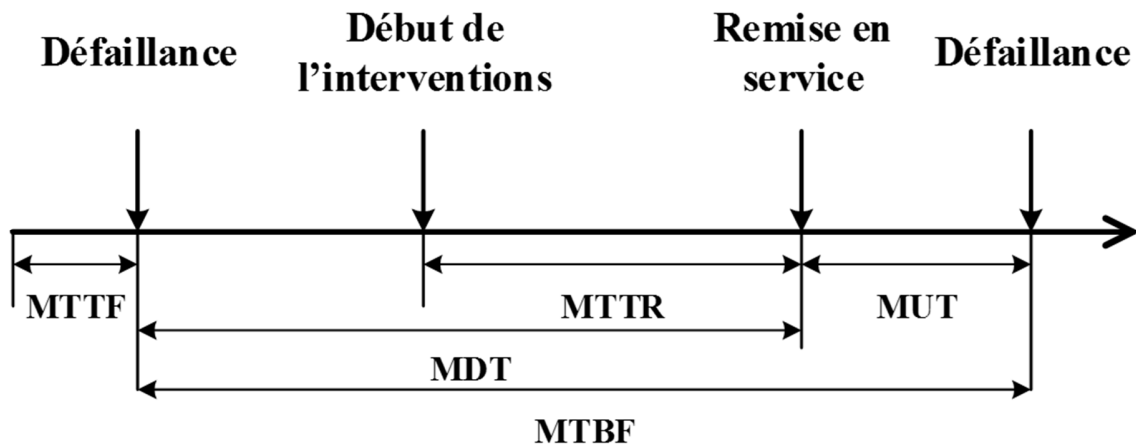


Figure 1-13 : Définition graphique des durées moyennes

La fiabilité est donc une grandeur quantitative et nécessite la connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer. Il existe de nombreuses lois de défaillance et nous présentons les lois de défaillances qui interviennent le plus dans l'analyse de fiabilité des systèmes électroniques.

1.3.3 PRINCIPALES LOIS DE PROBABILITE [22] [23]

1.3.3.1 Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La loi exponentielle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire). Cette loi décrit le temps écoulé

jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. Elle est définie par un seul paramètre, le taux de défaillance, λ qui est constant et noté λ_0 sur la Figure 1-12.

Elle est caractérisée par :

✓ Fiabilité :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.19)$$

✓ Densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.20)$$

✓ Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \lambda \quad (1.21)$$

Cependant, la littérature a démontré que la loi exponentielle ne décrit pas d'une manière adéquate la durée vie de certains composants électroniques, comme les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide. La distribution de Weibull semble plus adaptée car les défaillances de ce type de composants sont dues à la dégradation de leurs performances.

1.3.3.2 Loi de Weibull

La forme la plus générale de la distribution de Weibull dépend de trois paramètres :

- ✓ β : paramètre de forme ($\beta > 0$).
- ✓ η : paramètre d'échelle (durée de vie, $\eta > 0$).
- ✓ γ : paramètre de position ou décalage à l'origine ($\gamma \geq 0$).

La loi de Weibull est caractérisée par :

✓ Fonction de densité :

$$\begin{cases} f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\eta}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left(- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right) & \text{pour } t \geq \gamma \\ f(t) = 0 & \text{pour } t < \gamma \end{cases} \quad (1.22)$$

✓ Fonction de distribution de défaillance :

$$\begin{cases} F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) & \text{pour } t \geq \gamma \\ F(t) = 0 & \text{pour } t < \gamma \end{cases} \quad (1.23)$$

✓ Taux de défaillance :

$$\begin{cases} \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} & \text{pour } t \geq \gamma \\ \lambda(t) = 0 & \text{pour } t < \gamma \end{cases} \quad (1.24)$$

En général, on prend $\gamma = 0$ et cette loi devient la loi de Weibull à deux paramètres, noté Weibull-2P.

1.3.3.3 Loi normale

Cette loi de distribution dépend de deux paramètres :

- ✓ σ : paramètre de forme. Elle correspond à l'écart type de la loi normale.
- ✓ μ : paramètre d'échelle, qui correspond à l'espérance.

Cette loi est caractérisée par :

✓ Fonction de densité :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.25)$$

✓ Fonction de distribution de défaillance :

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.26)$$

✓ Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\int_t^{+\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (1.27)$$

Cette loi est l'une des meilleures lois qui décrivent d'une manière précise la distribution de la durée de vie, ainsi que ces propriétés facilitent la conception des systèmes fiables composés d'éléments dont leurs caractéristiques suivent une loi normale.

1.4 ETAT DE L'ART DES TRAVAUX SUR LA FIABILITE DES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTIQUE LIQUIDE

1.4.1 TRAVAUX PORTANT SUR LA MODELISATION DE LA FIABILITE DES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE

Selon la littérature portant sur les systèmes électroniques de puissance, les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide représentent les composants ayant le taux de défaillance le plus élevé [1] [25] [26] [27]. Ces défaillances provoquent à la fois la divergence d'une ou plusieurs des grandeurs électriques fixées par le système ou la détérioration des sous-ensembles constituant le système ; d'où la nécessité de mettre en place un planning de maintenance préventive pour changer les composants avant que la panne ne survienne afin d'éviter le dysfonctionnement du système surtout quand il est utilisé pour des applications critiques [28].

Pour des applications sensibles, la prévision de la panne d'un système électronique de puissance est primordiale et consiste, tout d'abord, en la détermination du taux de défaillances de ces condensateurs en fonction des contraintes opérationnelles. En effet, le calcul de la durée de vie de cette technologie de condensateur dépend essentiellement des facteurs environnementaux, à savoir la température, l'humidité, la pression et la vibration d'une part. D'autre part, il dépend des facteurs électriques comme la tension, le courant d'ondulation et le cycle de charge/décharge. Parmi ces facteurs mentionnés, la température ambiante et le courant d'ondulation appliqué sont considérés comme des facteurs les plus endommageant qui causent la réduction de la durée de vie du composant [13] [29]. Tandis que les autres facteurs environnementaux pourraient avoir un impact considérablement faible. La tension appliquée pourrait avoir un effet négligeable sur la durée de vie du condensateur dans la limite de la tension nominale fixée par le fabricant.

La sensibilité à la température est due principalement à la nature électrochimique du composant. Les hautes températures pourraient accélérer le vieillissement du composant qui

particulièrement se manifeste en la diminution de la valeur de la capacité et l'augmentation de la valeur de la résistance équivalente série (ESR) à cause de l'évaporation et la fuite graduelle de l'électrolyte à travers les joints du condensateur [13] [30] [31].

De nombreux travaux de recherche ont étudié la dégradation des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide en utilisant :

- ✓ Des modèles physiques reflétant la variation des paramètres électriques comme l'ESR.
- ✓ Des systèmes en temps réel qui permettent de superviser les caractéristiques du condensateur.
- ✓ Cependant, peu d'études traitent de l'effet de la dégradation sur l'évaluation de la fiabilité compte tenu du profil de mission du système étudié.

1.4.1.1 Modélisation physico-chimique des condensateurs [13] [30]

Les méthodes les plus répandues sur la surveillance de l'état des condensateurs se basent souvent sur la surveillance de la valeur de l'ESR. En effet, à température élevée, le phénomène d'évaporation de l'électrolyte devient plus important et les réactions chimiques pourraient avoir leur vitesse qui augmente. Ce qui conduit à une augmentation de la valeur de l'ESR [13] [30]. Ce qui a permis d'établir une relation qui lie le volume de l'électrolyte à la valeur de l'ESR :

$$\frac{ESR}{ESR_0} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 \quad (1.28)$$

Avec :

ESR : la résistance équivalente série à 20 °C (Ohm)

ESR₀ : la valeur initiale de l'ESR (Ohm)

V : le volume de l'électrolyte

V₀ : le volume initial de l'électrolyte.

Pour ce modèle, il est primordial de connaître la valeur initiale du volume de l'électrolyte. Cependant dans la pratique, il est difficile de connaître cette valeur pour chaque condensateur, même s'il s'agit du même lot de condensateur. Ceci est dû à la tolérance lors de leur fabrication.

Ce modèle conduit à un autre qui suppose que le taux de perte de l'électrolyte est proportionnel à la pression de la vapeur de l'électrolyte :

$$\frac{dV}{dt} = kP \quad (1.29)$$

Avec :

t : temps en heures.

k : constante du taux de fuite (Units/mmHG/h).

P : la pression de la vapeur de l'électrolyte (mmHg).

La pression d'un liquide dépend de la valeur absolue de la température et des propriétés chimiques du liquide, comme le montre l'équation :

$$P = \exp\left(-\frac{A}{T} + B\right) \quad (1.30)$$

Avec :

T : la température absolue en Kelvin.

Les constantes A et B sont fournis par le manuel de la chimie [32] et dépendent du type du solvant utilisé dans l'électrolyte.

La température absolue représente la température du cœur du condensateur et elle est la somme de la température ambiante et le gradient de température généré par l'effet Joule résultant du passage du courant d'ondulation à travers l'ESR. Le gradient de température est calculé en utilisant cette relation :

$$\Delta T = \frac{ESR_{hot} \cdot I^2}{H \cdot S} \quad (1.31)$$

Avec :

I : le courant d'ondulation (A).

H : Transfert thermique par unité de surface (W/m² C).

S : Surface du condensateur (m²).

ESR_{Hot} : ESR sous la température opérationnelle.

La valeur de la quantité de chaleur échangée, représentée par H dans l'équation (1.31), est difficile à estimer vu qu'elle dépend de la forme du condensateur et de la résistance thermique de ce dernier.

C'est pour cette raison que l'on recourt à la modélisation thermique du condensateur en fonction de ses dimensions et de sa conductivité de transfert thermique. Ceci est généralement réalisé pour le cas d'un condensateur ayant une forme cylindrique.

Alors que la variation de l'ESR en fonction de la température absolue est donnée par :

$$\frac{ESR_{hot}}{ESR} = D + Y \exp\left(-\frac{T_{amb}}{F}\right) \quad (1.32)$$

Avec :

T : la température ambiante en Kelvin.

ESR : la valeur de l'ESR à la température 20°C (Ohm).

ESR_{hot} : la valeur de l'ESR à la température T.

Les constantes D, Y et F sont déterminés expérimentalement.

L'intégration de la relation (1.29) permet d'avoir le volume de l'électrolyte à l'instant t tout en ayant la valeur de la pression et le volume à l'instant t-1 :

$$V_t = V_{t-1} + k.P.\Delta t \quad (1.33)$$

Avec Δt le pas d'intégration en heures.

A partir du calcul de ce volume, on pourra calculer la nouvelle valeur de l'ESR initiale à la température 20°C en suivant un algorithme de calcul qui fait appel aux équations précédentes, cf. Figure1-14.

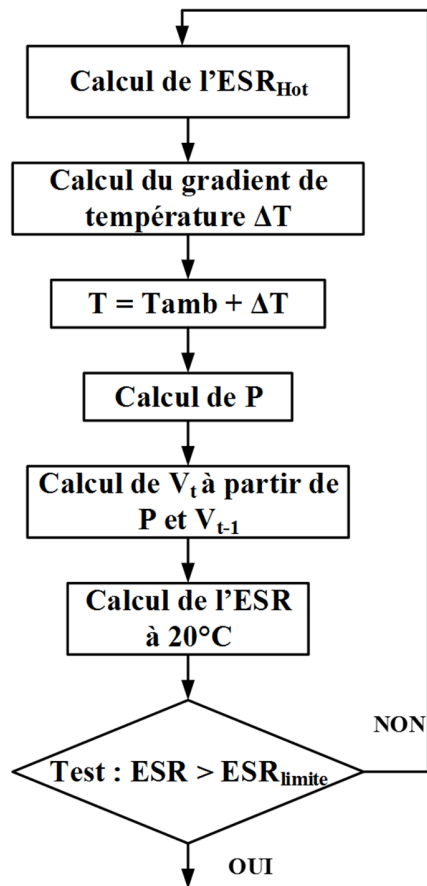


Figure 1-14 : Algorithme d'estimation de la valeur de l'ESR

Les limites de ce modèle décrit ci-dessus sont dues au fait qu'il se base sur le fait que le mécanisme dominant du vieillissement du condensateur est l'évaporation de l'électrolyte et sa perte à travers les joints de fermeture du boîtier. Ce mécanisme est notablement sensible à la température et se traduit électriquement par l'augmentation de la valeur de l'ESR, d'un côté. D'un autre côté, la connaissance la conductivité thermique des condensateurs n'est pas toujours facile à déterminer et nécessite d'avoir plus de données sur sa forme.

1.4.1.2 Supervision en temps réel des paramètres du condensateur [35] [36]

Il existe plusieurs techniques pour superviser le fonctionnement des condensateurs montés dans leur système [3] [4] [33] [34]. Cependant, la plupart de ces méthodes nécessite la mise en place d'un système d'acquisition d'une ou plusieurs grandeurs électriques (tension, courant et puissance), d'un système de calcul qui permet d'extraire les caractéristiques du condensateur (ESR

et capacité) à partir des données mesurées. Par conséquent, ces techniques sont à la fois coûteuses et non pratiques, surtout dans des systèmes contenant plusieurs condensateurs [37]. Sans oublier que la plupart de ces méthodes nécessite une phase d'apprentissage pour récupérer les valeurs de référence, ce qui n'est pas réalisable pour le cas d'une grande production d'usine des systèmes électroniques de puissance.

Toutefois, il existe certains systèmes électroniques de puissance comme les Alimentations Sans Interruption (ASI) qui sont dotées de ressources puissantes qui permettent la régulation et le contrôle. Ces ressources peuvent être mises au service de la maintenance en temps réel sans perturber le fonctionnement normal de l'ASI. Ils permettent de mettre en place des capteurs et des systèmes de traitement numérique.

Pour ces systèmes, la méthode se décompose en deux étapes. La première étape permet l'identification en temps réel de l'ESR et de la valeur de la capacité en utilisant un filtre de Kalman avec un Algorithme d'Adaptation Paramétrique (A.A.P.) dont les instructions sont exécutées par le système de traitement numérique du signal (DSP : Digital Signal Processor) de l'API, cf. Figure 1-15.

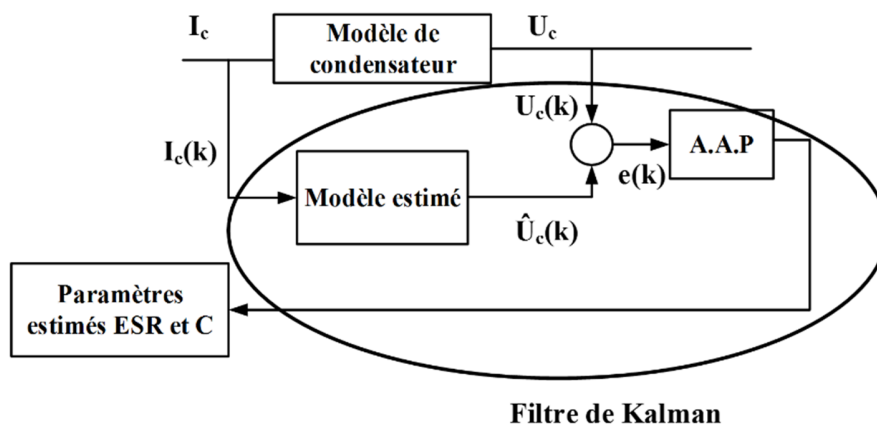


Figure 1-15 : Filtre de Kalman pour l'identification des paramètres internes du condensateur

Ce filtre utilise deux grandeurs électriques qui sont :

- ✓ La tension électrique qui est à la fois la tension de sortie du système et la tension du condensateur.

- ✓ Le courant du condensateur qui est mesuré ou extrait d'une mesure de courant fourni par un capteur de courant.

La deuxième étape intègre les paramètres estimés, l'ESR et la capacité, dans un algorithme de vieillissement qui est basé sur des modèles expérimentaux de dégradation des valeurs de l'ESR et de la capacité, et de calcul de la durée de vie qui sont exprimés ci-dessous [6] [7] :

- ✓ Modèle de dégradation :

$$ESR(t_{ESR}) = (ESR(0) + A) \cdot \exp(B \cdot t_{ESR}) \quad (1.34)$$

$$C(t_C) = E \cdot C(0) + F \cdot t_C \quad (1.35)$$

- ✓ Modèle de durée de vie :

$$\frac{t'_{ESR}}{t_{aESR}} = \exp \left[\frac{E_{aESR}}{k} \cdot \frac{T' - T_a}{(T' + 273) \cdot (T_a + 273)} \right] \quad (1.36)$$

$$\frac{t'_C}{t_{aC}} = \exp \left[\frac{E_{aC}}{k} \cdot \frac{T' - T_a}{(T' + 273) \cdot (T_a + 273)} \right] \quad (1.37)$$

Avec :

T_a : température ambiante référente (25°C).

T' : température de vieillissement.

t_{aESR} : temps de vieillissement en se basant sur la valeur limite de l'ESR sous T_a.

t_{aC} : temps de vieillissement en se basant sur la valeur limite de la valeur C sous T_a.

t'_{aESR} : la durée de vie limite à T' en utilisant l'ESR comme indicateur de vieillissement.

t'_{aC} : la durée de vie limite à T' en utilisant la capacité comme indicateur de vieillissement.

t_{aESR} : temps jusqu'à la défaillance en utilisant l'ESR comme indicateur de vieillissement.

t_{aC} : temps jusqu'à la défaillance en utilisant la capacité comme indicateur de vieillissement.

k : constante de Boltzmann (8.617.10⁻⁵ eV/°K).

E_{aESR} : énergie d'activation en utilisant l'ESR comme indicateur de vieillissement.

E_{aC} : énergie d'activation en utilisant la capacité comme indicateur de vieillissement.

Les paramètres A, B, E et F sont dépendants du type du condensateur utilisé. La détermination de ces derniers est effectuée par un algorithme de Levenberg Marquardt.

L'ensemble du système de supervision en temps réel des condensateurs peut être modélisé par le schéma de la Figure 1-16.

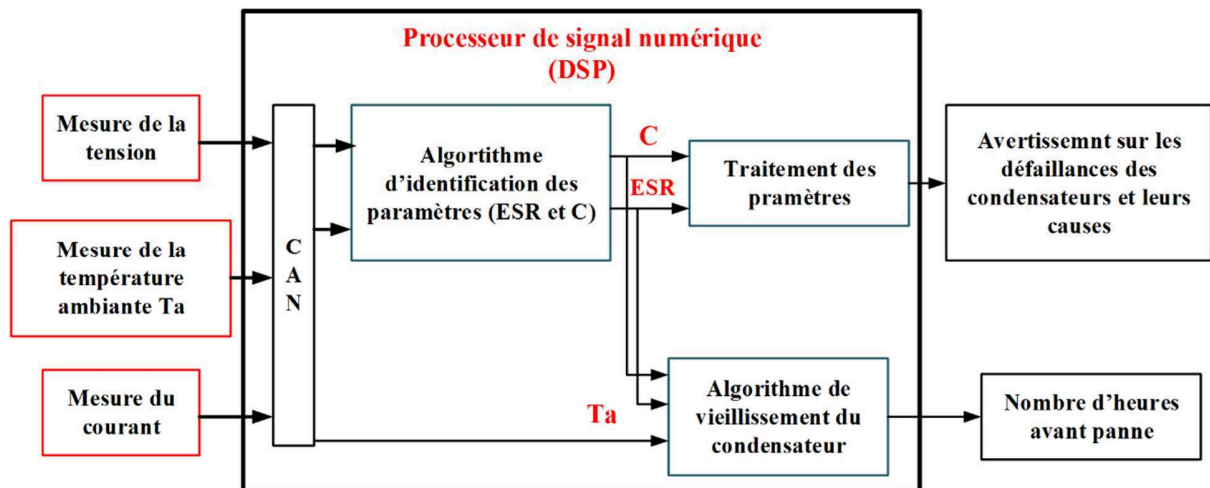


Figure 1-16 : Procédure de réalisation expérimentale du système de surveillance de maintenance prédictive des condensateurs

Certes l'assemblage des deux parties permet de prévoir en temps réel la durée de vie restant du condensateur en se basant sur les grandeurs électriques et la température. Par conséquent, on pourra programmer la maintenance préventive et anticiper les pannes.

Cependant, cette méthode présente des inconvénients majeurs. Le premier est que cette méthode est valable pour un système doté d'un système numérique puissant. Le deuxième est que cette méthode se base sur l'hypothèse que le système a un seul mode de fonctionnement et ainsi ne prend pas en compte son profil de mission.

1.4.1.3 Approche par la physique de défaillance basée sur l'analyse statistique et sur le profil de mission système [38]

Au cours des dernières décennies, les systèmes électroniques de puissance ont été largement utilisés dans les applications de conversion d'énergies durables, telles que les énergies

renouvelables, les moteurs électriques, l'aéronautique, etc. La criticité de ces applications rend les défaillances d'un système électronique de puissance plus coûteuses, en raison non seulement de la maintenance, mais aussi des effets négatifs sur les systèmes environnants [40] [41]. Aujourd'hui les exigences du marché impliquent une réduction des coûts ainsi que des délais de développement et de tests. Pour atteindre cet objectif, l'évaluation de la fiabilité est intégrée dans la phase de la conception en se basant sur l'approche de la physique de défaillance, dont les principaux outils sont : les moyens de simulation, les tests de dégradation ou vieillissement sur composants, la traduction des profils de mission et l'analyse statistiques des données.

Le profil de mission indique les conditions et les fonctions opérationnelles du système électronique de puissance durant son cycle de vie. Il définit par exemple les plages de tension et courant, les comportements d'utilisation des clients, ainsi que les facteurs environnementaux tels que la température, humidité, niveau de vibration, etc. Autrement dit, il définit les contraintes subies par le système et qui peuvent être la source principale de sa défaillance. Pour cette raison, la compréhension des profils de mission est également une étape fondamentale pour l'analyse de fiabilité [39].

Une étude se basant sur cette approche a été menée sur les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide montés sur les convertisseurs des alimentations de secours. L'évaluation de la fiabilité de ces composants dans leur environnement d'utilisation a fait appel aux éléments suivants :

- ✓ Analyse statistique des données des essais de dégradation et estimation de la durée de vie.
- ✓ Evaluation de la fiabilité en se basant sur le profil de mission du système.

a. Analyse des données de dégradation

Un test de dégradation a été mené sur une série de 9 condensateurs sous des conditions thermique et électrique bien définies, avec des mesures régulières de l'ESR et de la capacité sur 4000 heures. Une chute de 20 % de la valeur de la capacité est considérée comme le critère de fin de vie et le temps de défaillance de chaque condensateur peut être estimé sur cette base.

En utilisant le rang médian avec un niveau confiance de 50 %, le rang des 9 condensateurs défectueux peut être calculé en utilisant l'approximation de Bernard. La fonction de non-fiabilité est présentée en utilisant la distribution de Weibull [42], cf. Figure 1-17.

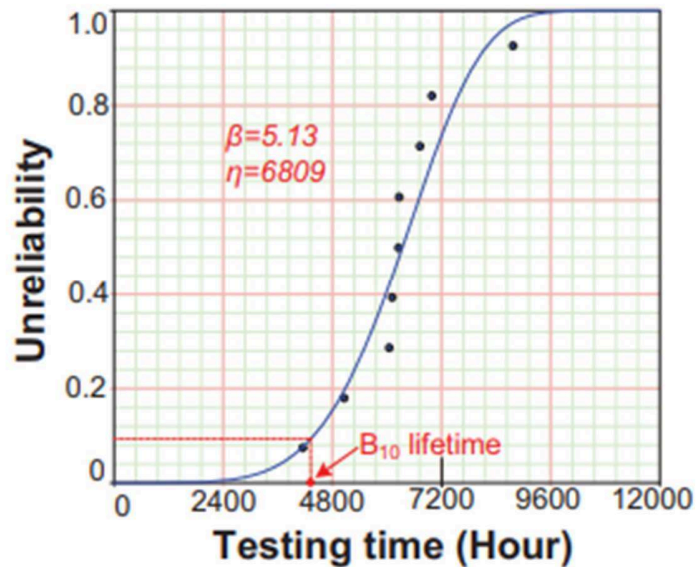


Figure 1-17 : Fiabilité des condensateurs et du temps de fonctionnement en utilisant la distribution de Weibull [38]

D'autre part, une forme typique de modèle de durée de vie faisant appel au modèle d'Arrhenius est utilisée sous la forme [16] [43] :

$$L(T) = L_0 \cdot 2^{\frac{T_0 - T}{n_1}} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{-n_2} \quad (1.38)$$

Avec :

L_0 et L sont respectivement la durée de vie sous les conditions de référence et sous les conditions d'utilisation.

V_0 et V sont respectivement la tension sous les conditions de référence et sous les conditions d'utilisation.

T_0 et T sont respectivement la température sous les conditions de référence et sous les conditions d'utilisation.

Pour le type du condensateur étudié, la valeur de n_1 et n_2 sont respectivement 10 et 0. D'où, la relation devient :

$$L = L_0 \cdot 2^{\frac{T_0 - T}{10}} \quad (1.39)$$

b. Profil de mission

On distingue deux types de modes de fonctionnement principaux des alimentations de secours. Ils fonctionnent soit en mode veille dans le cas des conditions normales, soit en mode opérationnel dans le cas d'une coupure de courant. De point de vue thermique, La distribution annuelle de la température est décrite sur la Figure 1-18.

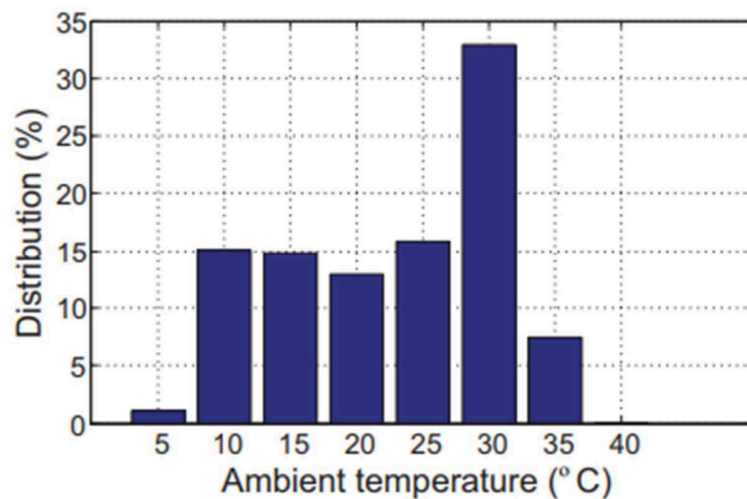


Figure 1-18 : La distribution annuelle de la température ambiante d'une alimentation de secours

Dans le cas de fonctionnement en mode veille, la température du cœur du condensateur est la même que la température ambiante. Alors que dans le cas du mode de fonctionnement, il faut

rajouter un gradient de température à la température ambiante. C'est pour cette raison qu'on utilise la règle de Miner qui permet de décrire l'endommagement annuel causé par la température [44].

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{P \times 365 \times 24 \times P_{T_a}}{L(T)} = \frac{P \times 365 \times 24}{L_0} \sum_{i=1}^N \frac{P_{T_a}}{2^{\frac{T_0 - T}{10}}} \quad (1.40)$$

Avec :

N : Nombre de niveau de température appliqué.

P : Le pourcentage du fonctionnement du convertisseur dans un mode donné.

L : La durée de vie estimée à la température T.

T : Correspond à la température ambiante s'il s'agit du mode en veille. Cependant, elle correspond à la température ambiante plus le gradient de température du condensateur dans le cas du mode de fonctionnement.

Cette approche peut être résumée par ce schéma :

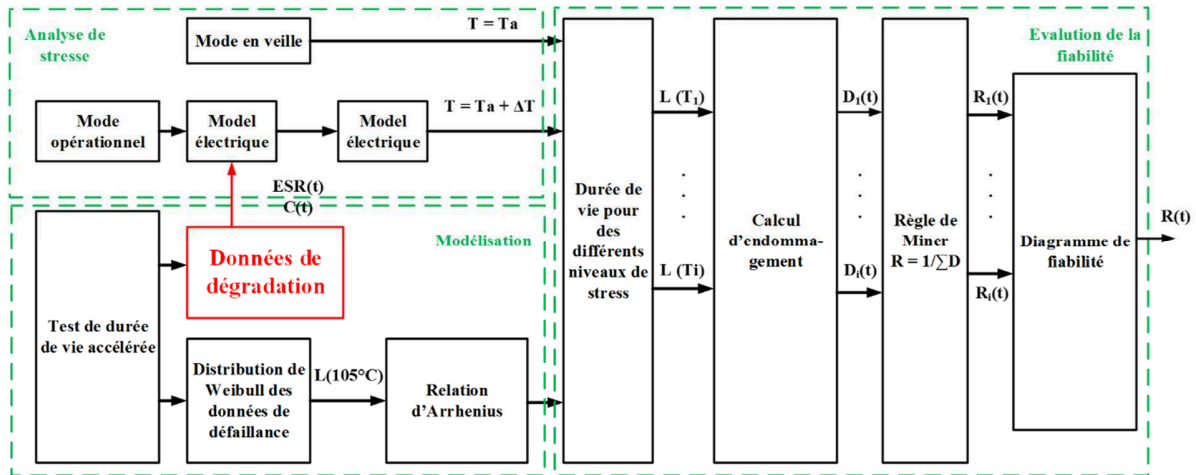


Figure 1-19 : Evaluation de la fiabilité basée sur le profil de mission

L'avantage de cette approche est qu'elle prend en considération à la fois les conditions de fonctionnement du système et celles du composant. Cependant, les mécanismes de défaillances du condensateur ne sont pas toujours faciles à cerner et ne se limitent pas à la variation de leurs paramètres électriques [44]. En effet, il y a des cas où le condensateur cause des pannes

catastrophiques au niveau système sans que ses paramètres électriques ne se dégradent. A cette fin, la connaissance des différents mécanismes et mode de défaillance est primordiale.

1.4.2 MECANISMES DES DEFAILLANCES [7] [31]

On peut distinguer quatre principaux types de défauts :

1.4.2.1 Fuite de l'électrolyte

Après avoir fait subir aux condensateurs un vieillissement en température et en tension, on visualise des fuites de l'électrolyte au niveau de la soupape de sécurité, cf. Figure 1-20.



Figure 1-20 : Fuite de l'électrique sur un composant vieilli [7]

1.4.2.2 Cassure et déformation du boîtier

L'exposition des condensateurs à une haute température accélère les réactions chimiques qui libèrent des gaz, qui sont la principale cause de l'augmentation de la pression interne. Ce qui conduit à une cassure et une déformation du boîtier.

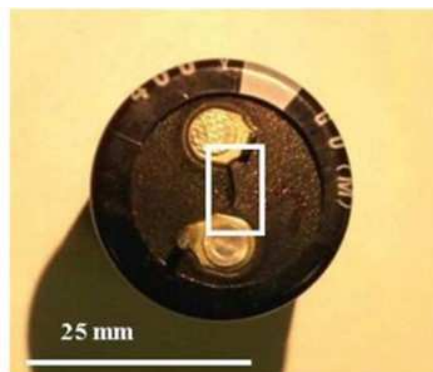


Figure 1-21 : Fissure dans les joints d'étanchéité [31]



Figure 1-22 : Image aux rayons X montrant la déformation du boîtier [31]

1.4.2.3 Court-circuit interne

D'une manière générale, le court-circuit interne est causé par une explosion du boîtier qui déforme par la suite le bobinage du boîtier. Ce qui crée un court-circuit entre les deux électrodes.

1.4.2.4 Corrosion de l'anode

L'exposition de l'anode aux attaques des ions halogènes contribue à la corrosion de l'anode. Ce qui implique deux types de défauts : mise en circuit-ouvert ou mise en court-circuit par contact entre les deux électrodes à cause des fissures au niveau des bandes. Ce dernier phénomène se traduit par une augmentation du courant de fuite.



Figure 1-23 : Des défauts sur l'anode d'un condensateur vieilli

1.5 CONCLUSION

Cette première partie présente d'une manière générale la fiabilité des composants et des systèmes. Dans le cas particulier du condensateur d'aluminium à électrolyte liquide, nous avons

relevé ses différentes caractéristiques afin d'obtenir un modèle de durée de vie aussi proche que possible de la réalité afin d'évaluer la durée de vie du condensateur utilisé dans les cartes d'alimentation soumises à différents types de stress, à savoir électrique, thermique et mécanique.

Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir recours à des données empiriques issues des essais appelés essais de vieillissement. Ce type d'essais permet de gagner en temps, puis, d'établir un modèle de dégradation en fonction du temps et enfin d'estimer la durée de vie du composant en fonction des contraintes.

Dans le chapitre suivant, nous expliquerons les essais de vieillissement qui nous permettront de bien comprendre le comportement du condensateur vis-à-vis des conditions opérationnelles dans la carte d'alimentation du RADAR.

Chapitre 2. ESSAIS DE VIEILLISSEMENT SUR COMPOSANTS ET SUR SYSTEME

2.1 INTRODUCTION

Ce chapitre porte sur l'étude de vieillissement des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide en se basant sur le profil de mission du système étudié. Ceci, dans le but de déterminer la durée de vie du condensateur en fonction des conditions opérationnelles appliquées.

Les travaux sont répartis en trois étapes afin de déterminer les lois de la dégradation en fonction du temps. Tout d'abord, la première étape consiste en la détermination des paramètres à caractériser et leurs protocoles de mesure afin d'obtenir des données fiables et exploitables pour l'extraction des lois de durée de vie.

Ensuite, deux types de vieillissement ont été réalisés : le premier d'un point de vue thermique et le second d'un point de vue thermoélectrique. Enfin, la dégradation des paramètres du condensateur est présentée selon des modèles qui permettent d'extraire la durée de vie des composants.

2.2 MESURE DES PARAMETRES

Pour ce chapitre, on adaptera le modèle électrique équivalent série de la Figure 1-9. La caractérisation électrique des condensateurs est réalisée selon la Norme IEC 60384-4 [11].

2.2.1 MESURES DE LA VALEUR DE LA CAPACITE ET DE L'ESR

Dans le cadre de notre étude, la capacité C et la résistance équivalente série ESR sont mesurées en se servant d'un appareil qui est le LCR-mètre sous tension sinusoïdale et à 25°C.



Figure 2-1 : Mesure de la capacité et de l'ESR avec un LCR-mètre

Vu que le système étudié fonctionne sous différentes valeurs de fréquences, la calibration de cet appareil est réalisée à 100 Hz, fréquence choisie pour la mesure de ces deux paramètres électriques.

2.2.2 MESURE DU COURANT DE FUITE I_f

Le courant de fuite I_f est déterminé par une procédure expérimentale assez simple. Pour ce faire, nous plaçons le condensateur en série avec une résistance sous la tension nominale de polarisation du condensateur recommandée par le fabricant. Cette résistance sert à limiter le courant et en même temps à le mesurer, cf. Figure 2-2. Après une phase transitoire de polarisation, généralement inférieure à 5 minutes (fonction de la valeur de la résistance de mesure), le courant tend vers une valeur constante. A cet instant, on mesure la tension aux bornes de la résistance avec une précision de 0.05% et on déduit la valeur du courant cette fameuse relation : Equation Chapter (Next) Section 1

$$I_f = \frac{U_R}{R} \quad (2.1)$$

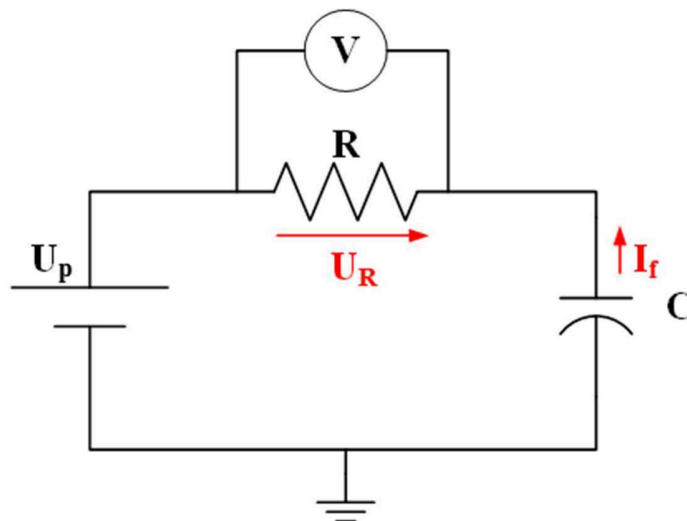


Figure 2-2 : Circuit de mesure du courant de fuite d'un condensateur

2.2.3 MESURES DIMENSIONNELLES

Les caractéristiques électriques demeurent néanmoins insuffisantes pour déterminer un modèle de durée de vie. C'est pourquoi dans le contexte particulier d'intégration des condensateurs

dans une carte électronique, nous avons mesuré des caractéristiques complémentaires : évolutions des dimensions et de la masse du boîtier.

On a mesuré à l'aide d'un pied à coulisse (précision 0.01 mm), les grandeurs L, l, e indiquées sur la Figure 2-3.

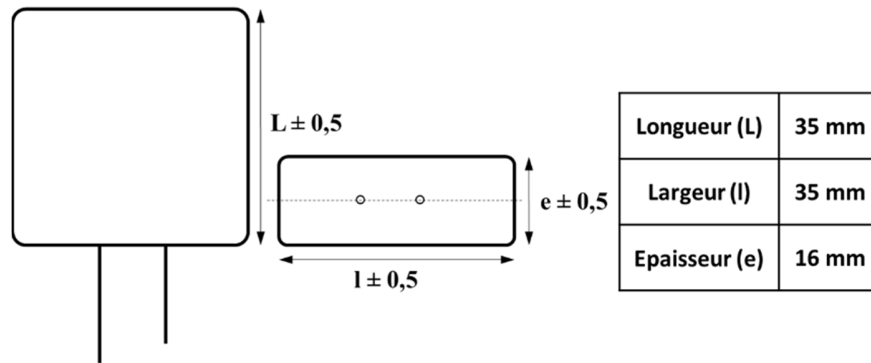


Figure 2-3 : Dimensions du boîtier du condensateur

Comme nous nous intéressons au gonflement du condensateur dans le sens de l'épaisseur, celle-ci est mesurée au point milieu de la largeur avec une précision de 0.01 mm, cf. Figure 2-4.



Figure 2-4 : Mesure de l'épaisseur du boîtier du condensateur

2.2.4 MESURES MASSIQUES

L'électrolyte se dégrade sous influence de la température et de la tension ce qui entraîne une perte de masse [13] [31]. Les mesures ont été réalisées pour chaque condensateur en utilisant une balance de précision (0,001 mg), cf. Figure 2-5.

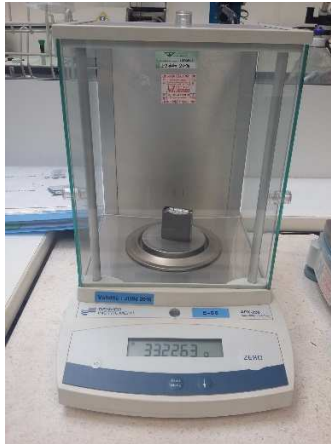


Figure 2-5 : Balance pour mesure la masse du condensateur

La perte de masse est en relation indirecte avec l'augmentation de l'épaisseur liée à une surpression interne. En effet, ce phénomène de gonflement peut conduire à l'apparition de fuites de gaz et des traces d'électrolyte au niveau des bornes de raccordement du condensateur, cf. Figure 2-5.

Les effets internes ont été observés par inspection non destructive en utilisant la microtomographie aux rayons X. Les images acquises sont fournies selon les trois axes x, y et z.

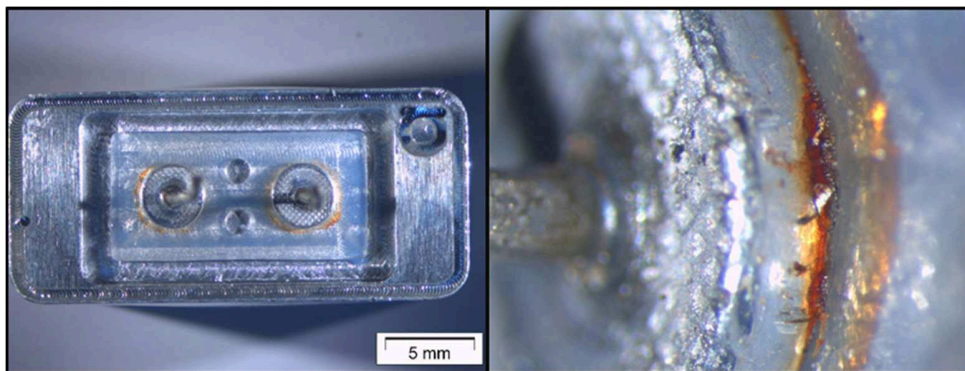


Figure 2-6 : Fuites d'électrolyte visibles au niveau de la borne de connexion gauche

2.3 CONDITIONS DES ESSAIS DE VEILLISSEMENT

Le profil de mission thermique de la Figure 1-1, composé par plusieurs paliers de température, décrit la distribution annuelle de la température d'un condensateur. Ce profil reflète

la température résultant de la combinaison de la température ambiante ainsi que de celles produites par les composants adjacents dans le système. De plus, un gradient de température pourrait être ajouté selon le mode de fonctionnement du condensateur, qui est dû principalement à l'application d'un courant d'ondulation lors d'un cycle de charge/décharge, cf. équation 1-31 [32], et à la résistance équivalente série (ESR). L'auto-échauffement du condensateur peut s'exprimer par une puissance dissipée par effet Joule :

$$P = I_{rms}^2 \times ESR \quad (2.2)$$

Avec :

I_{rms} : Valeur efficace d'un courant d'ondulation.

ESR : Résistance équivalente série.

La valeur efficace du courant d'ondulation résulte de deux facteurs essentiels. Le premier facteur est la tension électrique appliquée aux bornes du condensateur U_a , qui permet d'emmagasiner l'énergie électrostatique. Tandis que le deuxième facteur est la périodicité et la durée du cycle charge/décharge du condensateur qui est assuré par un transistor qui est commandé par un signal carré caractérisé par une période T et un rapport cyclique τ , cf. Figure 2-7. Le transistor est bloquant pendant une durée t_{OFF} permettant de charger le condensateur. Puis, le transistor est passant pendant t_{ON} afin de fournir de l'énergie emmagasinée dans le condensateur à une charge.

Ainsi, le rapport cyclique a pour expression :

$$\tau = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \quad (2.3)$$

Avec :

$$T = t_{ON} + t_{OFF} \quad (2.4)$$

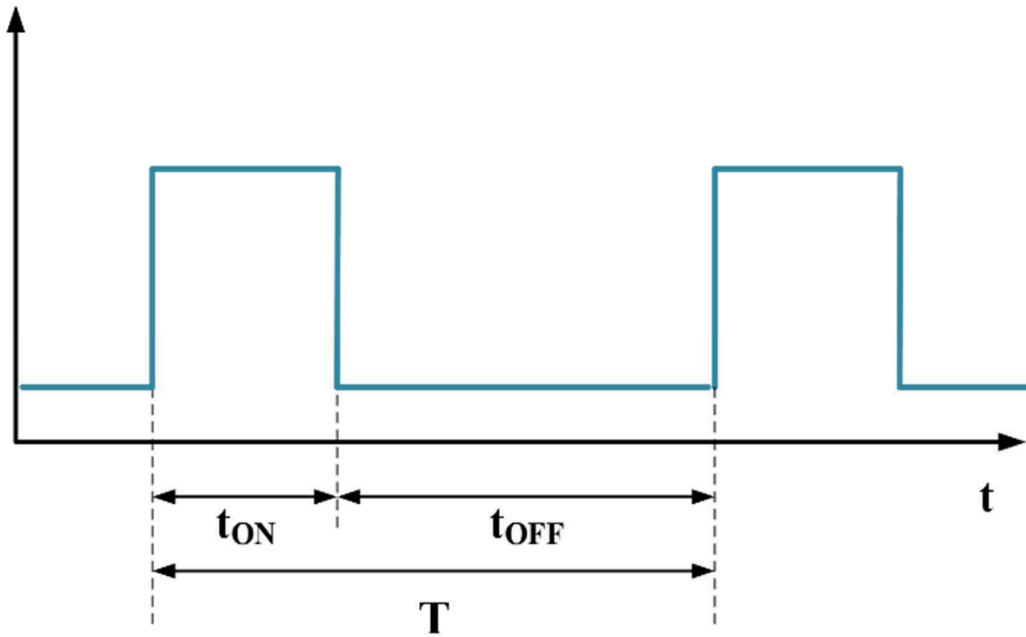


Figure 2-7 : Commande du transistor permettant de charger et décharger le condensateur

L'énergie délivrée lors de la décharge (phase « ON ») correspond à une impulsion de courant d'une durée $t_{ON} = T \times \tau$ laquelle engendre une chute de tension transitoire ΔU aux bornes du condensateur qui est sous la tension U_a . Dans l'autre partie du cycle (phase « OFF »), le condensateur se recharge afin de récupérer la quantité d'énergie perdue et la chute de tension ΔU correspondant à l'impulsion de courant. L'expression de ΔU est une fonction de la capacité du condensateur C et de la valeur et la durée de l'impulsion de courant I et Δt :

$$\Delta U = \frac{I \times \Delta t}{C} \quad (2.5)$$

Le profil opérationnel de la tension entre les bornes du condensateur au cours d'un cycle charge/décharge est représenté sur la courbe de la Figure 2-8.

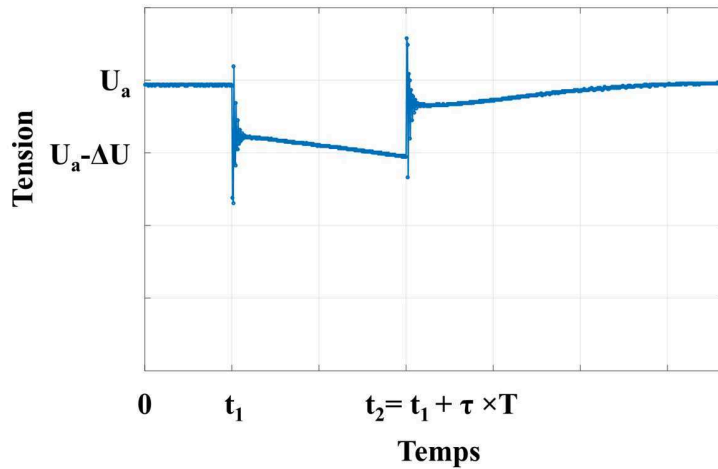


Figure 2-8 : Profil opérationnel de la tension lors du processus charge/décharge du condensateur

2.4 PROGRAMME DES ESSAIS

La répartition et la variabilité des facteurs cités ci-dessous ont permis de définir un planning concis d'essais qui se classe en trois types distincts :

- ✓ **Essais à caractère thermique** : D'une part, ces essais ont principalement pour objectif de tester l'endurance des composants dans un environnement à haute température.
- ✓ **Cyclage thermique** : D'autre part, il est primordial de tester le comportement des composants face à un cycle thermique engendré par le cycle de fonctionnement du système (la mise en marche et la mise à l'arrêt).
- ✓ **Essais à caractère thermoélectrique** : Ces essais combinent le profil électrique (tension et rapport cyclique) et les contraintes thermiques de l'environnement d'utilisation.

Le tableau ci-dessous met en évidence quatre types de contraintes différents :

a. Températures en régime permanent :

- T_{\max} : Température maximale imposée lors des essais qui représente la température maximale du profil de mission

- T_{MIN} : Température minimale imposée lors des essais. Elle représente la température dominante du profil de mission, cf. Figure 1-1.

b. Cyclage thermique :

Il a pour but de simuler les variations de températures du système correspondant à l'arrêt (25 °C) depuis le régime nominal. Le gradient de température ΔT est appliqué entre une température ambiante de 25°C et une température maximale de 25°C + ΔT . Le cycle d'essai a une allure trapézoïdale avec une période d'une heure.

c. Tension :

Nous avons utilisé deux valeurs de tension : la tension nominale U_n et une autre tension U_a qui représente 86% de U_n et la tension opérationnelle du condensateur dans son système.

d. Rapport cyclique et ondulation du courant :

Le courant I_{rms} est fonction de la tension et du rapport cyclique. Au cours du fonctionnement du système, deux rapports cycliques différents peuvent intervenir : un rapport cyclique maximal τ_{max} avec une fréquence minimale (une période longue) et un rapport cyclique minimal τ_{min} avec une fréquence maximale (une période courte).

Dans Tableau 2-1 ci-dessous, on récapitule trois types d'essai différents :

- ✓ Essais thermiques permanents ;
- ✓ Essai de cyclage thermique ;
- ✓ Essais thermoélectriques.

Au cours des essais, le suivi du processus de dégradation des condensateurs a été réalisé en mesurant régulièrement les paramètres cités dans le paragraphe (2-2). Ces caractéristiques mesurées ont été quantifiées en vue d'en extraire un modèle de dégradation.

Tableau 2-1 : Planning des essais de vieillissement

Type d'essai	Essais	Température	Tension	Rapport cyclique	Durée de l'essai (heures)	Nombre de composants en essais
Thermique permanent	ST1	T_{max}	-	-	2500	5
	ST2	T_{min}	-	-	5200	5
Cyclage thermique	CT	$25^{\circ}\text{C} + \Delta T$ (cyclage thermique)	-	-	3050	5
Thermo-électrique	TE1	T_{max}	U_a	τ_{max}	3050	5
	TE2	T_{min}	U_a	τ_{max}	6200	5
	TE3	T_{max}	U_a	τ_{min}	3700	5
	TE4	T_{max}	U_n	τ_{max}	4070	5

Pour chaque essai de vieillissement, les résultats de mesures sont indiqués sous forme de graphes d'évolutions des grandeurs ci-dessous en fonction du temps :

- ✓ Capacité ;
- ✓ Epaisseur du boîtier ;
- ✓ Masse du composant.

Sauf pour la perte de masse, les évolutions sont exprimées en valeurs relatives par rapport à des valeurs de références définies à la température de 25 °C. Les condensateurs utilisés dans les essais sont identiques et issus du même fabricant. Lors de chaque essai, cinq condensateurs ont été soumis aux contraintes citées dans le tableau précédent. A chaque composant est attribué un indice composé du symbole de l'essai suivi d'un des chiffres 1, 2, 3, 4 ou 5. Par exemple, ST2-3 signifie qu'on s'intéresse au composant numéro 3 au cours de l'essai thermique permanent à température minimale ST2.

2.4.1 ESSAIS THERMIQUES

Trois étuves climatiques différentes ont été utilisées pour réaliser les essais ST1, ST2 et CT.



Figure 2-9 : Enceintes climatiques utilisées lors des trois essais thermiques (ST-1, ST-2 et CT)

2.4.2 ESSAIS THERMOELECTRIQUES

La combinaison des deux aspects, thermique et électrique, du profil opérationnel a nécessité la mise en place de deux installations simulant les contraintes correspondantes. On utilise les mêmes enceintes climatiques que précédemment. L'application des contraintes électriques est réalisée à l'aide d'un circuit composé de :

- ✓ Une source d'alimentation DC/DC ;
- ✓ Des diodes de protection ;
- ✓ Un transistor de type MOSFET permettant d'assurer la charge et la décharge du condensateur ;
- ✓ Un générateur d'impulsions qui génère un signal carré ayant une fréquence et un rapport cyclique bien prédéfinis. Ce dernier permet de commander le transistor ;
- ✓ Les 5 condensateurs qui subiront l'essai de vieillissement ;
- ✓ Une charge résistive qui simule l'impulsion de courant consommé lors du fonctionnement opérationnel dans le système.

Une simulation du schéma électrique a été faite pour valider le circuit électrique décrit ci-dessus à l'aide du logiciel LTspice, cf. Figure 2-10.

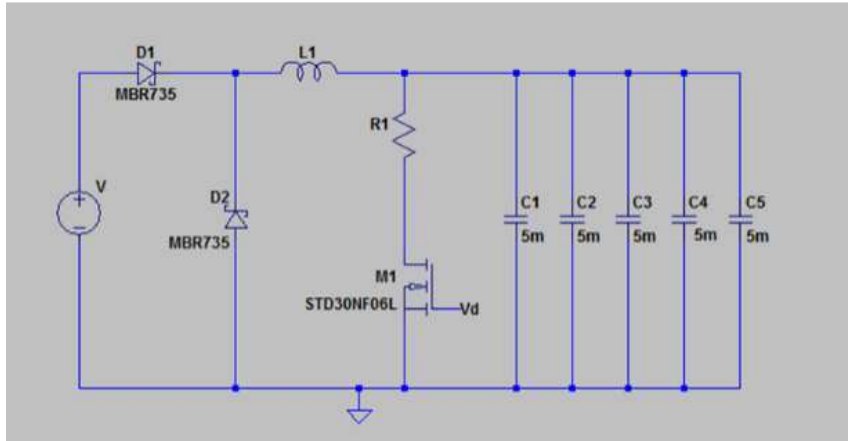


Figure 2-10 : Schéma électrique utilisé pour les essais de vieillissement thermoélectrique

La Figure 2-11 montre la tension électrique entre les bornes des condensateurs qui est mesurée sur le logiciel de simulation. Les valeurs utilisées ci-dessous (fréquence et rapport cyclique) sont à titre indicatif afin de valider le circuit électrique.

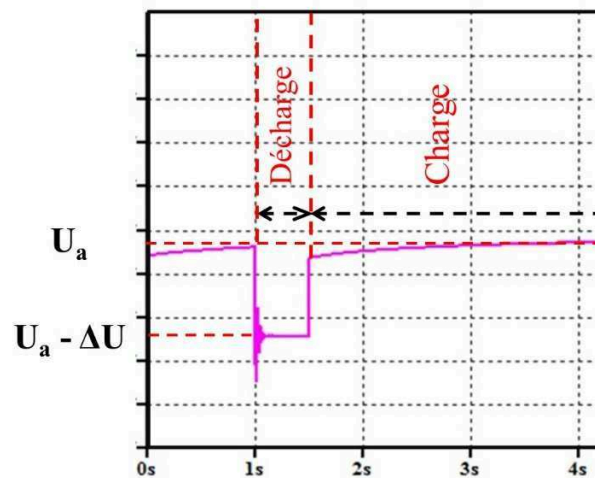


Figure 2-11 : Tension mesurée entre les bornes des condensateurs lors d'un cycle charge/décharge

Le profil de la tension mesurée en simulation correspond significativement au profil opérationnel de la tension qu'on mesure aux bornes des condensateurs montés dans leur système qu'on voit sur la Figure 2-8. C'est ainsi que les circuits électriques utilisés dans les essais de vieillissement ont été réalisés en se basant sur le schéma électrique de la Figure 2-10.

La Figure 2-12 représente le banc de test utilisé pour mener les essais de vieillissement électrothermique.

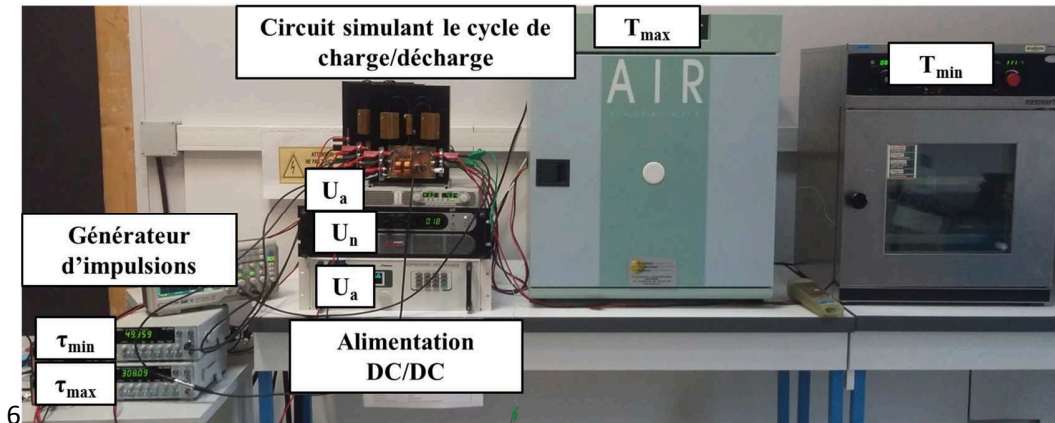


Figure 2-12 : Banc d'essai mis en œuvre pour les essais de vieillissement

Le circuit simulant le cycle de charge/décharge est lié à un boîtier qui dispose d'un circuit imprimé avec des œillets permettant de monter et démonter facilement les condensateurs. Un fusible est placé en amont de chaque condensateur qui sert à prévenir une propagation de défaut vers les autres composants dans le cas où une défaillance d'un ou plusieurs condensateurs est survenue à cause des conditions de vieillissement, cf. Figure 2-13.



Figure 2-13 : Mise en place des condensateurs pour un test thermoélectrique

Après avoir mis en marche le banc, la tension électrique entre les bornes des condensateurs a été visualisée à l'aide d'un oscilloscope, cf. Figure 2-14. Son allure ressemble étroitement à celui de la tension mesurée lors du fonctionnement opérationnel, cf. Figure 2-8.

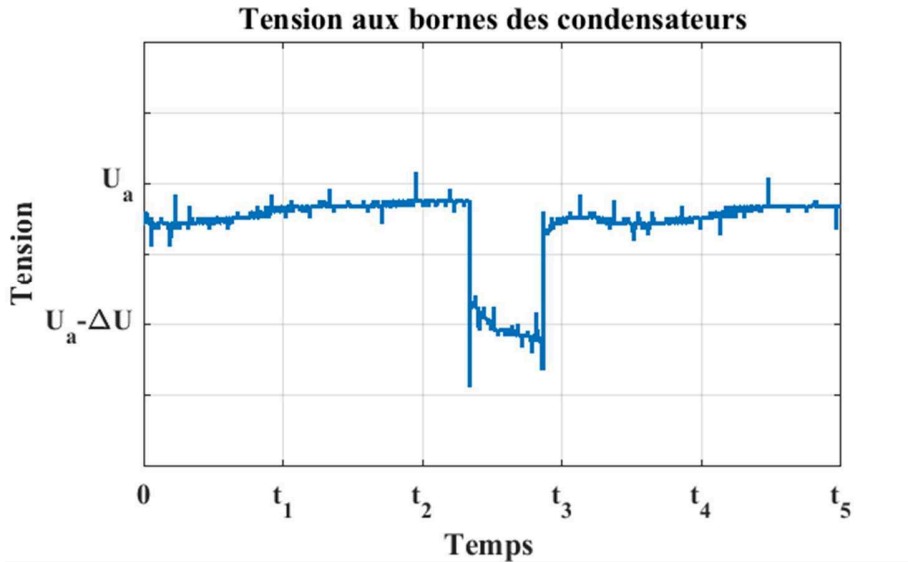


Figure 2-14 : Mesure de la tension aux bornes des condensateurs utilisés dans l'essai ET1 à $t = 0$ heure

2.5 RESULTATS DES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT

2.5.1 ESSAIS THERMIQUES

2.5.1.1 Evolution de la capacité

Les Figure 2-15 et 2-16 représentent respectivement l'évolution des valeurs de la capacité à 100 Hz au cours de l'essai thermique à température constante T_{\max} (ST1) et au cours du cyclage thermique (CT). Pour chaque condensateur, la chute de capacité est indiquée en valeurs relatives. Sa valeur n'ayant pas subi de dérive significative, on peut en conclure qu'elle n'est pas affectée par l'application d'une contrainte thermique, que celle-ci soit permanente (cas du stockage) ou périodique (cas du cyclage).

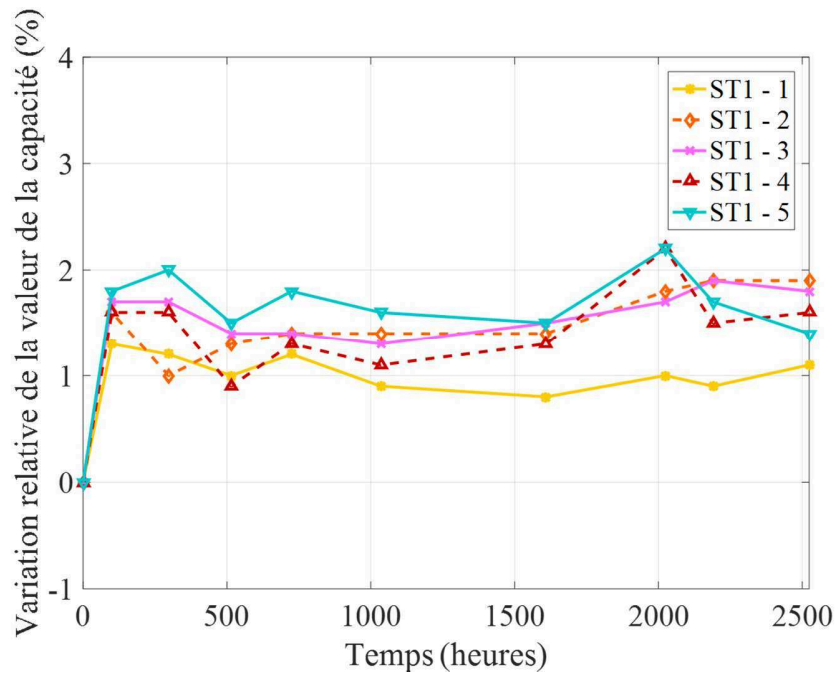


Figure 2-15 : Evolution de la capacité des condensateurs ayant subi l'essai vieillissement ST1 (a)

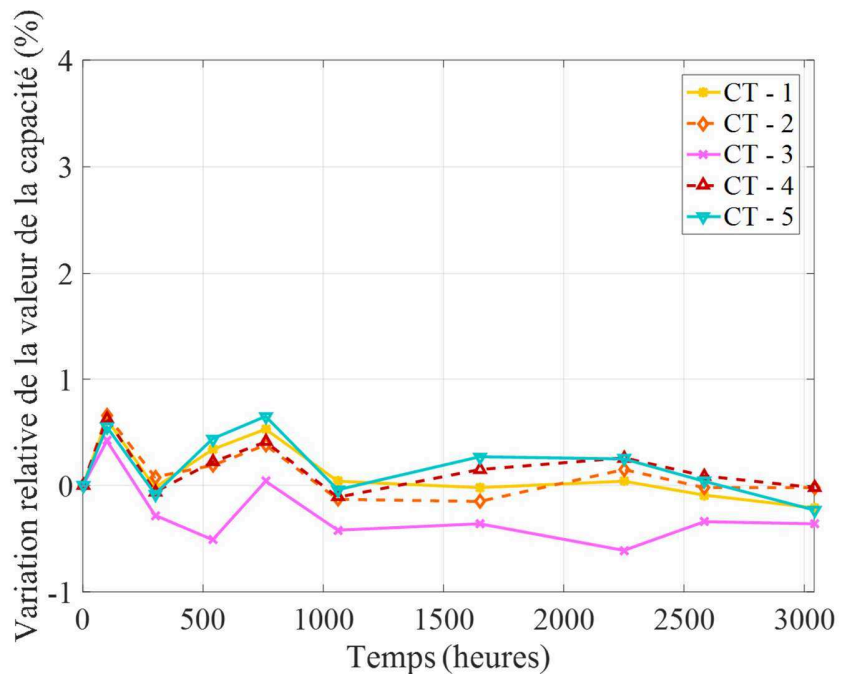


Figure 2-16 : Evolution de la capacité des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement CT

2.5.1.2 Evolution de la Résistante Equivalente Série

L'évolution de la valeur de l'ESR n'est pas représentée puisque cette dernière est restée inchangée pour les trois essais ST-1, ST-2 et CT.

2.5.1.3 Evolution du courant de fuite

De même que pour l'ESR, l'évolution du courant de fuite est pratiquement négligeable.

2.5.1.4 Evolution de l'épaisseur du boîtier

L'épaisseur du boîtier du condensateur augmente avec le niveau de la contrainte thermique appliquée. Pour une durée d'essai de 2500 heures, l'augmentation relative atteint 5.5% pour l'essai ST1 et 2,6% pour l'essai ST2 (valeurs correspondant aux condensateurs ST1-4 et ST2-4, respectivement). Concernant l'essai CT, la variation de cette grandeur reste négligeable et ne dépasse pas 1,7% à 2500 heures, cf. Figure 2-17 et 2-18.

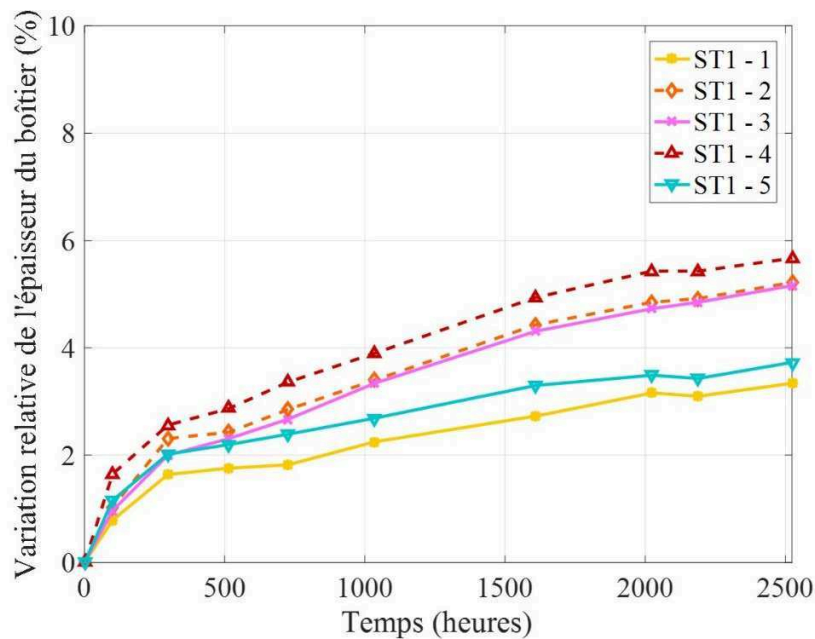


Figure 2-17 : Evolution de l'épaisseur du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement thermique ST1

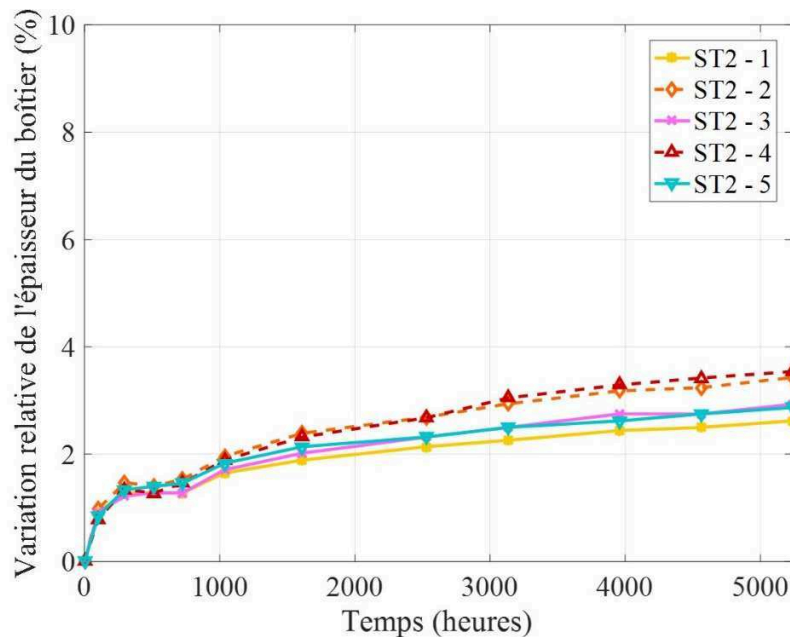


Figure 2-18 : Evolution de l'épaisseur du boîtier des condensateurs ayant subi les essais de vieillissement thermiques ST1 (a) et ST2 (b)

2.5.1.5 Evolution de la masse du composant

Les courbes des deux Figures 2-19 et 2-20 relatives aux essais ST1 et ST2, représentent la perte de masse. Cette perte de masse, exprimée en valeur absolue, représente physiquement la dégradation de l'électrolyte. On remarque qu'elle est plus importante dans le cas de l'essai ST1 (T_{\max}) que dans le cas de l'essai ST2 (T_{\min}), ce qui reflète l'influence de la température.

L'évolution de la perte de masse des condensateurs au cours de l'essai CT n'est pas représentée car elle reste négligeable.

Une comparaison entre les courbes de l'évolution de l'épaisseur du boîtier (Figures 2-17 et 2-18) et celles de la variation de la masse des condensateurs (cf. Figures 2-19 et 2-20) montre que les évolutions de l'épaisseur et de la perte de masse ont une allure comparable. Une relation inverse existe entre ces deux caractéristiques dans la mesure où la dégradation de l'électrolyte (perte de masse) engendre une surpression interne (gonflement du boîtier).

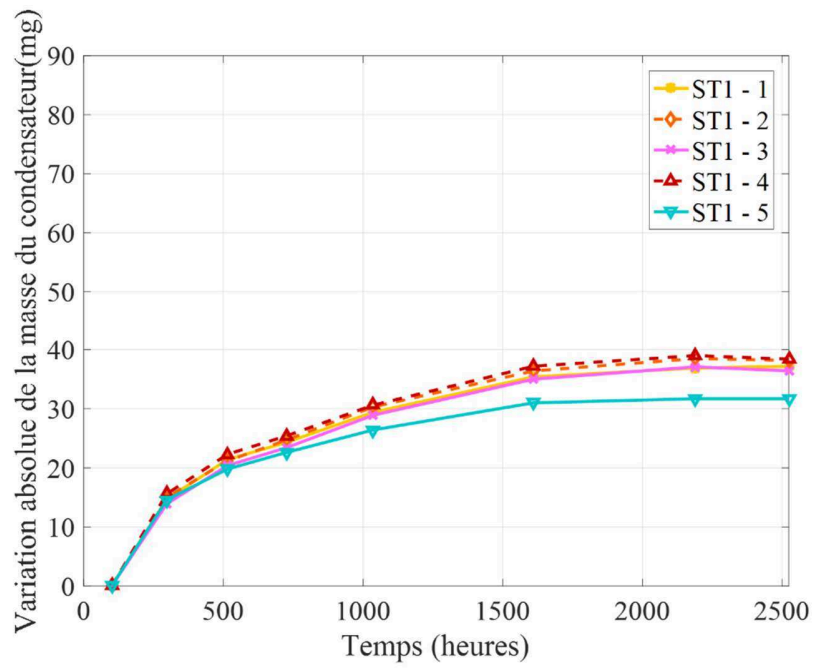


Figure 2-19 : Perte de masse des condensateurs ayant subi l'essai ST1

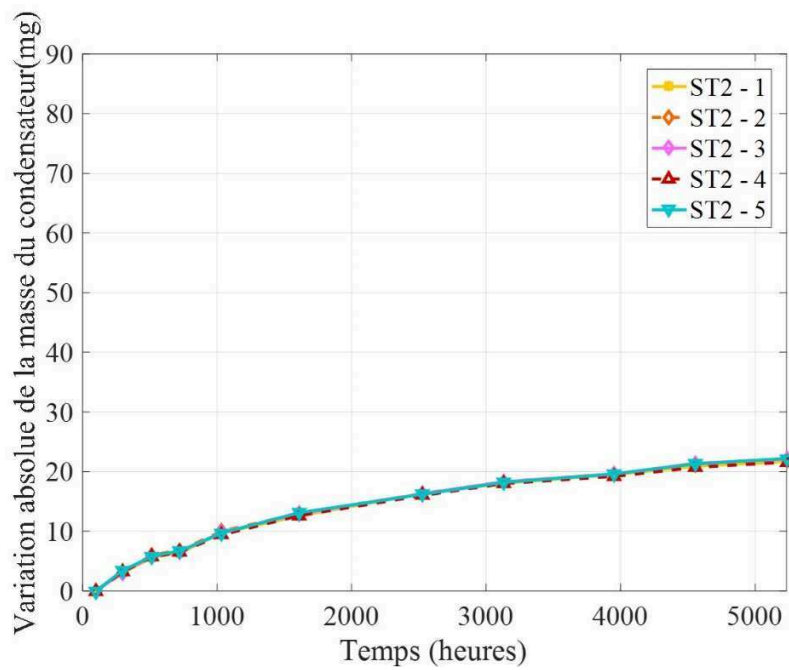


Figure 2-20 : Perte de masse des condensateurs ayant subi l'essai ST2

2.5.2 ESSAIS THERMOELECTRIQUES

2.5.2.1 Evolution de la capacité

La dérive de la valeur de la capacité est pratiquement négligeable pour les essais TE1, TE2 et TE3 (environ 1% à 3000 heures). Par contre, l'essai TE4 conduit à une dégradation un peu plus importante (environ 4,5% à 3000 heures). Ceci peut être expliqué par le fait que l'essai TE4 est réalisé sous les conditions limites d'utilisation du condensateur en terme de température, tension appliquée et charge et décharge d'une manière continue. Alors que les autres essais, seul le facteur thermique est à sa valeur maximale.

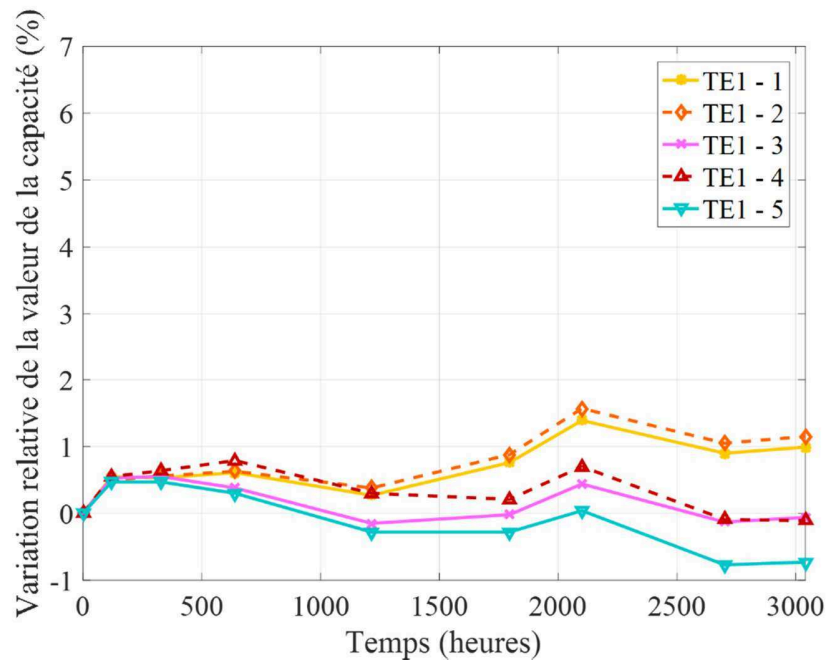


Figure 2-21 : Evolution de la valeur de la capacité des condensateurs ayant subi l'essai TE1

L'écart entre la capacité de TE4-2 et celle des autres condensateurs utilisés dans l'essai TE4 peut être dû à la variabilité des condensateurs utilisés

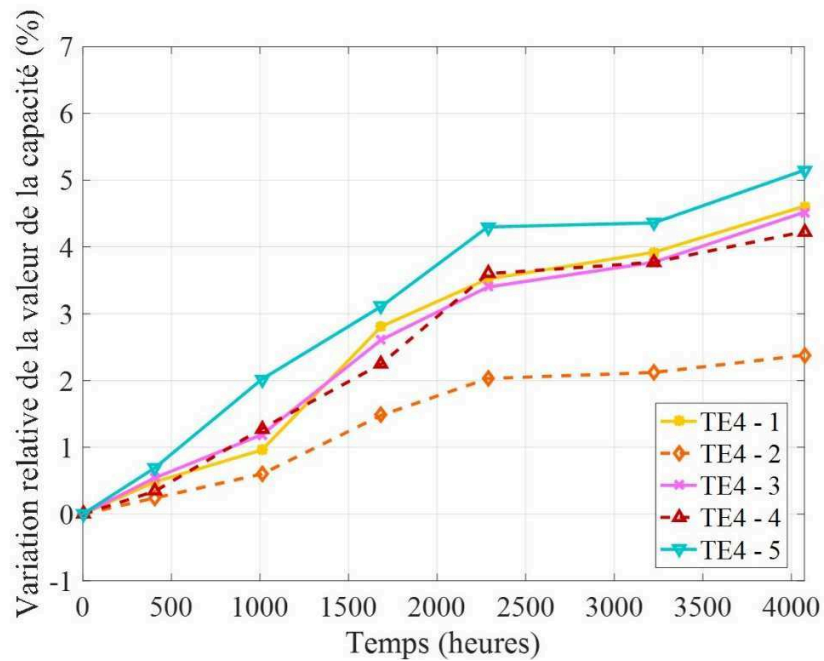


Figure 2-22 : Evolution de la valeur de la capacité des condensateurs ayant subi l'essai TE4

2.5.2.2 Evolution de la Résistance Equivalente Série

La valeur de l'ESR ne présente pas d'évolution significative pour les quatre essais (TE1 à TE4).

2.5.2.3 Evolution du courant de fuite

La valeur du courant de fuite ne présente pas de changement significatif pour les quatre essais (TE1 à TE4).

2.5.3 EVOLUTION DE L'ÉPAISSEUR DU BOITIER

Les figures 2-23, 2-24, 2-25 et 2-26 représentent respectivement la variation relative de l'épaisseur du boîtier pour les essais TE1, TE2, TE3 et TE4 à l'instant 3000 heures. Dans tous les cas, on s'intéresse au composant le plus dégradé. Elle atteint des valeurs de 3%, 5%, 6% et 14%, respectivement, pour les essais TE3, TE2, TE1 et TE4.

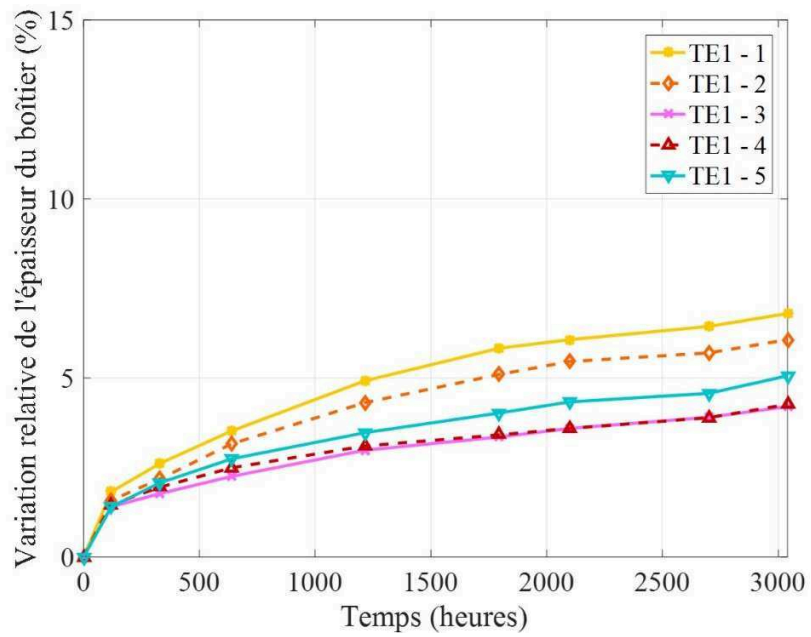


Figure 2-23 : Evolution de l'épaisseur relative du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement TE1

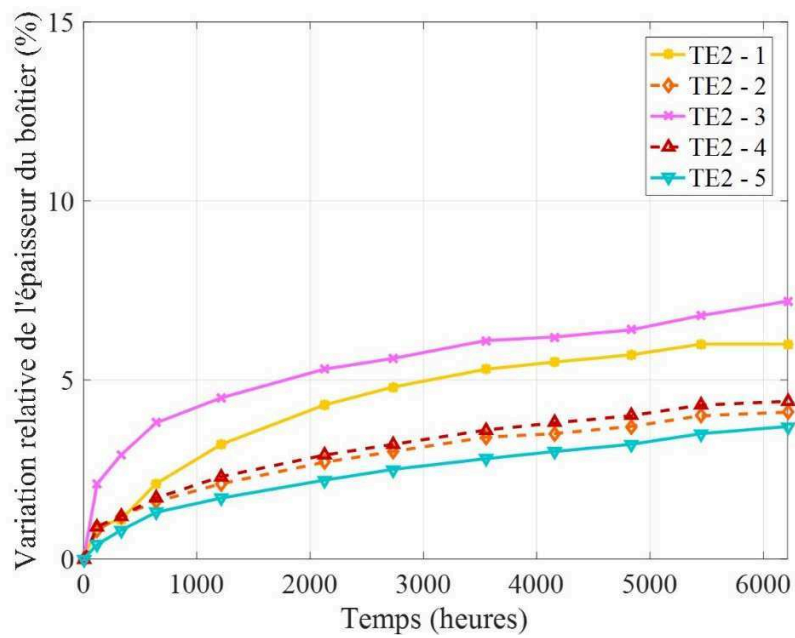


Figure 2-24 : Evolution de l'épaisseur relative du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement TE2

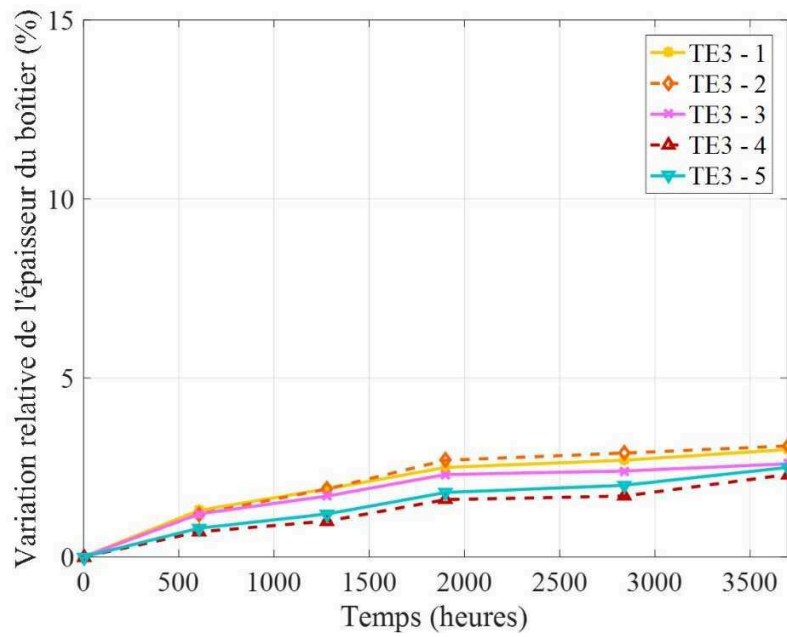


Figure 2-25 : Evolution de l'épaisseur relative du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement TE3

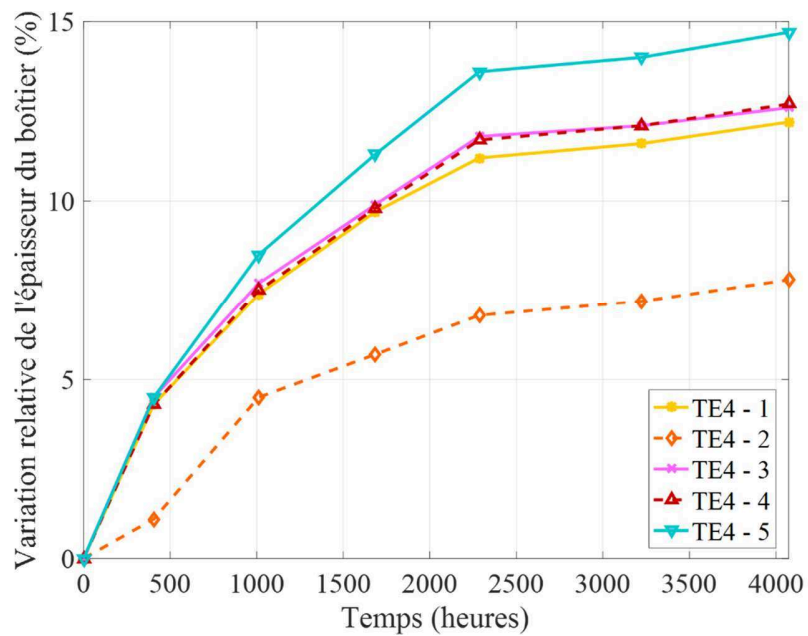


Figure 2-26 : Evolution de l'épaisseur relative du boîtier des condensateurs ayant subi l'essai de vieillissement TE4

2.5.3.1 Evolution de la masse du composant

Les condensateurs utilisés lors les essais thermoélectriques perdent une quantité de masse en valeur absolue qui varie entre 30 à 90 mg. Comme pour l'épaisseur du boîtier, la perte de masse la plus importante correspond à l'essai TE4.

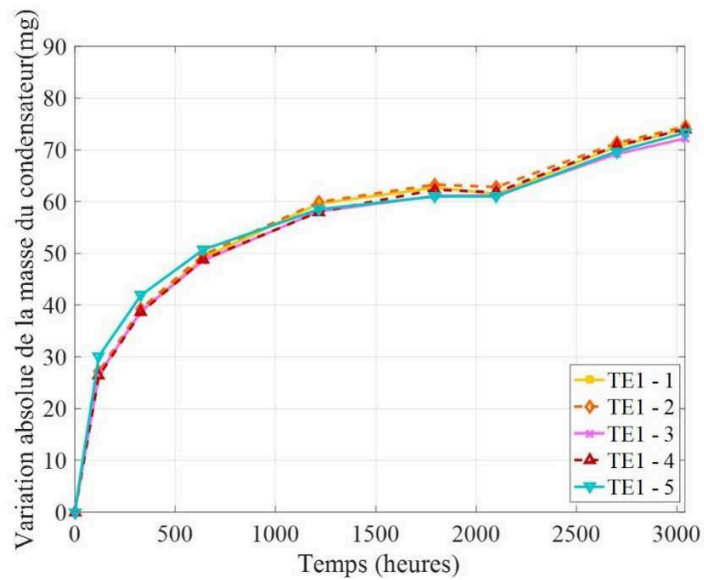


Figure 2-27 : Evolution de la perte de la masse au cours de l'essai de vieillissement TE1

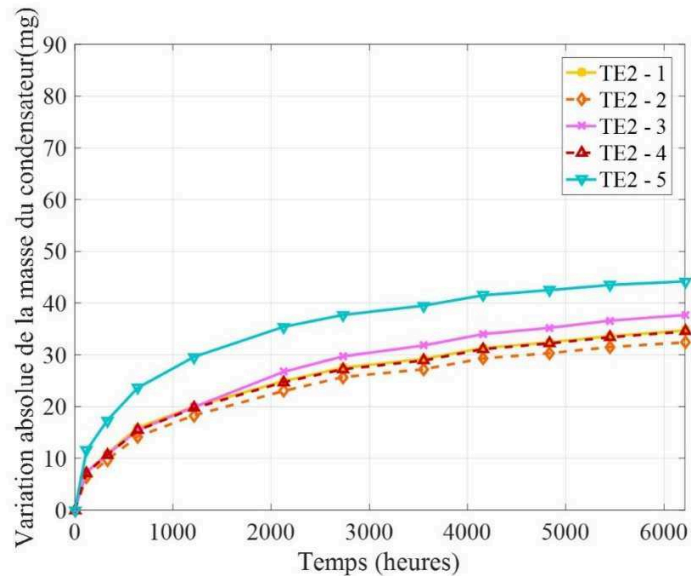


Figure 2-28 : Evolution de la perte de la masse au cours de l'essai de vieillissement TE2

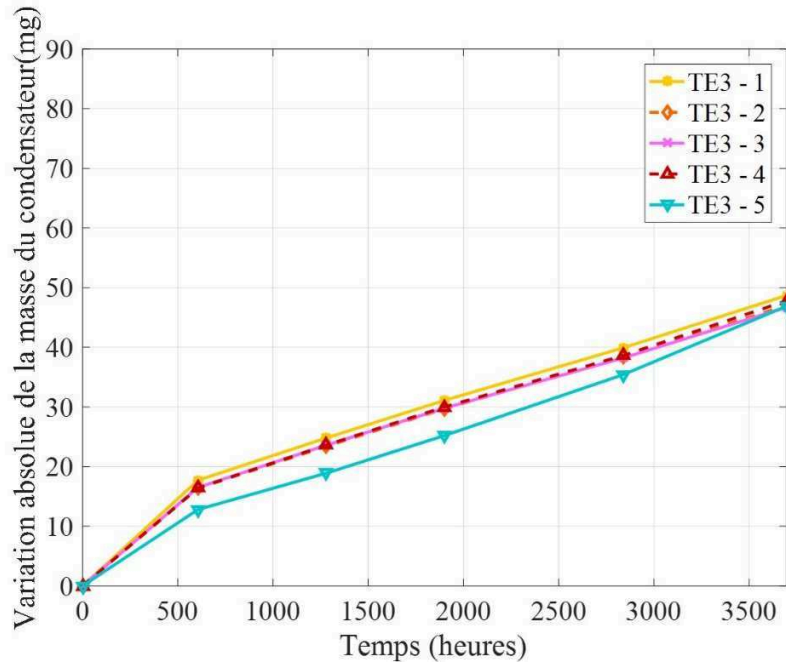


Figure 2-29 : Evolution de la perte de la masse au cours de l'essai de vieillissement TE3

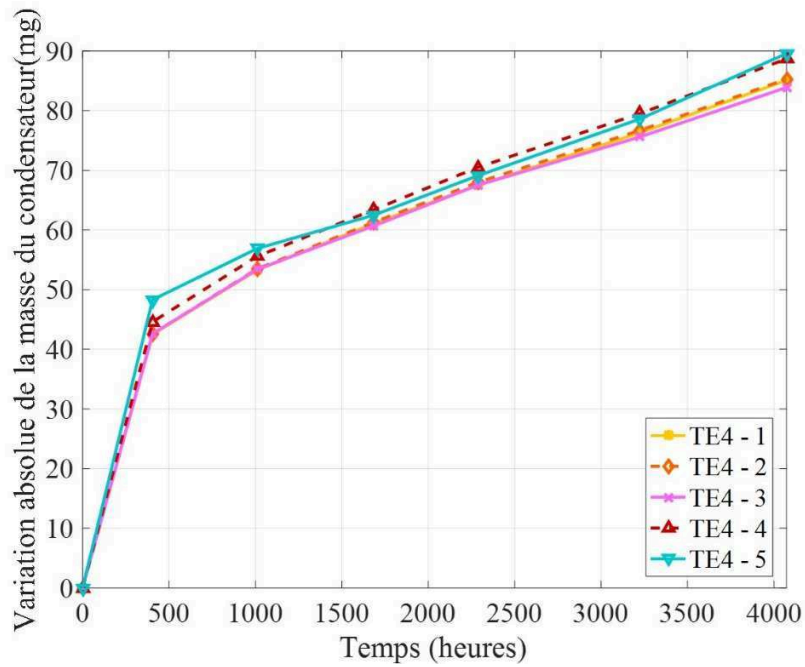


Figure 2-30 : Evolution de la perte de la masse au cours de l'essai de vieillissement TE4

En complément des essais précédents, on a procédé à une analyse micro-tomographique par rayons X sur un condensateur par test. Seuls les condensateurs des essais ST1, TE1 et TE4 seront présentés ci-dessous. C'est parce que l'essai ST1 représente l'essai d'un stockage en haute température, puis l'essai TE1 représente le fonctionnement opérationnel électrique à une haute température. Enfin, l'essai TE4 représente les conditions extrêmes d'utilisation de point de vue électrique et thermique. A noter que les images montrées ci-dessous ne sont pas fournies avec la même échelle et les dimensions mesurées avec le logiciel des vues aux rayons X collent bien avec les dimensions mesurées avec le pied à coulisse montrées précédemment.

La Figure 1-31 représente les vues aux rayons X du composant ST1-1 avant et après vieillissement selon les trois axes X,Y et Z. Les images montrent que les connecteurs n'étaient pas affectés le vieillissement. D'un autre côté, la vue en coupe montre un léger relâchement du bobinage qui est dû au gonflement du boîtier après 4000 heures de vieillissement.

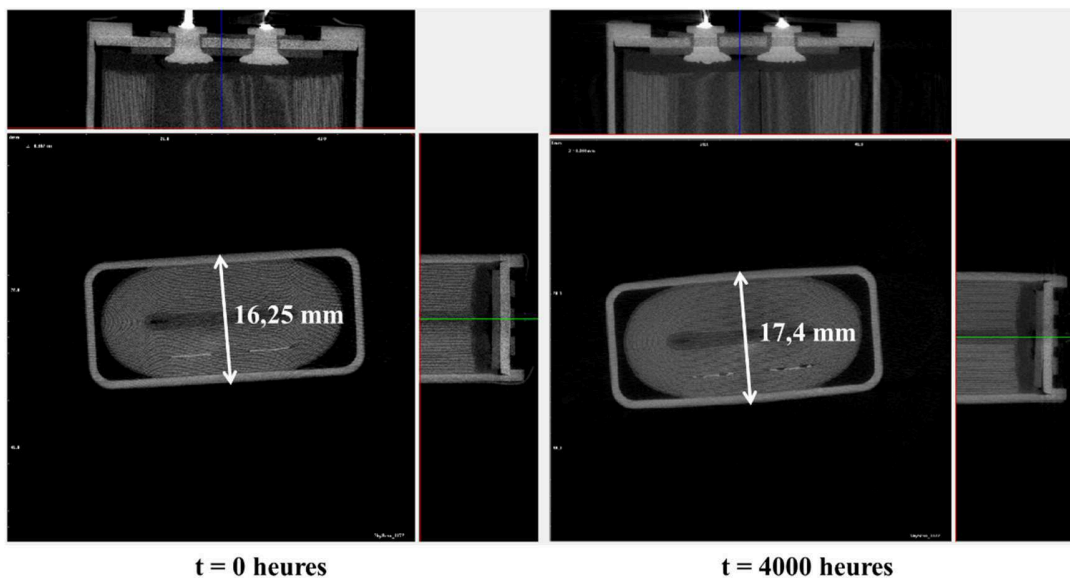


Figure 2-31 : Vues Micro-tomographiques aux rayons X du condensateur ST1-1 avant et après 4000 heures de vieillissement

La Figure 2-32 montre les vues aux rayons X du composant TE1-1 avant et après 3000 heures de vieillissement. Après 3000 heures de vieillissement, l'allure du gonflement du boîtier et du relâchement du bobinage ressemble largement à celle du composant ST1-1.

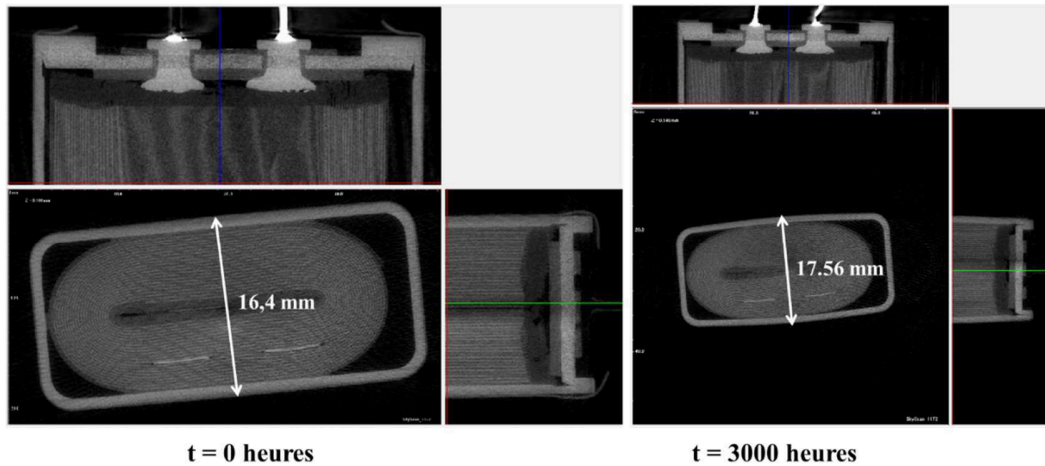


Figure 2-32 : Vues Micro-tomographiques aux rayons X du condensateur TE1-1 avant et après 3000 heures de vieillissement

Sur la Figure 2-33, le condensateur TE4-1 montre le gonflement interne du boîtier entre l'instant initial et l'instant $t = 4000$ heures. Sur la vue en coupe de la Figure 2-33, on constate clairement le décollement du boîtier ce qui provoque un relâchement du bobinage par rapport à sa configuration initiale.

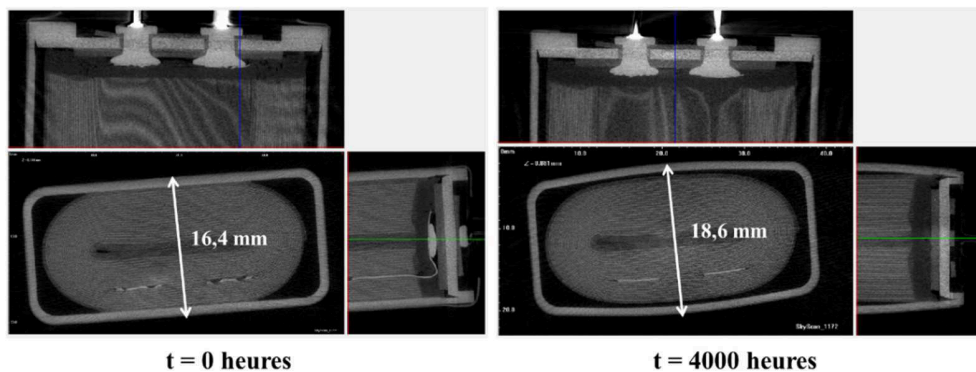


Figure 2-33 : Vues Micro-tomographiques aux rayons X du condensateur TE4-1 avant et après 4000 heures de vieillissement

2.6 ANALYSES ET EXPLOITATION DES RESULTATS D'ESSAIS

Afin d'analyser les effets de la température (ST1, ST2 et CT) et des contraintes thermoélectriques (TE1 à TE4), les courbes expérimentales correspondantes sont exploitées pour établir des modèles de régression.

2.6.1 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

L'influence de la seule température se manifeste dans l'allure de l'évolution de la masse et de l'épaisseur du condensateur. Ceci est valable uniquement pour les essais thermiques en régime permanent (ST1 et ST2).

L'augmentation de l'épaisseur du boîtier est due à la surpression interne des gaz produits par les réactions chimiques de l'électrolyte sous l'effet de la température. Compte tenu de la nature du matériau (enveloppe en aluminium) et de la forme du boîtier, la surpression interne entraîne une déformation irréversible.

Plusieurs modèles empiriques de dégradation ont été utilisés pour décrire la dégradation de l'épaisseur du boîtier. Après le calcul des paramètres d'une façon de chaque modèle, seul le modèle qui rapproche le plus les données mesurées est utilisé pour décrire l'épaisseur du boîtier. Ce modèle est une fraction rationnelle qui est un quotient de deux polynômes du premier degré :

$$e(t) = \frac{e_1 \times t + e_2}{e_3 \times t + 1} \quad (2.6)$$

Avec :

e : épaisseur du boîtier en mm.

t : temps de de vieillissement en heures.

e_i : constantes dépendant des dimensions du composant et des conditions d'essai.

Les constantes de ce modèle sont déterminées par une méthode d'identification des systèmes non-linéaires.

Pour évaluer la conformité du modèle aux résultats expérimentaux, on a utilisé les condensateurs qui ont subi la plus grande variation de l'épaisseur. Le degré de conformité de ce modèle est caractérisé par l'erreur moyenne quadratique (RMSE) relative à la méthode des moindres carrés.

Pour les deux essais ST1 et ST2, on considère respectivement, les composants ST1-4 et ST2-4, dont les paramètres du modèle (2.6) sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2-2 : Paramètres du modèle de dégradation de l'épaisseur du boîtier des condensateurs ST1-4 et ST2- 4

Composants	e ₁	e ₂	e ₃	RMSE
ST1-4	8,52 10 ⁻³ mm/h	16,62 mm	4,75 10 ⁻⁴ h ⁻¹	0.044 mm
ST2-4	6,09 10 ⁻³ mm/h	16,49 mm	3,53 10 ⁻⁴ h ⁻¹	0.023 mm

La confrontation modèle-points expérimentaux est représentée ci-dessous, cf. Figures 2-34 et 2-33. Nous pouvons remarquer un ajustement satisfaisant, caractérisé par une erreur quadratique maximale de l'ordre de 0.044 millimètre.

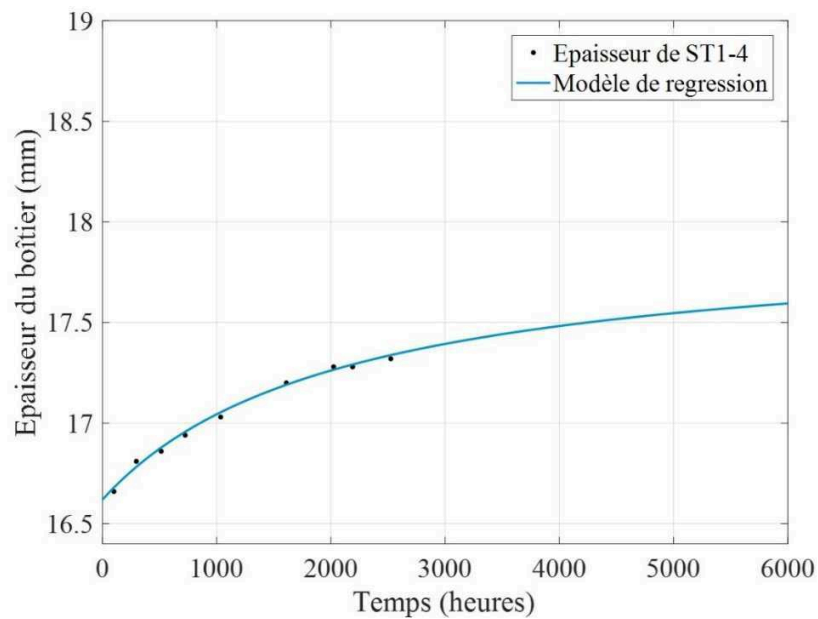


Figure 2-34 : Ajustement des mesures au modèle de régression proposé pour l'épaisseur du boîtier de ST1-4

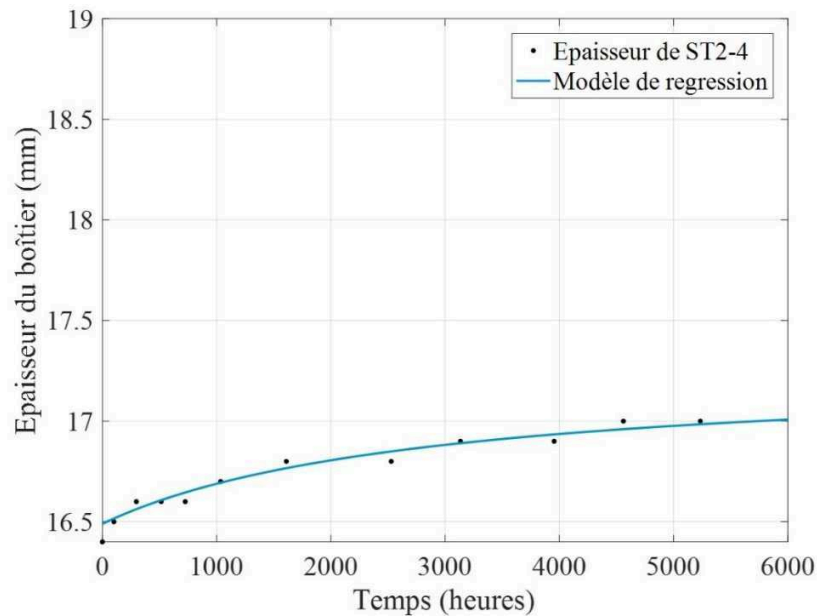


Figure 2-35 : Ajustement des mesures au modèle de régression proposé pour l'épaisseur du boîtier de ST2-4

L'évolution de l'épaisseur du boîtier reflète l'augmentation de la pression interne du boîtier qui est le résultat des réactions chimiques sous l'effet de la température. Ceci engendre aussi la perte d'une quantité de l'électrolyte à travers les bornes des connexions. Ce mécanisme est évalué en mesurant la masse du condensateur. Autrement dit, les deux évolutions sont liées et peuvent être décrites par le même modèle d'évolution. Par conséquent, le modèle d'évolution de la masse est décrit par :

$$M(t) = \frac{m_1 \times t + m_2}{m_3 \times t + 1} \quad (2.7)$$

Avec :

M : Masse du composant en mg

t : Temps de de vieillissement en heures.

m_i : Constantes dépendant des dimensions du composant et des conditions d'essai.

De la même manière, les paramètres du modèle sont calculés en utilisant une méthode d'estimation des paramètres d'un système non-linéaire.

Tableau 2-3 : Paramètres du modèle de dégradation de la masse des condensateurs ST1-4 et ST2- 4

Composants	m ₁	m ₂	m ₃	RMSE
ST1-4	33,85 mg/h	33416 mg	2,75 10 ⁻³ h ⁻¹	1.29 mg
ST2-4	16,57 mg/h	33251 mg	4,99 10 ⁻⁴ h ⁻¹	0.37 mg

Nous pouvons là aussi observer l'ajustement satisfaisant du modèle retenu en le confrontant aux données expérimentales dans la Figure 2-36.

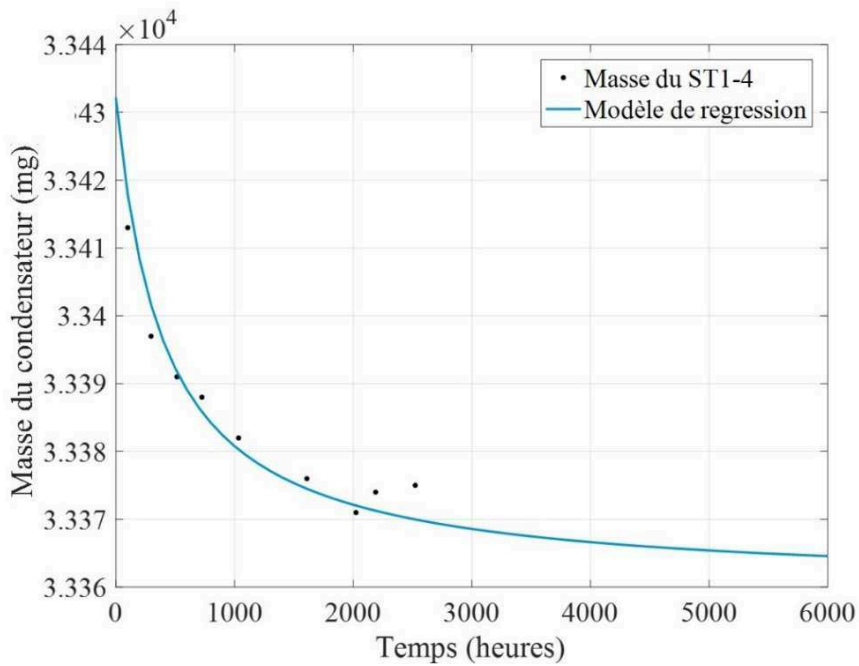


Figure 2-36 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la masse du condensateur ST1-4

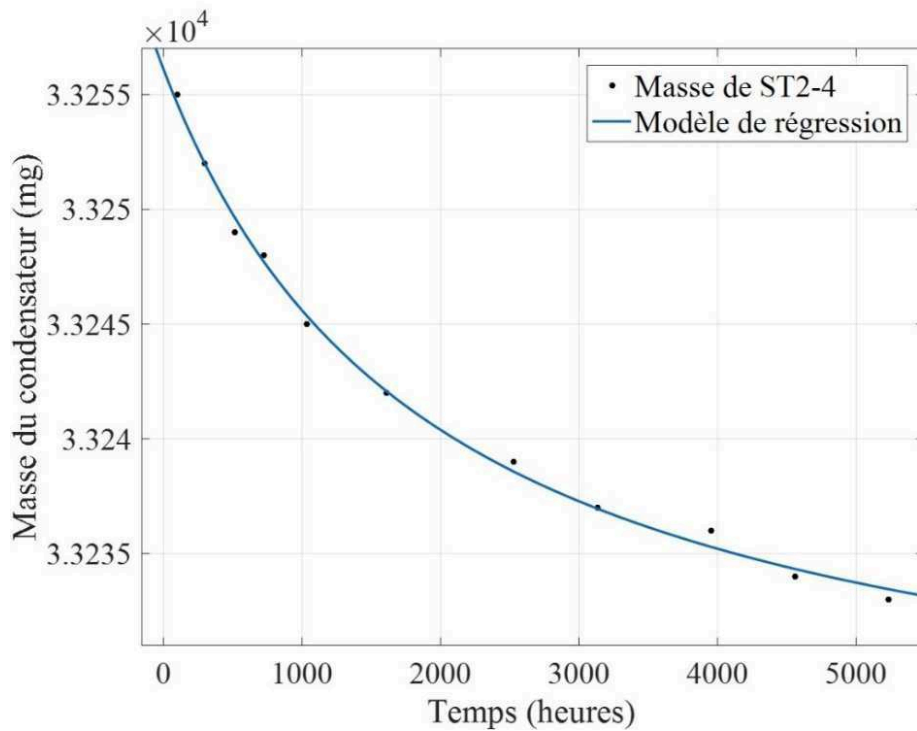


Figure 2-37 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la masse du condensateur ST2-4

2.6.2 INFLUENCE DES PARAMETRES THERMOELECTRIQUES

L'évolution de la valeur de la capacité est exploitable pour l'essai TE4. L'influence globale des contraintes thermique et électrique peut être décrite en utilisant un modèle respectant une loi en puissance en fonction du temps de vieillissement comme représenté ci-dessous [45] :

$$C(t) = -c_1 \times t^{c_2} + c_3 \quad (2.8)$$

Avec :

C : valeur de la capacité en μF .

t : temps de de vieillissement en heures.

ci : constantes dépendant du composant et des conditions de test.

Tableau 2-4 : Paramètres du modèle de dégradation de la valeur de capacité du condensateur TE4-5

Composants	c1	c2	c3	RMSE
TE4-5	2,219 $\mu\text{F}/\text{h}$	0.58	4816 μF	19,44 μF

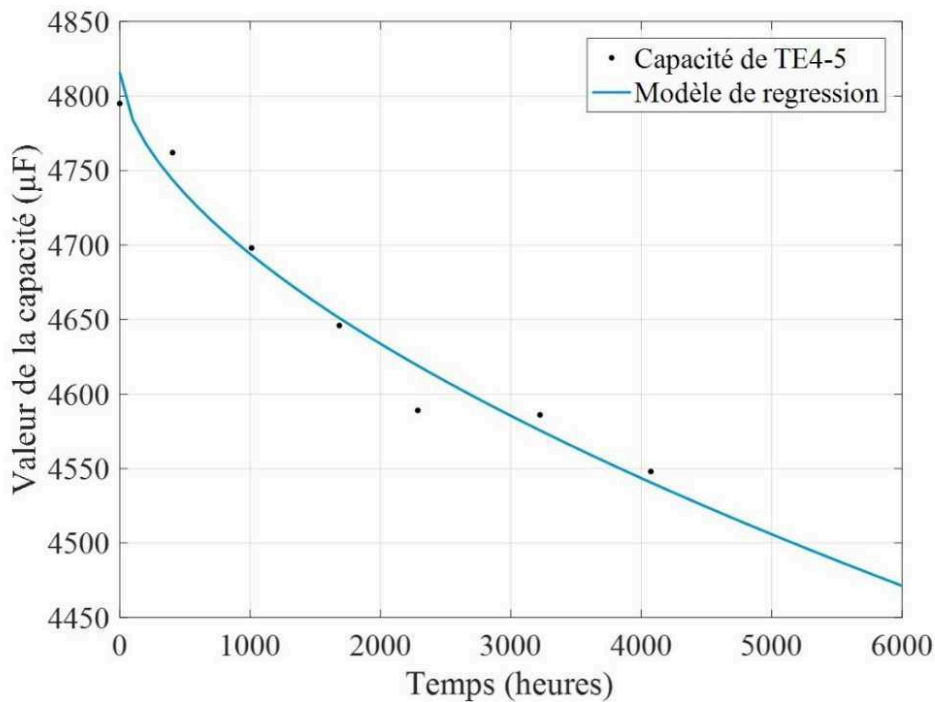


Figure 2-38 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la capacité

Comme il s'agit des effets du même processus chimique, la structure des modèles de régression de l'épaisseur et de la masse sont similaires.

Sur les Figures 2-23 et 2-26, on a représenté l'évolution de l'épaisseur des condensateurs TE1-1 ($0,86 \times U_n$ et à T_{\max}) et TE4-5 (U_n et à T_{\max}). La comparaison des deux courbes montre l'influence très importante du niveau de tension appliquée aux condensateurs.

Le modèle d'évolution de l'épaisseur correspondant au composants TE1-1 et TE4-5 est caractérisé par le Tableau 2-5 et par les courbes de les Figures 2-39 et 2-40. Là aussi on peut remarquer dans ce cas de figure la bonne concordance entre modèle et données expérimentales.-

Tableau 2-5 : Paramètres du modèle de dégradation de l'épaisseur des condensateurs TE1-1 et TE4-5

Composants	e_1	e	e_3	RMSE
TE1-1	$15,76 \cdot 10^{-3} \text{ mm/h}$	16,53 mm	$11,25 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	0.046 mm
TE4-5	$6,09 \cdot 10^{-3} \text{ mm/h}$	16,36 mm	$8,04 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	0.084 mm

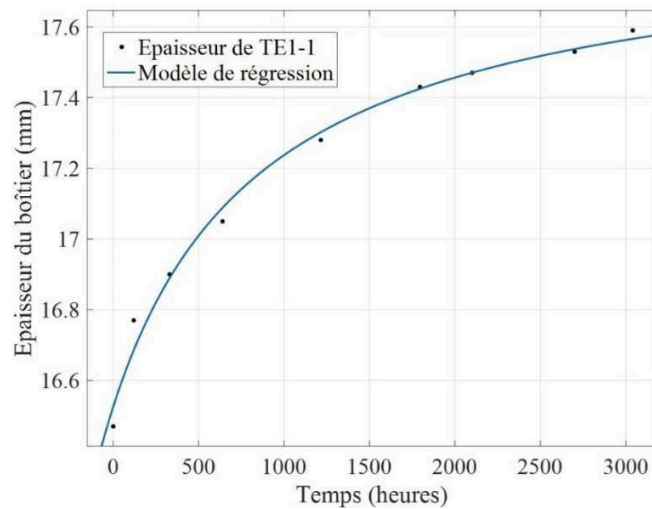


Figure 2-39 : Ajustement des mesures au modèle de régression proposé pour l'épaisseur du boîtier de TE1-1

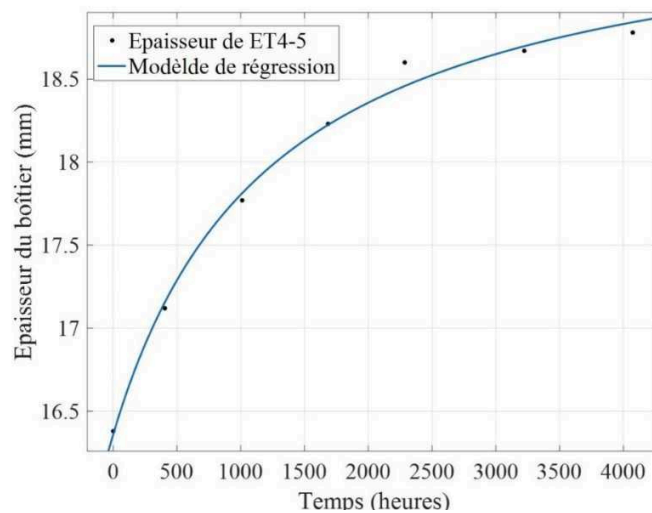


Figure 2-40 Ajustement des mesures au modèle de régression proposé pour l'épaisseur du boîtier de TE4-5

En ce qui concerne la perte de masse, les paramètres sont indiqués dans le Tableau 2-6 correspondant aux courbes des Figures 2-41 et 2-42. La sensibilité à la tension est beaucoup moins importante que pour l'épaisseur.

Tableau 2-6 : Paramètres du modèle de dégradation de la masse des condensateurs TE1-1 et TE4-5

Composants	m_1	m_2	m_3	RMSE
ET1-1	41,21 mg/h	33221 mg	$1,24 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$	1.737 mg
ET4-5	30,44 mg/h	32818 mg	$9,30 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	4,974 mg

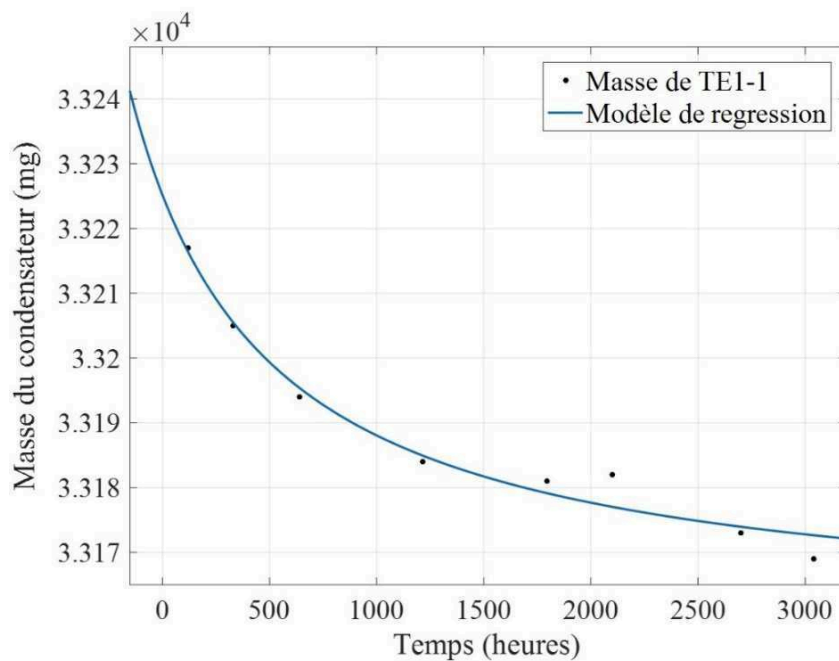


Figure 2-41 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la masse du condensateur TE1-1

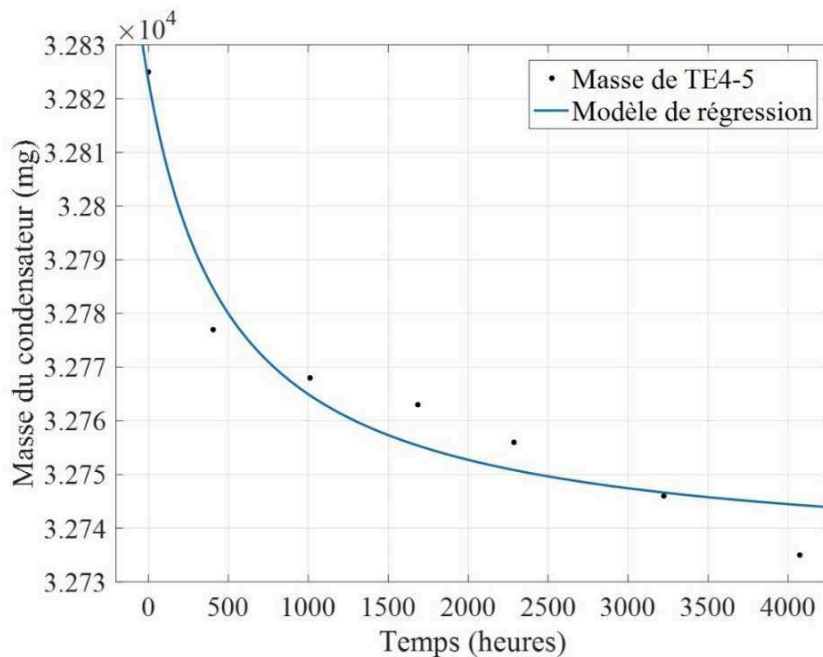


Figure 2-42 : Ajustement du modèle de régression proposé pour la masse du condensateur TE4-5

2.7 ANALYSE PRELIMINAIRE

L'étude expérimentale a permis d'accumuler un grand nombre de résultats qui sont encore en cours de traitement.

L'un des objectifs de l'étude de fiabilité visait à définir une périodicité « optimale » de remplacement préventif de ce type de condensateur.

Le caractère « optimal » de la période doit s'entendre comme un compromis de valeurs situées dans une plage déterminée par deux bornes correspondant à des risques de défaillance respectivement négligeable et significatif.

En effet, d'une part il est important d'éviter toute fuite d'électrolyte qui pourrait détériorer les composants implantés sur la carte, d'autre part il convient d'éviter un remplacement systématique trop fréquent, donc inutilement coûteux.

Compte tenu de la réalisation du dispositif, l'insertion du condensateur dans une structure rigide implique d'accepter un gonflement maximal correspondant au jeu dimensionnel disponible. Ceci afin d'éviter une rupture du boîtier par surpression interne et écoulement de l'électrolyte.

Le critère de décision retenu est donc celui de l'augmentation d'épaisseur jusqu'à un seuil critique correspondant au jeu disponible, puisqu'au cours des essais, l'évolution des autres paramètres ne s'est pas révélée significative en terme de dégradation des performances assignées.

Les courbes d'évolution de l'épaisseur les plus défavorables ont été relevées lors de l'essai TE 4 au cours duquel 5 composants ont été soumis aux contraintes électrothermiques maximales (tension, température, rapport cyclique).

L'exploitation des courbes de la Figure 2-19 (d) peut être abordée, non pas en considérant l'évolution relative maximale d'épaisseur du seul composant N° 5, mais en tenant compte de la variabilité de l'échantillon.

A titre purement illustratif, observons qu'à l'instant de fin d'essai TE4 (soit environ 4000 h), les augmentations relatives d'épaisseurs étaient approximativement de (12,0, 8,00, 12.5, 12,5, 14,5 %) pour les composants ordonnés du N° 1 au N° 5.

Physiquement, il s'agit d'une plage bornée dont l'amplitude permet d'estimer la valeur moyenne (11,25 %) et l'écart-type (2,815%) d'une distribution normale équivalente. Ce qui traduit une dispersion technologique non négligeable, pour des condensateurs du même type et du même fabricant, liée intrinsèquement à la nature et au mécanisme de décomposition de l'électrolyte liquide.

Cette analyse présente un caractère ponctuel puisqu'on se place en un point particulier du domaine bidimensionnel « épaisseur-temps ». Elle pourrait être reconduite tout au long des trajectoires expérimentales, mais seulement en première approximation, compte tenu de leur discrétisation.

2.8 CONCLUSION

Les essais réalisés ont permis de caractériser précisément les paramètres les plus significatifs (capacité, épaisseur et masse) dont l'évolution traduit la dégradation sous l'influence des contraintes thermiques et thermoélectriques. Les résultats ainsi obtenus constituent une base nécessaire à une étude ultérieure de fiabilité plus approfondie. Il convient de noter que les essais ont porté sur des échantillons de taille réduite, ce qui justifiera une analyse et une interprétation des résultats tenant en compte de la variabilité technologique des composants. Pour une première étude de dégradation de cette technologie de condensateur, seule la largeur du boîtier est retenue comme

paramètre significatif. Dans le but d'avoir des résultats fiables, Il est nécessaire de rajouter un ou deux critères significatifs (Loi Pareto) qui pourraient être déterminés en faisant d'autres types d'essai, tels que les essais aggravés.

La variabilité des résultats des essais mène à faire des analyses intrinsèques du condensateur afin de déterminer la composition chimique du composant ainsi que les différentes parties constituant le condensateur à savoir les électrodes et le diélectrique. Pour ce faire, le chapitre suivant porte sur les analyses physico-chimiques effectuées sur ces composants avant et après vieillissement.

Chapitre 3. ANALYSE PHYSICOCHIMIQUE DES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE

3.1 INTRODUCTION

Comme discuté dans le premier chapitre, les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide sont toujours considérés comme les composants les moins fiables, notamment en raison de leur grande sensibilité à la température due à l'environnement d'utilisation et à l'auto-échauffement [46]. Les principaux modes de défaillance observés sont la dégradation des paramètres électriques, en particulier la capacité et la résistance en série équivalente (ESR), ainsi que les fuites d'électrolyte [47]. Les fabricants tentent de minimiser l'occurrence de ces défaillances en améliorant la qualité des matériaux et de la surface des électrodes, la qualité des films d'oxyde d'aluminium et la composition de l'électrolyte.

Dans le chapitre précédent, l'évaluation de la fiabilité des condensateurs a été quantifiée par des caractéristiques mesurables d'une manière non destructive. Il s'agit de la mesure des paramètres électriques (capacité et ESR), des dimensions et de la masse du condensateur. Cependant, l'évolution de ces derniers est très influençable par le facteur thermique compte tenu de l'aspect chimique dominant de ces composants. De ce fait, il a été primordial de mettre en œuvre une analyse physicochimique sur la structure interne du condensateur qui est composé de l'électrolyte et des électrodes avec le diélectrique. La seule contrainte avec ce type d'analyse est qu'elle est destructive. Autrement dit, il est indispensable d'ouvrir le boîtier pour pouvoir analyser ces deux éléments. C'est pour cette raison que la comparaison des résultats des analyses est effectuée en se basant sur un composant non vieilli (dit aussi sain) et un condensateur ayant subi les essais de vieillissement du chapitre précédent. Le but de cette étude est de mieux expliquer les modes de défaillance observés en comprenant le mécanisme de défaillances. La caractérisation physicochimique présentée dans ce chapitre est faite par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

3.2 STRUCTURE DES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE ETUDIES

La conception classique des condensateurs d'aluminium à électrolyte humide (ou liquide) reste inchangée pour tous les fabricants. Il est constitué de deux feuilles d'aluminium de grande

pureté séparées par un papier isolant imprégné d'un électrolyte, qui sont enroulées dans un enroulement cylindrique, puis insérées dans un boîtier en aluminium et scellées [47] - [48], cf. Figures 1-4 et 3-1.

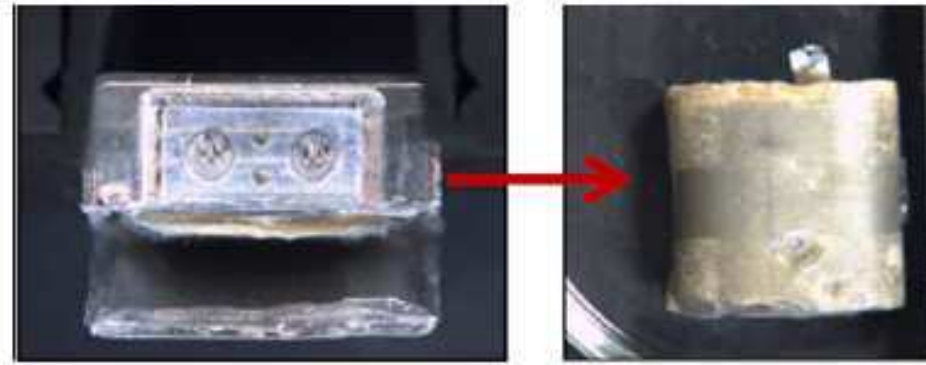


Figure 3-1 : Boîtier et bobinage d'un condensateur d'aluminium à électrolyte liquide

La feuille d'anode est gravée pour augmenter la surface utile et ainsi la valeur de la capacité devient plus importante. Une couche d'oxyde d'aluminium est formée par un processus d'anodisation en deux étapes. La première étape de l'anodisation est réalisée dans une solution d'électrolyte avec une tension d'application, appelée tension de formation, qui correspond généralement à 130 à 140% de la tension nominale du condensateur. L'oxyde ainsi formé s'appelle oxyde d'aluminium ou Alumine (Al_2O_3) et il joue le rôle d'un diélectrique. La feuille d'aluminium ayant le dépôt d'oxyde est traitée thermiquement à température élevée pendant 2 minutes pour améliorer la cristallinité et la permittivité relative du diélectrique. Dans la phase de préparation de la feuille de l'anode, un électrolyte contenant du phosphore est généralement utilisé pour réparer les défauts de l'oxyde [49]. En revanche, la feuille de cathode gravée est protégée contre la corrosion par un processus de passivation. Parmi les méthodes rapportées dans la littérature, la passivation est souvent utilisée avec une solution d'acide phosphorique, également appelée processus de phosphatation. Une couche est ainsi formée contenant des particules de phosphore qui sert à retarder la corrosion de la feuille de cathode et à éliminer la production du gaz d'hydrogène en présence d'eau lorsqu'on applique une tension aux bornes du condensateur [13] [50].

L'électrode négative est constituée d'une feuille de cathode et d'un papier imbibé d'électrolyte. Ce dernier est composé de solvants, de solutés et de certains additifs, sans addition d'eau [31]. Les propriétés les plus importantes d'un solvant sont :

- ✓ La conductivité élevée ;
- ✓ L'ininflammabilité ;
- ✓ La bonne solubilité ;
- ✓ La stabilité thermique et chimique.

D'autres additifs, tels que des inhibiteurs de corrosion, des dépolarisants, des absorbeurs d'hydrogène et des agents améliorant la conductivité, peuvent être ajoutés pour améliorer les performances de l'électrolyte [48] [51].

Sans oublier que les paramètres électriques dépendent fortement de la qualité du contact électrode-électrolyte. Un mauvais contact entraîne des valeurs ESR élevées, ce qui augmente la perte de puissance lorsqu'un courant ondulatoire est appliqué. Un bon contact anode-électrolyte permet de réparer les fissures au niveau de la couche d'oxyde causé par une utilisation excessive du condensateur, ce qui réduit le courant de fuite [51] [52]. Cette composition et cette structure chimique explique manifestement la sensibilité thermique de ces composants. De nos jours, les fabricants tentent d'améliorer la fiabilité de cette technologie en modifiant la composition de l'électrolyte et la conception de son boîtier.

Dans le cas étudié, les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide sont utilisés dans une carte électronique de puissance qui exige une compacité extrême. Cette caractéristique nécessite l'utilisation d'un condensateur ayant une forme compacte, telle que la forme cubique ou parallélépipédique. Par conséquent, le boîtier d'un condensateur utilisé présente une forme parallélépipédique, commercialisé sous le nom de condensateur cubique dans le marché de l'électronique, au lieu d'une forme cylindrique [31]. Ce qui permet d'avoir un composant moins encombrant et donc d'être facilement fixé en collant une de ses surfaces sur une carte de circuit imprimé.

Le boîtier aluminium du condensateur est soigneusement fermé à l'aide d'une brasure par laser, ce qui permet de sceller le boîtier comme indiqué à la Figure 3-2.

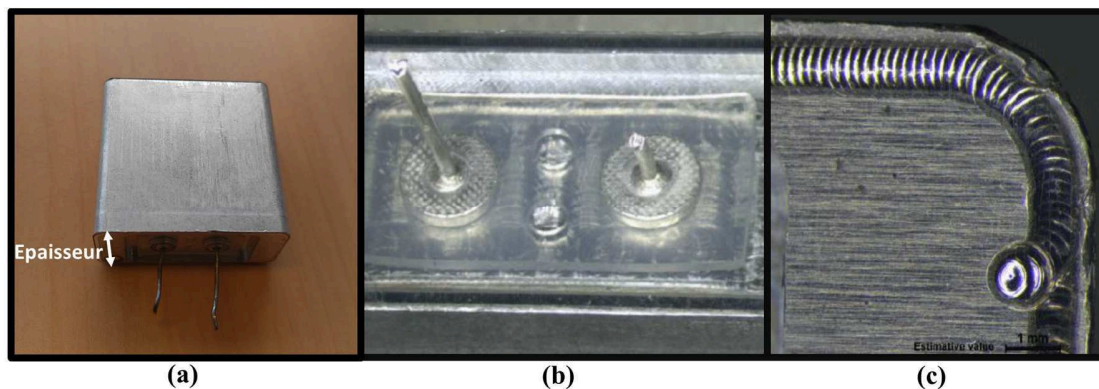


Figure 3-2 : Condensateur d'aluminium à électrolyte liquide de forme cubique ; (a) Image montrant le condensateur étudié ; (b) Image montrant un joint en élastomère ; et (c) Brasage par laser permettant de souder le couvercle avec le boîtier du condensateur

Cette structure permet d'endurer la pression interne générée par l'évaporation de l'électrolyte et d'éviter les fuites et le dessèchement de l'électrolyte pour les condensateurs sous des conditions d'utilisation extrême (haute température). Compte tenu de l'importance de la composition de l'électrolyte, les fabricants des condensateurs ne divulguent pas la formule chimique de ce dernier.

Une analyse par Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) a été réalisée sur l'électrolyte utilisé dans ce condensateur. Le spectre s'est avéré être similaire au spectre de référence d'un produit chimique existant dans la base de données utilisée qui est le Gamma-Butyrolactone (GBL), comme le montre la Figure 3-3.

Ce solvant aprotique et polaire a une faible viscosité, un point de fusion bas (-45 °C) et une température d'ébullition élevée (204 °C). Cela permet de fonctionner à haute température. Cependant, comme mentionné ci-dessus, cette information n'est pas suffisante pour évaluer la fiabilité ce type de technologie de condensateurs. Le choix des sels dissous dans ce solvant organique et dans les espèces additives participe énormément aux caractéristiques électriques et chimiques de l'électrolyte, telles que la conductivité et la cinétique de réactions électrochimiques [53].

Dans ce chapitre, deux sur cinq des condensateurs présentant une dégradation importante pour chaque essai de vieillissement sont analysés. Les résultats seront comparés à ceux d'un condensateur non vieilli servant de composant de référence.

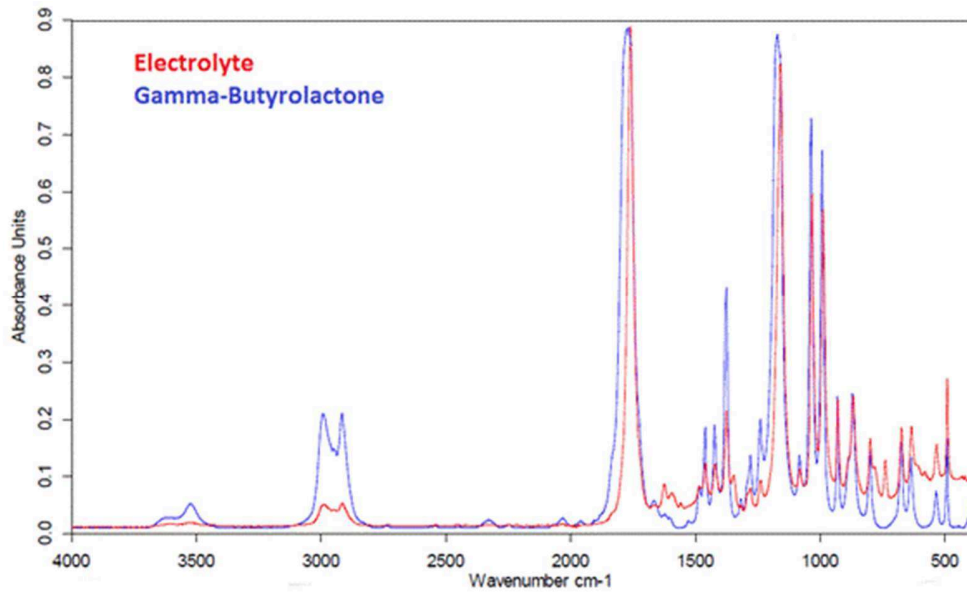


Figure 3-3 : Comparaison entre le spectre IRTF de l'électrolyte d'un condensateur non vieilli et celui du gamma-butyrolactone extrait d'une base de données IRTF

3.3 PREMIÈRES OBSERVATIONS SUR LES CONDENSATEURS AGES

Les premières observations sont clairement perceptibles. On constate des dépôts d'électrolyte autour des bornes, comme on peut le voir sur la Figure 3-4. La quantité d'électrolyte est importante pour les essais sous la température T_{MAX} et spécialement pour les essais sous une tension électrique à savoir TE1, TE3 et TE4. La trace de l'électrolyte sur une des bornes du condensateur utilisé dans l'essai TE2 (à T_{MIN} et sous la tension U_a) est très négligeable par rapport aux autres essais électriques. Alors qu'il n'y a pas de présence de trace d'électrolyte aux bornes des condensateurs utilisés dans l'essai ST2 (stockage à T_{MIN}) et l'essai CT (cyclage thermique).



Figure 3-4 : Fuite d'électrolyte à travers les bornes d'un condensateur ayant subi des essais de vieillissement

La photo ci-dessous est une image rapprochée des bornes d'un condensateur utilisé dans l'essai TE4 (à T_{MAX} et sous la tension U_n).

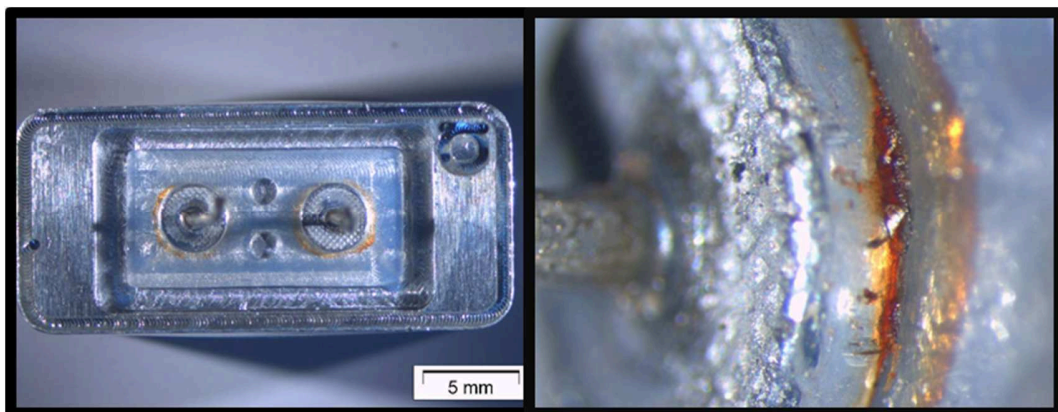


Figure 3-5 : Image montrant une fuite d'électrolyte à travers les bornes d'un condensateur ayant subi un test de cycle de charge / décharge à haute température pendant 3050 heures

3.4 CARACTERISATIONS PHYSICOCHEMIQUES DES CONDENSATEURS

3.4.1 MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

Des observations microscopiques des feuilles des électrodes ont été effectuées à l'aide de la microscopie électronique à balayage (MEB). À titre d'exemple du type de caractérisation pouvant

être réalisée par cette analyse, des images à faible grossissement de feuilles d'anode et de cathode pour un condensateur âgé TE1-1 (T_{MAX} et sous la tension U_a) sont données par la Figure 3-6.

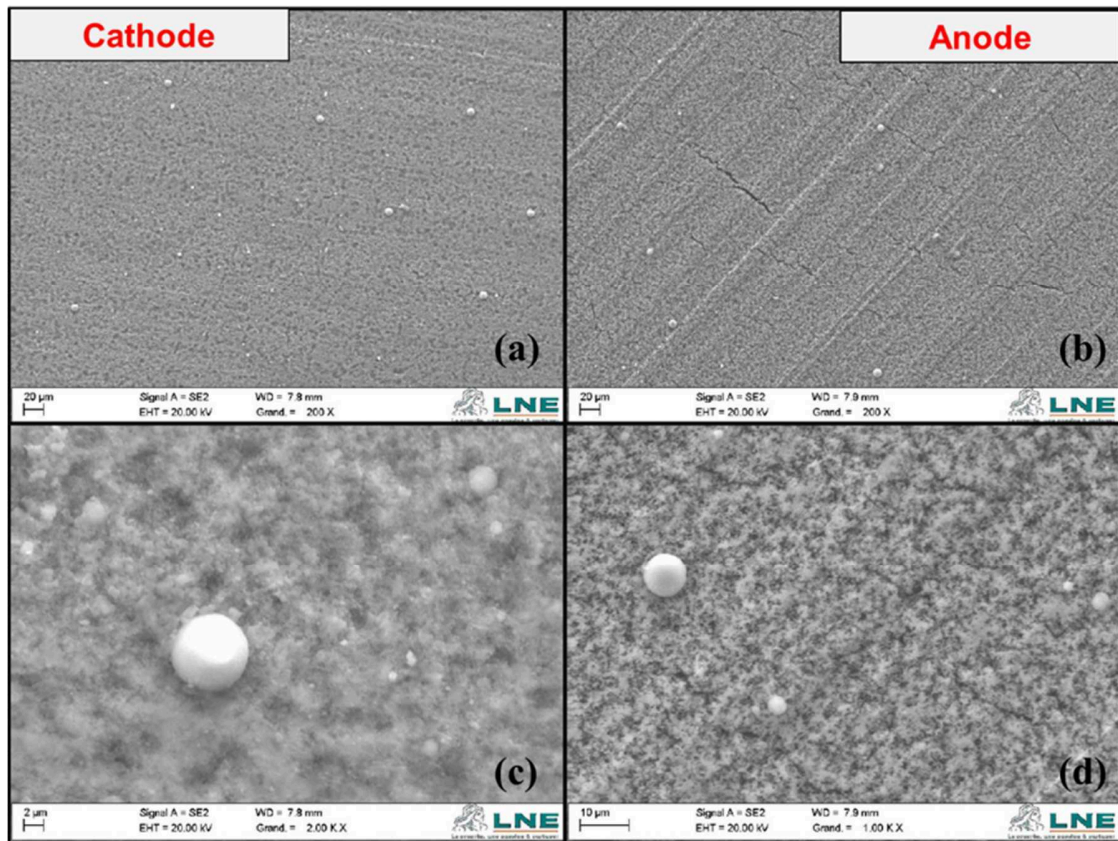


Figure 3-6 : Des images SEM d'électrodes d'un condensateur vieilli ayant subi les conditions de l'essai TE1 (T_{MAX} et sous la tension U_a)

Les fissures observées sur la feuille d'anode, cf. Figure 3-6 (b), peuvent s'expliquer par le comportement fragile de l'alumine qui résiste mal aux contraintes exercées par l'enroulement des électrodes. Cela pourrait également être dû à la compression de l'enroulement pour extraire l'électrolyte pour l'analyse chimique. En outre, ces fissures sont observées dans les feuilles des condensateurs non vieillis, c'est pourquoi nous ne pouvons pas considérer ce phénomène comme un mécanisme de défaillance. À fort grossissement, cf. Figure 3-6 (c et d), la rugosité de surface de l'anode et de la cathode due à une étape de gravure est clairement visible. De nombreuses particules sphériques sont observées sur toute la surface des feuilles ayant une taille de 6-8 μm . Une analyse par spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX) effectuée sur les particules

a révélé qu'elles contiennent un élément phosphore, qui peut provenir de l'étape de prétraitement des feuilles d'aluminium ou de la détérioration de la solution électrolytique. Ces particules se retrouvent également sur la surface interne des condensateurs de boîtier ainsi qu'on les retrouve dans les condensateurs non vieillis. Depuis, le contrôle des valeurs de capacité a montré que la dégradation de la capacité n'a pas atteint la valeur de défaillance du composant, voir la Figure 2-13 et la Figure 2-16. Pour cette raison, la présence des particules de phosphore à la surface des électrodes ne conduit pas, dans ce cas d'étude, à la défaillance des composants et ne peut donc pas être considérée comme un mécanisme de défaillances.

3.4.2 SPECTROSCOPIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE DU PROTON

Des analyses supplémentaires ont été effectuées pour déterminer si la composition de la solution électrolytique avait été modifiée à cause du vieillissement.

Des analyses par spectroscopie par résonance magnétique nucléaire du proton (RMN-1H) ont été réalisées sur une solution électrolytique de condensateurs non vieillis et vieillis. À cette fin, une goutte d'électrolyte a été obtenue en pressant l'enroulement de condensateurs. Le liquide résultant a ensuite été dissous dans un solvant de type deutérium contenant un étalon interne de haute pureté. Un exemple du spectre obtenu pour la solution électrolytique d'un condensateur non vieilli est donné à la Figure 3-7. Sa composition avec celle des substances chimiques contenues dans une base de données réalisée permet d'identifier et de quantifier les substances chimiques contenues dans l'électrolyte analysé.

Le spectre montre que la solution électrolytique contient principalement des molécules de gamma-butyrolactone (GBL) et de triéthylphosphite, qui sont respectivement utilisées comme solvant et inhibiteur de corrosion. La présence de particules de phosphore, voir la Figure 3-6, peut être due à la présence d'une telle substance dans l'électrolyte. La seconde information révélée par le spectre de RMN est le pourcentage de substances de GBL et de triéthylphosphite et d'autres structures détectées.

Le Tableau 3-1 montre le pourcentage de gamma-butyrolactone (GBL) et triéthylphosphite dans la solution électrolytique de condensateurs non vieillis et vieillis. La concentration est fournie en %m/m, qui est se calcule en utilisant cette formule : [Equation Chapter \(Next\) Section 1](#)

$$\text{Concentration}(\% \text{ m/ m}) = \frac{\text{masse du soluté}}{\text{masse de la solution}} \times 100 \quad (3.1)$$

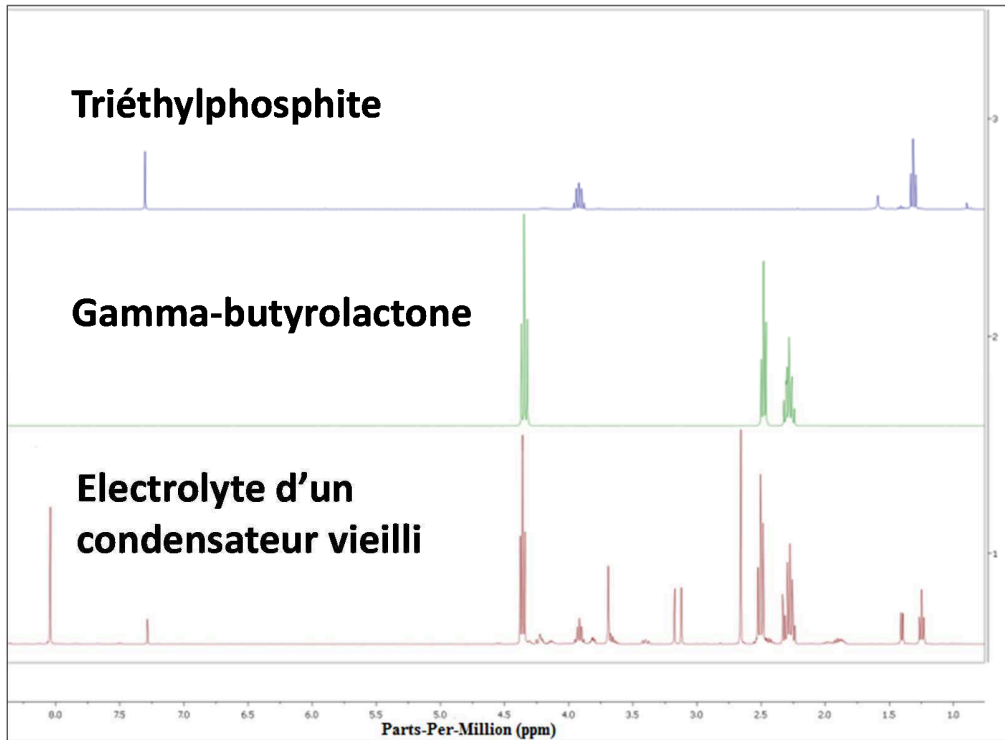


Figure 3-7 : Comparaison des spectres RMN 1H de l'électrolyte d'un condensateur non vieilli et des substances identifiées, à savoir le triéthylphosphite et la gamma-butyrolactone

Ce tableau montre que la valeur moyenne de la concentration du GBL était d'environ 62% et que l'écart type était de 0,04%. En ce qui concerne le triéthylphosphite, la valeur moyenne est de 9% et l'écart type de 0,007%. Cela signifie que la concentration d'inhibiteur peut ne pas être affectée par le processus de vieillissement ou qu'il existe un processus chimique qui aide à le maintenir dans un intervalle défini. Pour la concentration du GBL, les chiffres en caractères gras indiquent que cette concentration est supérieure ou inférieure à la moyenne calculée. ST2 - 1 et ET4 - 5 avaient la plus forte concentration en GBL.

Concernant le premier composant, aucune dégradation significative de l'ensemble des paramètres mesurés n'a été enregistrée. Tandis que le deuxième composant n'a pas le même numéro de code de lot de fabrication que les autres condensateurs. Pour ce composant, la seule différence notable dans les paramètres mesurés était le poids. En effet, il est le composant le plus

lourd parmi les composants utilisés pour le test. C'est peut-être parce que le fabricant a essayé d'améliorer la fiabilité du condensateur d'aluminium à électrolyte liquide en ajoutant davantage de solvant organique.

Tableau 3-1 : Concentration du gamma-butyrolatone et du triéthylphosphite dans la solution électrolytique des condensateurs non vieillis et vieillis

Essai	Composant	Concentration (in % m/m)		
		Gamma-butyrolactone	Triéthylphosphite	Autres substances
Non vieilli	Non vieilli - 1	61%	9%	30.0%
	Non vieilli ² - 2	59%	9%	32.0%
ST1	ST1 - 1	63%	9%	28.0%
	ST1 - 2	61%	9%	30.0%
ST2	ST2 - 1	76%	11%	13.0%
	ST2 - 4	52%	7%	41.0%
CT	CT - 1	58%	8%	34.0%
	CT - 4	63%	9%	28.0%
TE1	TE1 - 1	62%	9%	29.0%
	TE1 - 2	62%	9%	29.0%
ET2	ET2 - 1	56%	8%	36.0%
	ET2 - 3	63%	8%	29.0%
ET3	ET3 - 1	58%	8%	34.0%
	ET3 - 2	61%	8%	31.0%
ET4	ET4 - 1	59%	7%	34.0%
	ET4 - 5	80%	9%	11.0%

L'augmentation la plus importante de la largeur du condensateur a été enregistrée pour les composants du test ET4, ce qui signifie que la pression interne continue d'augmenter en raison de l'évaporation des substances et/ou de la génération d'hydrogène gazeux. Les réactions électrochimiques prendront un temps considérable avant d'atteindre un équilibre en fonction de la quantité de substances. Le composant ST2 - 4 a une valeur de capacité inférieure à celle des autres composants utilisés avant qu'ils subissent les essais de vieillissement et une concentration plus faible en gamma-butyrolactone et en phosphore de triéthyle après vieillissement. En supposant que les dimensions des feuilles et le papier utilisé soient les mêmes pour tous les lots, la valeur de la capacité dépend de la morphologie de l'anode et de la cathode et / ou du contact de l'électrolyte avec des électrodes. Sur la base de la valeur de concentration indiquée dans le Tableau 3-1, la faible concentration de solvant peut provoquer une saturation de la solution et donc la conductivité de l'électrolyte va diminuer. Cependant, la valeur de l'ESR et le courant de fuite n'ont pas été affectés. La diminution du pourcentage de concentration d'inhibiteur pourrait influencer la protection de l'électrode contre la corrosion. En conséquence, la détérioration des feuilles d'électrode diminuera les valeurs de la capacité en raison des réactions entre la feuille d'anode et l'électrolyte sous haute température, provoquant ainsi une détérioration de l'oxyde et la formation d'une couche d'oxyde entre la feuille de cathode et l'électrolyte.

Pour plus de détails sur les réactions sur l'électrolyte, les quantités de chacune des substances détectées sont énumérées dans le Tableau 3-2. Leurs calculs sont basés sur la valeur de la surface de son propre pic dans le spectre RMN. Le tableau donne uniquement les résultats des concentrations dans l'électrolyte du condensateur sans vieillissement, ST1 - 2 et ET4 - 4, afin de comparer les comportements des substances électrolytiques sous vieillissement thermique et vieillissement électrothermique. Les valeurs données ne concernent pas toutes les sous-structures détectées, mais uniquement celles dont la valeur est différente de celle du condensateur sans vieillissement.

La différence entre les valeurs est due à des réactions chimiques ou électrochimiques dans un électrolyte. Le calcul de la différence entre les valeurs des condensateurs non vieillis et vieillis permet de diviser la substance en groupes, réactifs et produits. Quand la différence est positive, c'est un produit, sinon c'est un réactif. Dans le Tableau 3-2, les chiffres en caractères gras représentent les réactifs, tandis que ceux en caractères italique représentent les produits. Dans

l'ensemble, les réactifs et les substances produites sont similaires pour les condensateurs vieillis. Par contre, la seule différence remarquable est la quantité de ces substances.

Admettons que les condensateurs contiennent la même quantité des sous-structures avant le vieillissement. Pour ST1 - 2, la quantité de substances perdues est de 66 unités et la quantité de produit produite est de 37 unités. Cette différence peut être due à l'évaporation de certaines substances et à des fuites d'électrolyte.

Tableau 3-2 : Pourcentage des quantités de substances basées sur les calculs de la zone de pics (sans prendre en compte le GBL et le triéthylphosphite)

Essai	Non vieilli	ST1	ET4
Sous-structures	Non vieilli - 1	ST1 - 2	ET4-5
Molecule A	39.1	28.0	32.6
Molecule A	44.1	43.3	29.0
Molecule A	29.8	31.1	40.0
Molecule B	51.1	54.2	37.4
B Alkane	50.0	40.3	43.1
B Alkane	67.5	56.8	51.8
C CH-Me2	23.7	29.7	23.6
C CH-Me3	94.9	89.8	102.8
D	25.8	36.1	16.2
D Alkane	26.0	16.5	15.7
Alk-COOME, O-CH2-CH2-O	146.0	152.6	178.7
O-CH3, N-CH3	90.9	85.9	100.7
O-CH3, N-CH3	90.3	84.2	97.8
Ar-CH3	91.0	82.8	97.3
Non identifié	16.5	26.1	18.7

Quant au condensateur ET4-5, la quantité de substances perdues est de 78 unités et la quantité de sous-structures produites est de 77 unités. Les deux valeurs sont égales, mais il n'est pas vérifié que les sous-structures réactives perdues donnent évidemment les substances produites.

Les phénomènes possibles qui peuvent se produire à l'intérieur des condensateurs, tels que les réactions entre électrode et électrolyte, l'évaporation de certaines substances à cause de l'application d'une haute température et les réactions chimiques entre les constituants de l'électrolyte. D'autre part, la quantité de substances perdues est plus importante pour le second composant ET4-4 que pour le composant ST1 - 2 car la contrainte appliquée est plus importante que les tests HTS. Par conséquent, il est logique d'avoir plus d'effet bombé, et donc une perte de poids plus importante. Comme on le voit, la composition chimique a changé pour les deux condensateurs et plus visiblement pour le test ET4. En conséquence, le condensateur est moins performant après vieillissement qu'avant, ce qui est illustré par la diminution de la valeur de la capacité.

3.5 CONCLUSION

L'utilisation des condensateurs ayant subi les trois types d'essais de vieillissement pour des analyses physico-chimiques est nécessaire à cause du comportement chimique dominant de ces condensateurs. En effet, les analyses menées ont permis de localiser les différentes transformations chimiques qu'on retrouve après vieillissement et en fonction de l'intensité des contraintes appliquées. Ces analyses font la base d'une étude préliminaire de la composition physicochimique du condensateur. En effet, sa structure et l'aspect chimique de l'électrolyte permettent d'expliquer les différents modes et mécanismes de défaillances qu'on retrouve dans le fonctionnement système du condensateur.

Les trois derniers chapitres portent sur l'étude de la dégradation des condensateurs isolés de leur application. C'est pour cela que des essais système ont été menés pour mieux comprendre la fiabilité de ces condensateurs dans des conditions réelles d'utilisation. Le chapitre 4 porte sur les différents essais effectués au niveau système en détaillant les différents outils utilisés et les étapes pour monter le banc de test.

Chapitre 4. ETUDE DE LA FIABILITE D'UN SYSTEME ELECTRONIQUE DE PUISSANCE SOUS LES CONDITIONS OPERATIONNELLES

4.1 INTRODUCTION

Comme déjà expliqué dans le premier chapitre, les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide précédemment étudiés sont utilisés dans des cartes électroniques de puissance d'un RADAR. Le but de ce chapitre est d'étudier la fiabilité de ces composants en simulant des conditions réelles d'utilisation. Certes, les essais réalisés dans le chapitre 2 sont très proches des conditions du fonctionnement système et en particulier d'un point de vue thermique et électrique. Cependant, d'autres de facteurs peuvent intervenir lors de l'intégration du composant sur carte. On peut noter par exemple :

- ✓ Le vieillissement des composants adjacents qui peuvent avoir une augmentation de leur puissance dissipée par effet Joule liée à l'augmentation de leurs résistances équivalentes et ainsi les conditions thermiques d'utilisation du condensateur seront variées dans le temps.
- ✓ Les contraintes mécaniques relatives au montage du condensateur. En effet un condensateur collé sur une de ses larges surfaces, cf. Figure 4-1 n'aura pas forcément le même comportement de vieillissement qu'un condensateur fixé qu'avec ses deux bornes et sans collage, comme le cas du montage réalisé pour effectuer les essais de vieillissement du chapitre 2, cf. Figure 2-13.

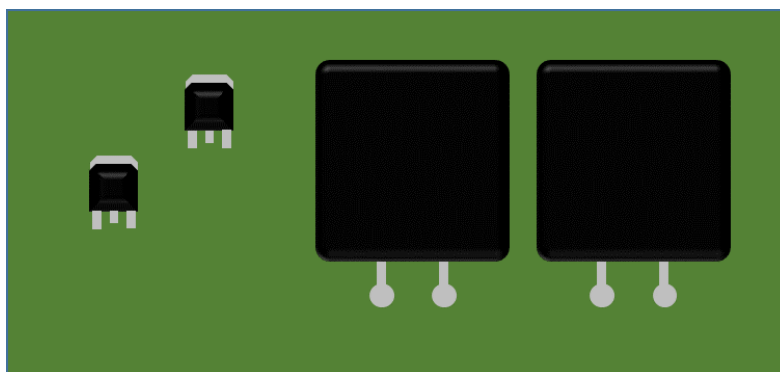


Figure 4-1 : Schéma simplifié des condensateurs montés dans leur système

4.2 CONTEXTE DE FONCTIONNEMENT DE LA CARTE D'ALIMENTATION

Le système électronique de puissance étudié est utilisé dans un système d'émission RADAR qui est constitué de plusieurs modules qui fonctionnent indépendamment. Chaque module, est constitué principalement de plusieurs sous-parties qui chacune assure une fonction particulière qui sont :

- ✓ **Fonction de modulation et d'Atténuation** : Elle assure principalement la modulation du signal.
- ✓ **Fonction High Power Amplifier (HPA)** : Son rôle est l'amplification du signal d'entrée grâce à des transistors de puissance. Pour le cas étudié, l'émission RADAR est multi-voies, ce qui explique l'usage de plusieurs transistors.
- ✓ **Commande** : La fonction commande a pour rôle de générer et de distribuer les signaux de synchronisations pour la fonction alimentation, et aussi de commander les fonctions d'alimentation
- ✓ **Fonction alimentation** : Il s'agit du système électronique de puissance étudié contenant principalement de convertisseurs DC/DC. Elle fournit des impulsions de puissance aux différents HPA en fonction des signaux de commande. A la sortie de chaque convertisseur deux condensateurs du type étudié dans le chapitre 2 sont montés en parallèle, cf. Figure 4-2.

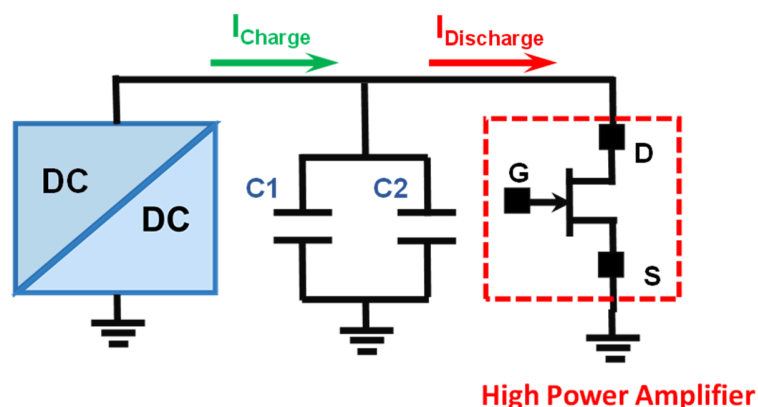


Figure 4-2 : Circuit simplifié du fonctionnement d'une voie de la carte d'alimentation

On distingue trois modes de fonctionnement RADAR :

- ✓ **Courte impulsion** : Ce mode correspond à un signal de commande par des impulsions ayant un rapport cyclique minimal τ_{min} avec une fréquence maximale (une période courte), cf. Figure 2-8. Il se traduit par un courant d'ondulation minimal au niveau du condensateur.
- ✓ **Longue impulsion** : Ce mode est caractérisé par un signal de commande ayant un rapport cyclique maximal τ_{max} avec une fréquence minimale (une période longue), cf. Figure 2-8. Il se traduit par un courant d'ondulation maximal au niveau du condensateur.
- ✓ **Période de silence** : Aucun signal de commande n'est envoyé. Ainsi la tension entre les bornes des condensateurs est constante et se traduit par l'absence d'un courant d'ondulation.

De point de vue thermique, la plage de température enregistrée au niveau de la carte est comprise entre deux niveaux de température notés T_1 et T_2 . Cet intervalle de température est dû au gradient de température causé par effet Joule. La valeur de ce dernier dépend principalement de la résistance électrique et du courant appliqué.

Sans oublier une autre caractéristique ayant un aspect thermique qui est la résistance thermique. En effet, la carte d'alimentation est fixée sur un support mécanique en aluminium muni d'ailettes permettant une bonne dissipation de chaleur par convection afin d'éviter le cumul de la quantité de chaleur et de permettre le refroidissement des composants constituant la carte. Pour pouvoir vieillir les condensateurs montés dans leur système dans les conditions thermiques d'utilisation, le châssis a été découpé à la limite de la carte pour pouvoir mettre cette dernière dans l'étuve pendant les essais.

D'autre part, le châssis peut être sujet à des vibrations vu que le module RADAR tourne d'une façon permanente. Ce stress mécanique pourrait être ensuite transmis aux composants de la carte d'alimentation. Sachant qu'un composant vieilli a une structure interne très fragile, un stress mécanique de ce type peut le conduire à une défaillance catastrophique. La combinaison entre les deux contraintes, thermique et vibratoire, fragilise la soudure au niveau du composant aussi bien qu'au niveau de la carte. Ce qui peut provoquer un dysfonctionnement du système [54].

Ce contexte général de la carte a permis d'établir une liste d'essais de vieillissement sur système permettant d'étudier la fiabilité des condensateurs dans leur environnement réel d'utilisation. Ceci est réalisé grâce à un banc de test évolué qui simule la fonction émission RADAR. Ainsi, on distingue trois types d'essais :

- ✓ **Essai électrique à haute température** : Pendant ce test, la carte d'alimentation est mise dans une enceinte climatique et sous tension. Il n'y a que quatre voies qui sont en mode pulsé, alors que le reste des voies est en mode silencieux. . Toutefois, la température de l'étuve est fixée de telle manière que la température maximale au niveau des condensateurs ne dépasse pas T_{MAX} , cf. Chapitre 2. La durée totale de l'essai est approximativement 3000 heures.
- ✓ **Essai « ON-OFF » avec cyclage thermique** : Il a pour but de simuler les variations de température du système correspondant à l'arrêt (sous 25 °C) depuis le régime nominal (dans un environnement ayant une température T_n). La durée d'un cycle thermique est de deux heures avec le changement de paliers de température sur un intervalle qui dure approximativement 20 minutes, cf. Figure 4-4. La durée totale de l'essai est approximativement 3000 cycles.

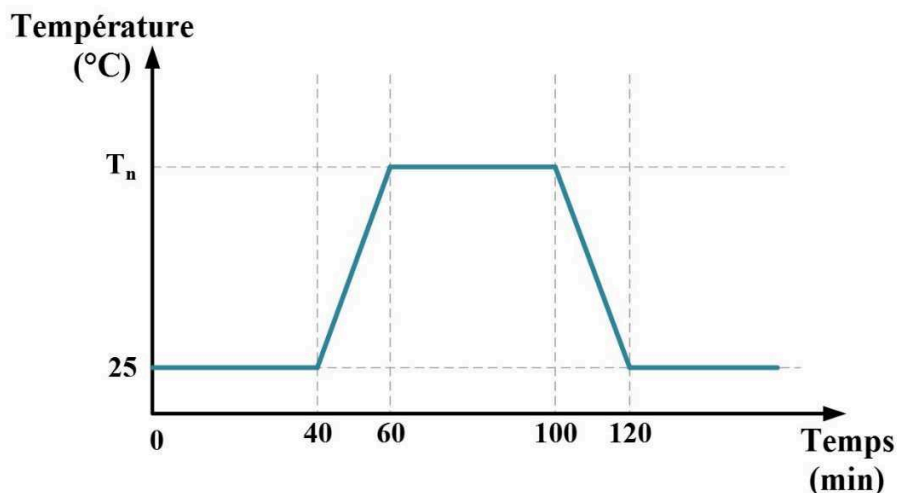


Figure 4-3 : Profil thermique de l'essai « ON-OFF » avec cyclage thermique

- ✓ **Essai de vibration** : Un essai de vibration est effectué sur des condensateurs non vieillis et vieillis. Le scénario de cet essai sera détaillé dans ce qui suit.

4.3 ESSAI DE VIEILLISSEMENT SUR LES CONDENSATEURS D'ALUMINIUM A ELECTROLYTE LIQUIDE MONTES SUR CARTE

4.3.1 BANC DE TEST SYSTEME

Un banc de test a été monté à l'IRSEEM pour réaliser les essais de vieillissement sur les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide montés sur carte. Il permet d'assurer plusieurs fonctions qui simulent le fonctionnement de l'émission RADAR et mesurent les deux tensions V_G et V_D en utilisant un programme LabVIEW. Néanmoins, la grandeur significative pour superviser la fiabilité des condensateurs est la tension V_D , cf. Figure 4-2.

Ce banc de test se divise en deux parties principales qui sont :

- ✓ Equipement Hardware ;
- ✓ Equipement Software.

4.3.1.1 Description de l'outillage Hardware

Les matériels hardware sont montés dans une armoire. Les matériels constituant ce banc sont :

- a. Un PC industriel.**
- b. Carte de commande de la fonction alimentation**

La carte commande du banc pour l'essai de la fonction alimentation remplit les mêmes fonctions qu'au niveau système, à savoir la génération et la distribution des signaux de synchronisation et l'envoi des commandes pour l'activation des sorties de la fonction alimentation.

- c. Coffret d'interface**

Cet outillage réalise l'interface entre la carte Digital Input Output (DIO) de National Instrument, PCI 6561, et la carte de commande de la fonction alimentation.

d. Tiroir des charges actives

Cet outillage permet de simuler la consommation de courant des transistors HPA présents dans le système RADAR. Le rack des charges actives est primordial pour le déroulement de l'essai sur la carte d'alimentation en mode pulsé, cf. Figure 4-3. Il contient des charges actives et une carte de commande des charges actives. Grâce à un signal de type Low Voltage Differential Signaling (LVDS), le niveau des charges est ajusté et elles sont activées en fonction des caractéristiques du signal de synchronisation envoyé par la carte de commande de la fonction alimentation. Chaque charge consomme un courant et une tension qui correspondent à ceux consommés par les transistors HPA. La tension représentée sur la Figure 2-8 est la tension mesurée aux bornes des deux condensateurs d'une voie de la fonction alimentation et qui représente en même temps la tension fournie à la charge active.

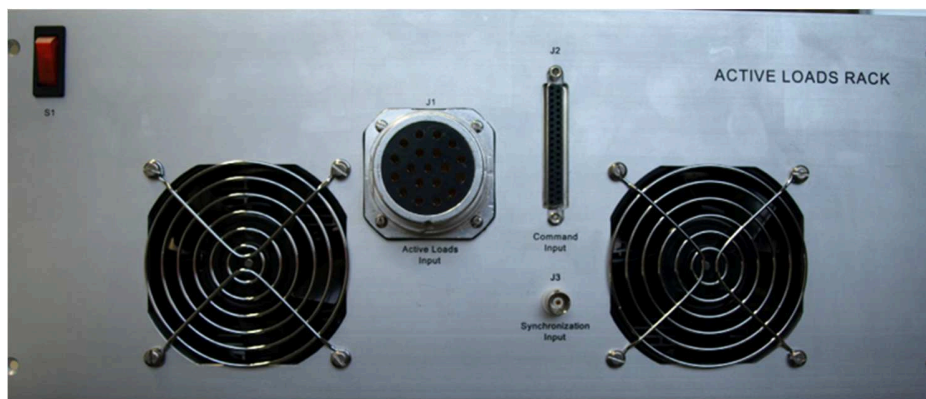


Figure 4-4 :Face avant du rack charges actives

e. Switch et mutiplexeur

Le switch permet de sélectionner la tension de la voie choisie à l'aide du soft LabVIEW du PC et de l'oscilloscope.

f. Multimètre

Les tensions mesurées sont des tensions DC comprises entre 3.3V et 45V. Cet appareil permet de mesurer les tensions clés de la carte d'alimentation afin de valider son bon fonctionnement.

g. Oscilloscope.

h. Source d'alimentation 3.3V et 12V

Elle fournit les tensions nécessaires au fonctionnement de la carte commande.

i. Source d'alimentation

Elle fournit la tension DC à la carte d'alimentation sous test.

4.3.1.2 Descriptif de l'outillage software

Il permet d'effectuer les différentes mesures en mode automatique ou manuel grâce à un PC industriel qui est équipé de :

- ✓ Environnement Windows ;
- ✓ I/O port : 2 série (RS232) ;
- ✓ 2 ports USB ;
- ✓ 2 slots Industry Standard Architecture (ISA) dont une est occupée par une carte National Instrument PC-DIO-24.
- ✓ 2 slots Peripheral Component Interconnect (PCI):
 - 1 carte National Instrument PCI-GPIB (IEEE488-2);
 - 1 carte National Instrument PCI 6561.

Le PC est configuré avec un Runtime LabVIEW 8.5 qui permet de commander le banc et de mesurer en temps réel des tensions électriques de la carte sous test.

4.3.1.3 Installation et mise en marche du banc de test

a. Mise en place du banc de test

La photo ci-dessous montre une mise en place des équipements standards ainsi que l'outillage spécifique dans la configuration du Banc de test.



Figure 4-5 : Banc de test de la fonction alimentation

Les interconnexions de tous les équipements du banc de test sont réalisées suivant le schéma ci-dessous, cf. Figure 4-6.

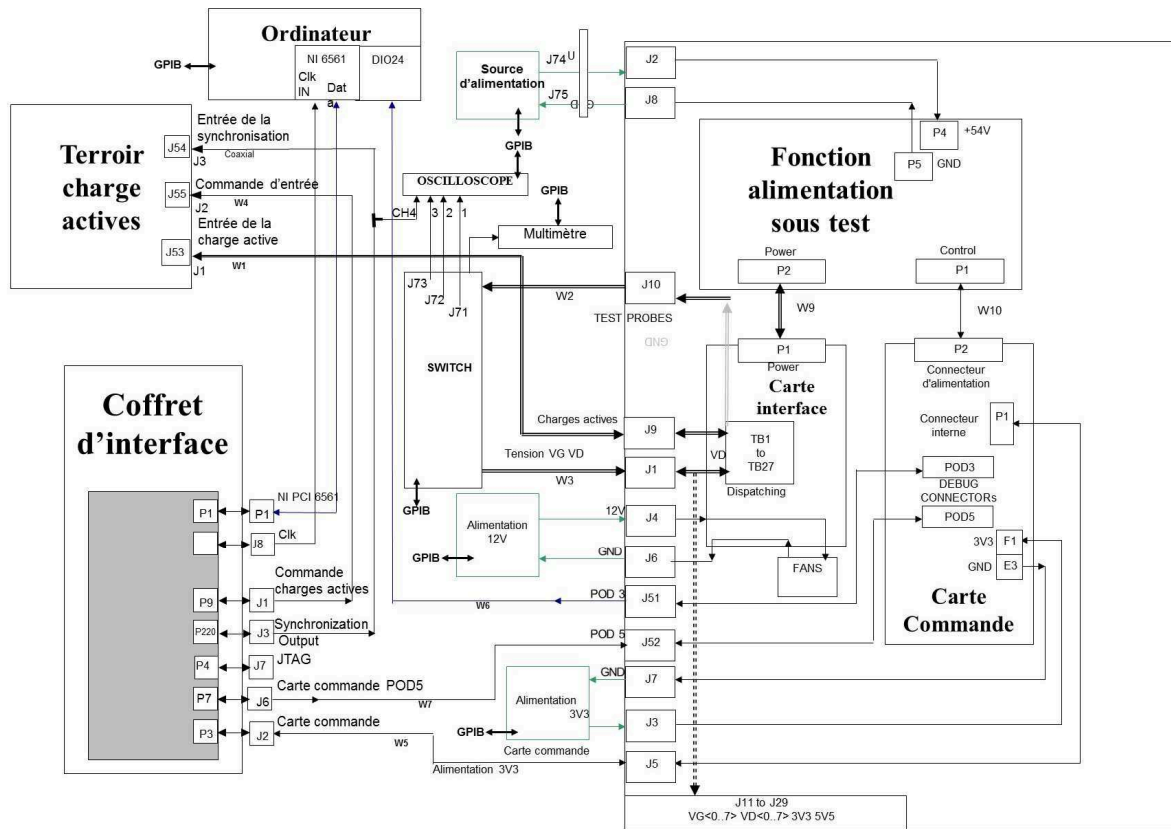


Figure 4-6 : Schéma des interconnexions du banc d'essai

Afin de compléter ce banc, il a fallu installer un système permettant de superviser la température des composants. Pour cela, des thermocouples sont installés dans la fonction alimentation et les températures sont enregistrées grâce à un système d'instrumentation. Le paragraphe suivant décrira ce système avec plus de détails.

4.3.2 SYSTEME DE SUPERVISION DES TEMPERATURES

Les essais sur les condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide montés dans la fonction alimentation mettent en jeu le facteur thermique. Un système de mesure des températures était donc nécessaire dans le but de mesurer et enregistrer les valeurs mesurées. D'un autre côté, la température des condensateurs ne doit pas dépasser T_{MAX} la température maximale qui est donnée par le profil de mission du système, au cours des essais. Dans le cas où elle dépasse cette valeur, la température consigne T_a de l'étuve est baissée.

Pour ce faire, trente-deux thermocouples sont montés sur la carte à ces emplacements :

- ✓ 1 thermocouple dans l'étuve qui permet de mesurer la température environnante ;
- ✓ 2 thermocouples aux extrémités du châssis :
- ✓ 27 thermocouples sur la face avant de la carte.
 - 1 thermocouple au milieu de la carte.
 - 16 thermocouples répartis sur différents condensateurs de la fonction alimentation.
 - 8 thermocouples, sur des transistors utilisés dans le convertisseur DC/DC lié à la tension Vd.
 - 2 thermocouples sur les deux points les plus chauds identifiés par une thermographie infrarouge :
 - 1 thermocouple sur le PWM (Pulse Width Modulation) du Buck du 5,5 V, qui représente une tension nécessaire pour la mise en marche de la fonction alimentation.
 - 1 thermocouple sur l'un des transistors du convertisseur DC/DC 5,5V.
- ✓ 2 thermocouples sur la face arrière de la carte.
 - 1 thermocouple sur un contrôleur DC/DC du transistor de « Alim_Vg ».
 - 1 thermocouple sur un PWM de la fonction Vd.

La Figure 4-7 illustre la façon dont sont montés les thermocouples sur les composants de la fonction alimentation. Les thermocouples sont connectés à une carte d'acquisition de données et les températures mesurées sont ensuite enregistrées et visualisées sous forme de courbe « température (en °C) en fonction du temps (en seconde) » sur un PC connecté à l'appareil d'instrumentation.

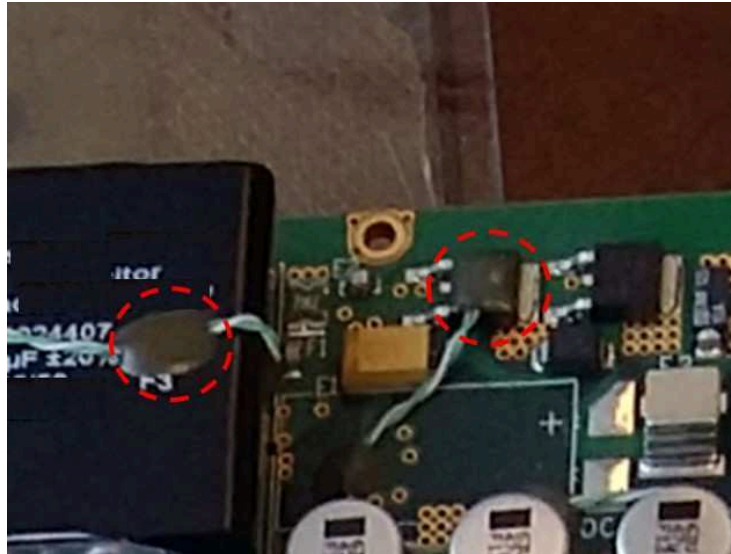


Figure 4-7 : Installation des thermocouples sur les composants de la fonction alimentation

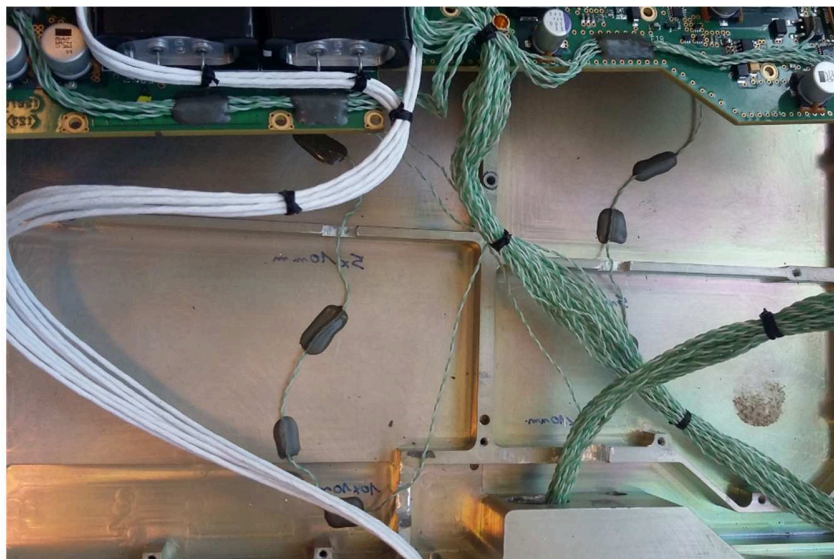


Figure 4-8 : Cablage des thermocouples sur la carte d'alimentation

4.3.3 MISE EN ŒUVRE D'UN ESSAI SUR CARTE

Avant de lancer les essais, le banc d'essai est testé pour vérifier s'il y a des bugs au niveau de l'interface LabVIEW qui permet de commander le banc. La mise en marche de la carte avec les capteurs est nécessaire pour s'assurer de la présence des offsets au niveau des mesures des capteurs à cause des interférences créées lors du lancement.

La Figure 4-9 monte une photo du banc de test utilisé pour mener les essais des condensateurs montés dans leur système.

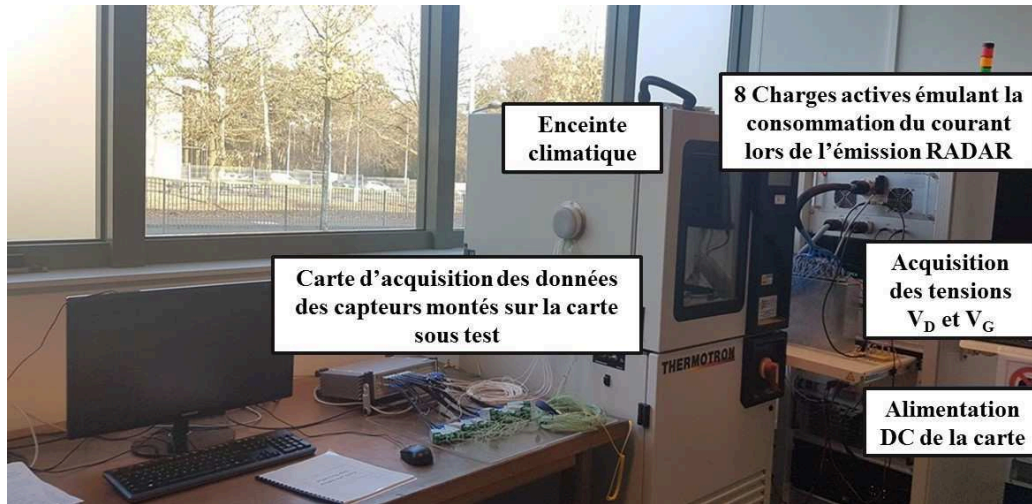


Figure 4-9 : Banc de test niveau système

Pour mener à bien cet essai, il a fallu tout d'abord mettre l'étuve en marche à la température fixée par le profil de mission du système étudié qui représente la température opérationnelle environnante. Puis, une fois que la température des composants se stabilise à la température de l'étuve, la carte sous test est mise sous tension, cf. Figure 4-10. Sur les graphes de la température, seules les températures T_a et T_{MAX} seront placées sur l'axe des ordonnées.

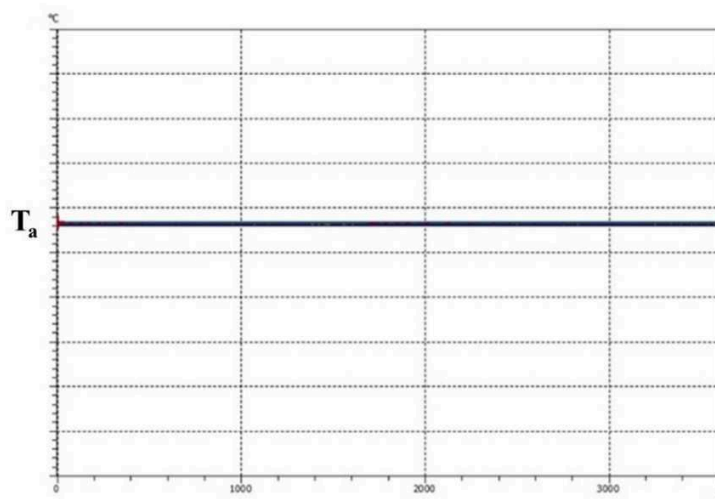


Figure 4-10 : Stabilisation de la température des composants de la carte à la température environnante imposée par l'étuve

4.4 RESULTATS DES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT SYSTEME

4.4.1 ESSAI ELECTRIQUE A HAUTE TEMPERATURE

Pour cet essai, 4 voies sont en mode pulsé, les autres restants en mode silence. Les mesures effectuées et les résultats de cet essai seront présentés ci-dessous.

4.4.1.1 Inspection visuelle

A la fin des 3000 heures, le banc de test et l'étuve sont mis à l'arrêt. Le système sous test a été sorti de l'étuve après le temps nécessaire à son refroidissement afin d'éviter d'ajouter des défaillances liées à un choc thermique. Lorsqu'on ouvre le capot de la carte, les premiers constats sont des traces de l'électrolyte, voir Figure 4-11.

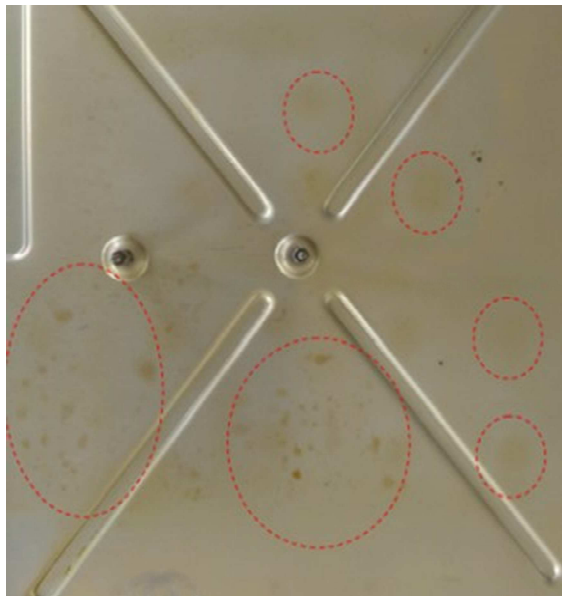


Figure 4-11 : Trace d'électrolyte sur le capot après un vieillissement électrique

Tandis qu'il n'y a aucune trace d'électrolyte sur les bornes des condensateurs, cf. Figure 4-12, comme celle aperçue dans les essais de vieillissement sur les composants, cf. Figure 3-4.

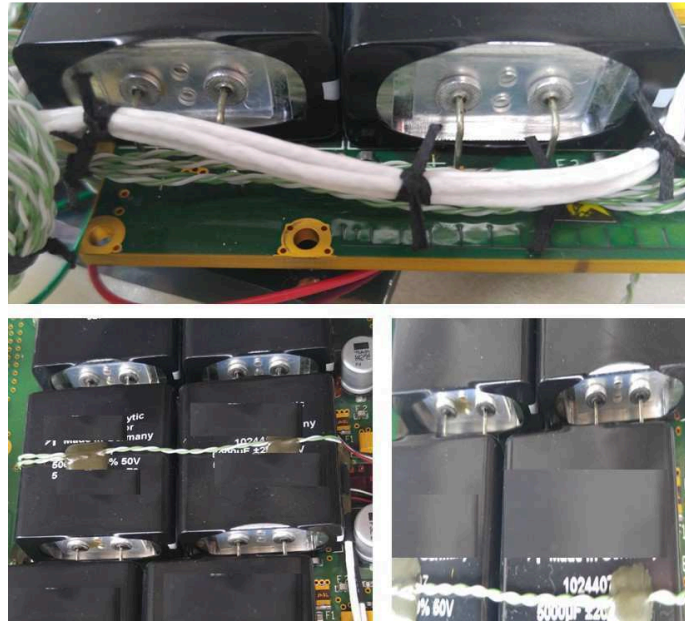


Figure 4-12 : Photos de la carte après 3000 heures de test électrique à haute température

4.4.1.2 Tension V_D

La Figure 4 -16 représente la tension entre les bornes du condensateur d'une des voies de la fonction alimentation à des instants différents de l'essai de vieillissement.

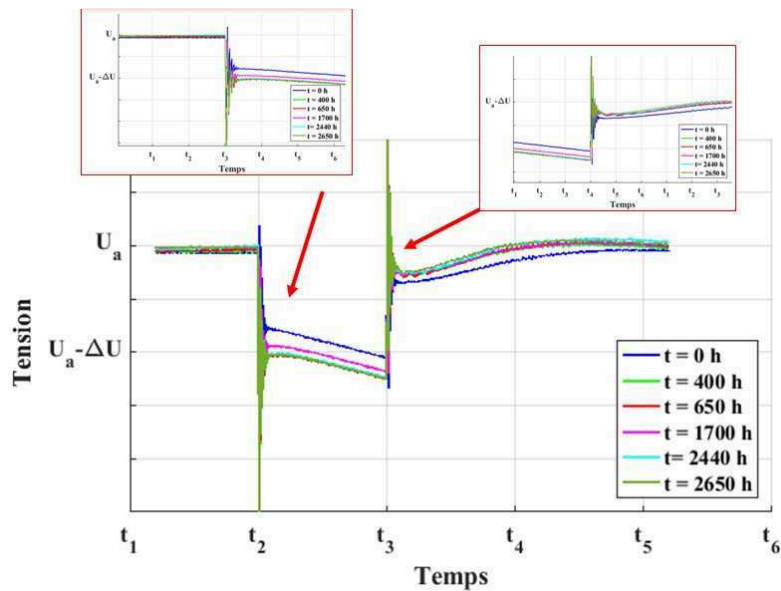


Figure 4-13 : Tension aux bornes des condensateurs à des instants différents de l'essai de vieillissement d'une voie de la carte

Cette figure montre une chute de tension lors de la phase décharge des condensateurs. Ce phénomène peut être expliqué par la chute d'une résistance série, soit au niveau des condensateurs soit au niveau d'un autre composant de la carte. C'est pourquoi, la mesure des paramètres électrique des condensateurs est nécessaire.

4.4.1.3 Caractérisation des condensateurs avant et après vieillissement

Afin d'exploiter les résultats de caractérisations des condensateurs, la détermination des emplacements des condensateurs est nécessaire. Des numéros sont attribués aux 16 condensateurs ayant les thermocouples, ce dernier sera utilisé pour représenter les caractéristiques des composants.

Les paramètres mesurés caractérisant les condensateurs sont les mêmes que ceux mesurés dans le chapitre 2.

b. Valeur de la capacité

La Figure 4-14 représente les valeurs de la capacité monitorés au début et à la fin de l'essai. On constate que la valeur de la capacité reste inchangée. Pour le cas des condensateurs de la voie X portant les numéros 13 et 14, leurs valeurs de capacité sont restées inchangées malgré la variation du profil de la tension V_d à leurs bornes au cours de l'essai.

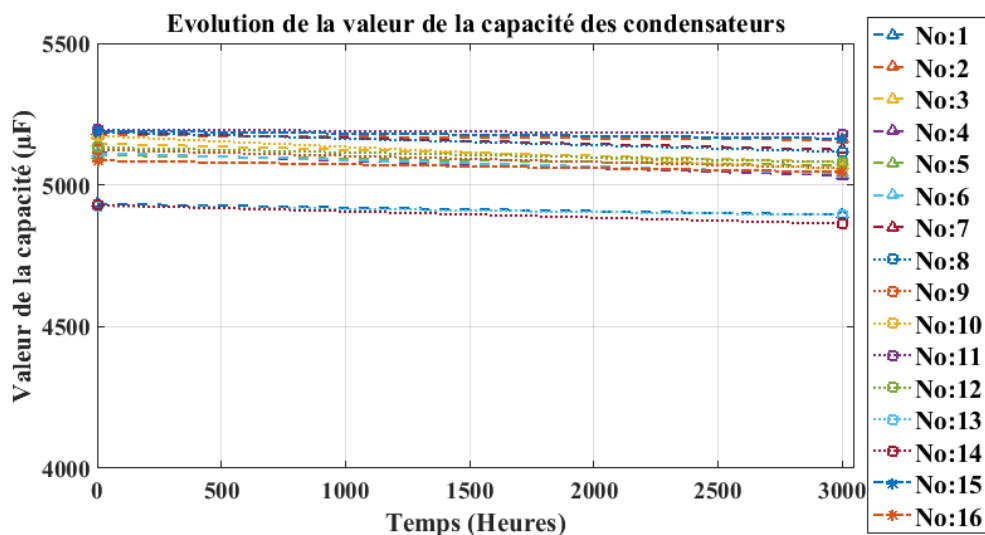


Figure 4-14 : Evolution de la valeur de la capacité des condensateurs montés sur la carte ayant subi l'essai électrique à haute température

c. Valeur de l'ESR

La Figure 4-15 montre les valeurs de la résistance équivalente série au début et à la fin de l'essai. L'évolution de la valeur de l'ESR a le même profil d'évolution que la capacité. C'est le cas également des condensateurs utilisés dans la voie mesurée sur la Figure 4-13, leurs valeurs d'ESR demeurent quasiment constantes.

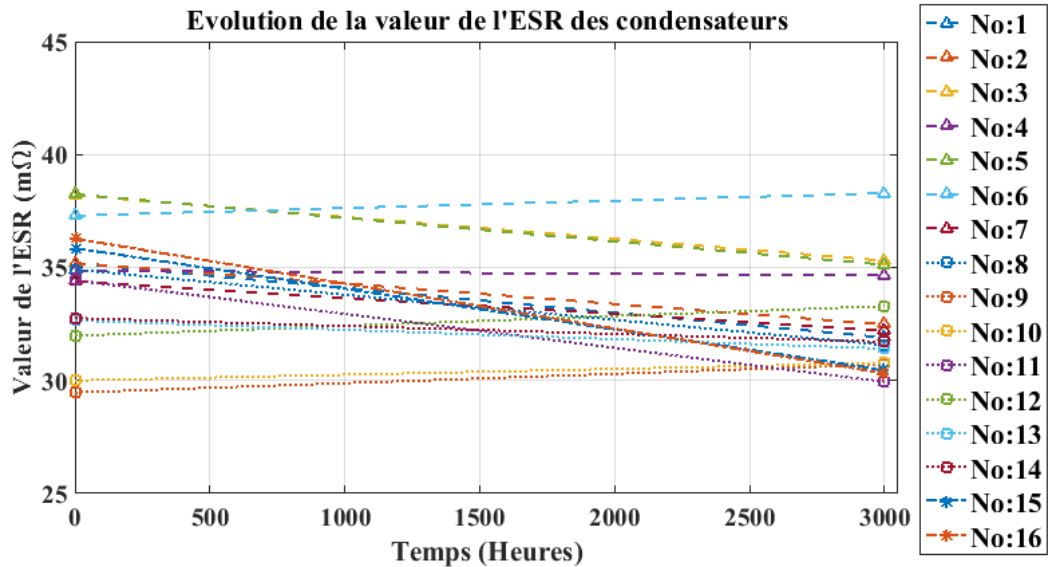


Figure 4-15 : Evolution de la valeur de l'ESR des condensateurs montés sur la carte ayant subi l'essai électrique à haute température

d. Valeur de l'épaisseur du boîtier

La Figure 4-16 montre l'évolution de la valeur de l'épaisseur du boîtier au début et à la fin de l'essai. L'ensemble des condensateurs a subi une augmentation de l'épaisseur du boîtier avec une moyenne d'augmentation de 0,7 millimètre. Pour les condensateurs numéro 13 et 14, l'augmentation mesurée de l'épaisseur est respectivement 0,64 et 0,88 millimètre. Comme déjà expliqué précédemment, cette augmentation est due à la pression interne générée par l'application d'une haute température.

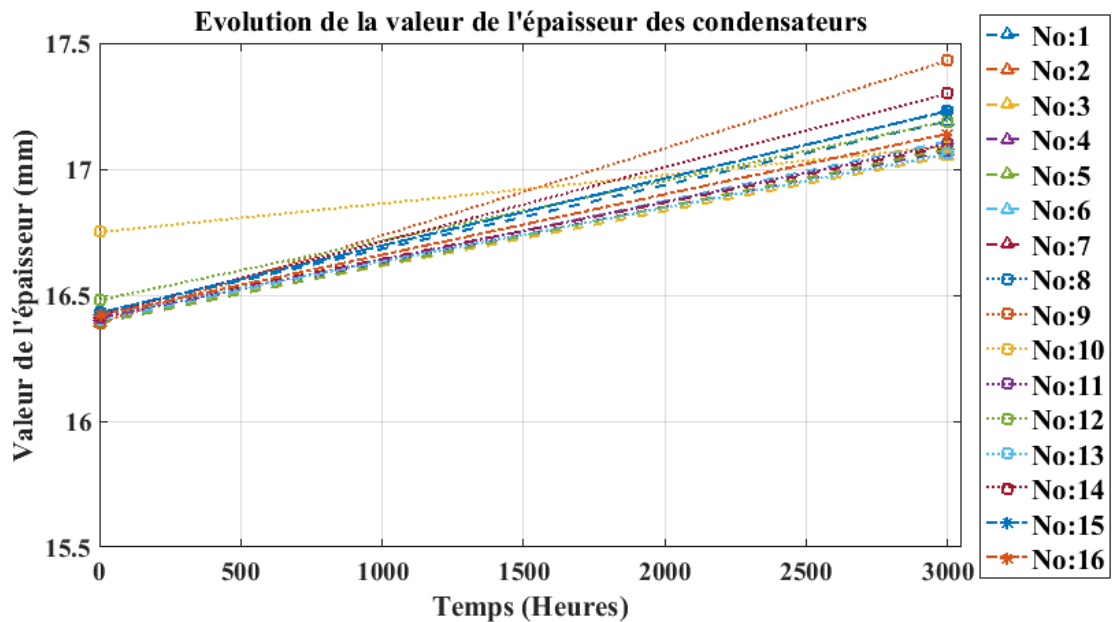


Figure 4-16 : Evolution de la valeur de l'épaisseur des condensateurs montés sur la carte ayant subi l'essai électrique à haute température

4.4.1.4 Mesure des températures

Le système d'instrumentation a permis de mesurer les températures des composants. Le graphe de La Figure 4-17 montre l'évolution de la valeur des températures des condensateurs. Il est constaté que le condensateur le plus chaud est celui qui est utilisé dans la voie nommée X, qui est en mode pulsé. Comme déjà dit, les paramètres caractérisant ce condensateur présentent des variations très négligeables.

La courbe de la figure 4-17 présente les composants les plus chauds. Elle représente l'évolution de la température en °C sur une heure de test. Ce créneau de test est choisi après avoir atteint un régime permanent en température. Trois composants présentent une dissipation de chaleur importante. Dans l'ordre croissant de température, il s'agit d'un contrôleur PWM (Pulse Width Modulation), un transistor utilisé à l'entrée de la fonction alimentation et un des transistors utilisés dans le convertisseur DC/DC d'une voie Y.

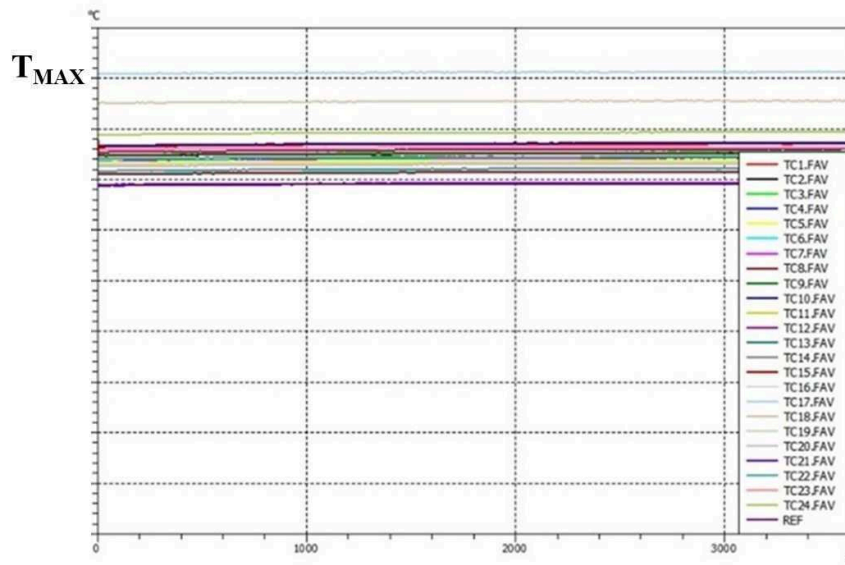


Figure 4-17 : Température des composants les plus chauds de la carte sous test à $t = 0$ heure

A la fin de l'essai, la température de composants cités ci-dessous peut augmenter, cf. Figure 4-22. L'élévation de la température des transistors, particulièrement celle du transistor de la voie X pourrait être due à la résistance R_{dson} lorsque le transistor adjacent est dans le mode passant, cf. figure 4-1. Ceci explique aussi la haute température enregistrée pour le condensateur adjacent qui porte le numéro 24 sur la courbe de la Figure 4-17.

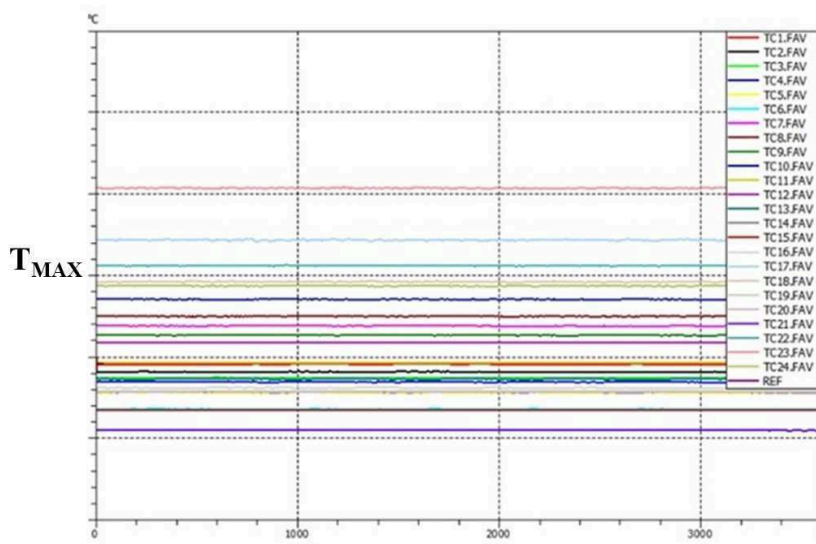


Figure 4-18 : Température des composants les plus chauds de la carte d'alimentation sous test à $t = 3000$ heures

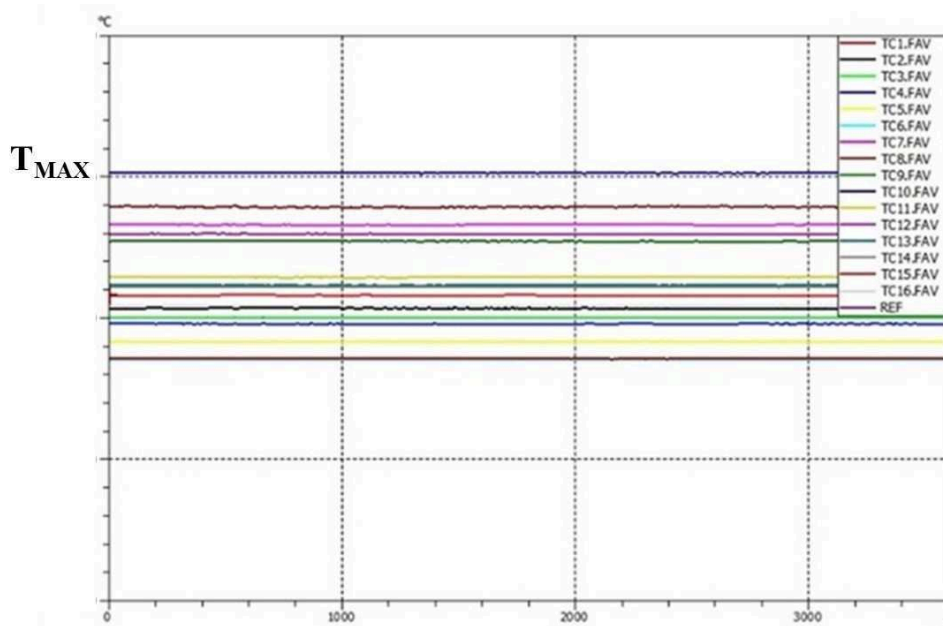


Figure 4-19 : Température des condensateurs la carte d'alimentation sous test à t = 3000 heures

4.4.2 ESSAI « ON-OFF » AVEC CYCLAGE THERMIQUE

Cet essai est réalisé avec un cycle « ON-OFF » accompagné d'un cyclage thermique. Pendant le mode ON, quatre voies sont en mode pulsé.

Les condensateurs de cet essai ne sont pas caractérisés car fournis déjà montés sur carte. On se contentera des mesures de la tension V_D de la voie Z. Le choix de cette voie est dû au fait qu'elle est proche du contrôleur PWM, le composant le plus chaud de la carte en test.

A la fin des essais, il y avait quelques traces d'électrolyte sur le capot du châssis comme l'essai précédent.

La Figure 4-20 représente la tension aux bornes des condensateurs de la voie Z à des instants différents. Ce profil de tension est resté le même en fonction du temps, c'est le cas aussi des autres voies qui sont mises en mode pulsé. Ceci reflète que les caractéristiques de ces condensateurs ne sont pas dégradées par un cyclage thermique dans des conditions système. Alors que les voies en mode silencieux sont moins susceptibles d'être endommagées car ces condensateurs ne sont pas soumis à une ondulation du courant en l'absence d'un cycle de charge/décharge.

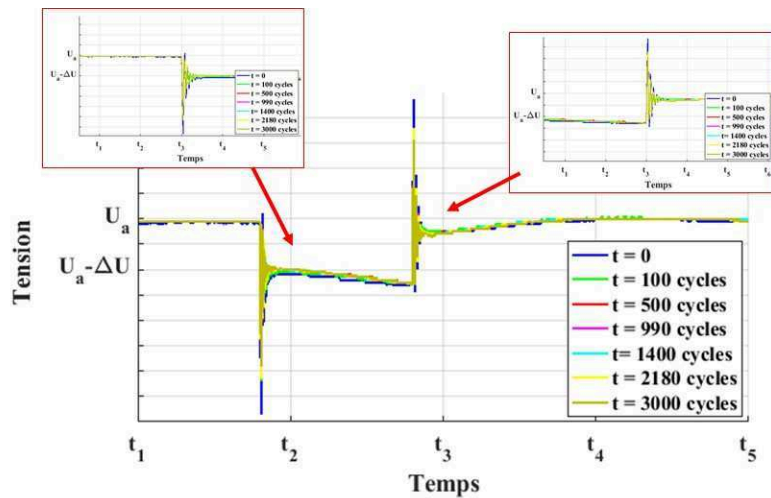


Figure 4-20 : Tension aux bornes des condensateurs à des différents instants de l'essai de vieillissement d'une voie de la carte

Après avoir analysé l'effet des conditions thermiques dans un système, on analysera l'effet des vibrations sur des condensateurs défaillants et non défaillants.

4.4.3 ESSAI DE VIBRATION

La préparation de ce test est faite sur deux étapes :

- ✓ Première étape : préparation d'un échantillon de condensateurs défaillants pour le test de vibration.
- ✓ Deuxième étape : préparation du banc de test pour l'essai de vibration.

a. Préparation de l'échantillon à tester

D'après les résultats précédents, quelles que soient les conditions excessives appliquées aux condensateurs, ces derniers n'atteignent pas leur limite de dégradation fixée soit par la valeur de capacité soit par la valeur de l'ESR. C'est pourquoi un essai aggravé sous des conditions thermiques extrêmes est réalisé, qu'on nommera ST3, afin d'avoir un échantillon défaillant. En effet, l'essai réalisé est un essai de stockage thermique sous 150°C qui a duré 790 heures.

Les Figures 4-21, 4-22 et 4-23 représentent respectivement l'évolution de la capacité, l'ESR et l'épaisseur du boîtier. Les trois grandeurs dépassent la valeur critique et ainsi le condensateur

est jugé défaillant en prenant en compte n'importe quel paramètre des trois comme limite de la défaillance.

En outre, trois condensateurs non dégradés et non vieillis ont été ajoutés à l'échantillon dédié à l'essai de vibration, qu'on note NV.

b. Profil de l'essai de vibration

Les composants testés ont été installés sur un banc de vibration effectuant des sélections aléatoires selon le profil présenté ci-après, cf. Figure 4-24. Ce stress mécanique est réalisé selon les trois axes cartésiens X, Y et Z. La durée de l'essai d'endurance est de 4h30 pour chaque axe. Ce profil d'endurance se base sur le profil mission des équipements aéronautiques.

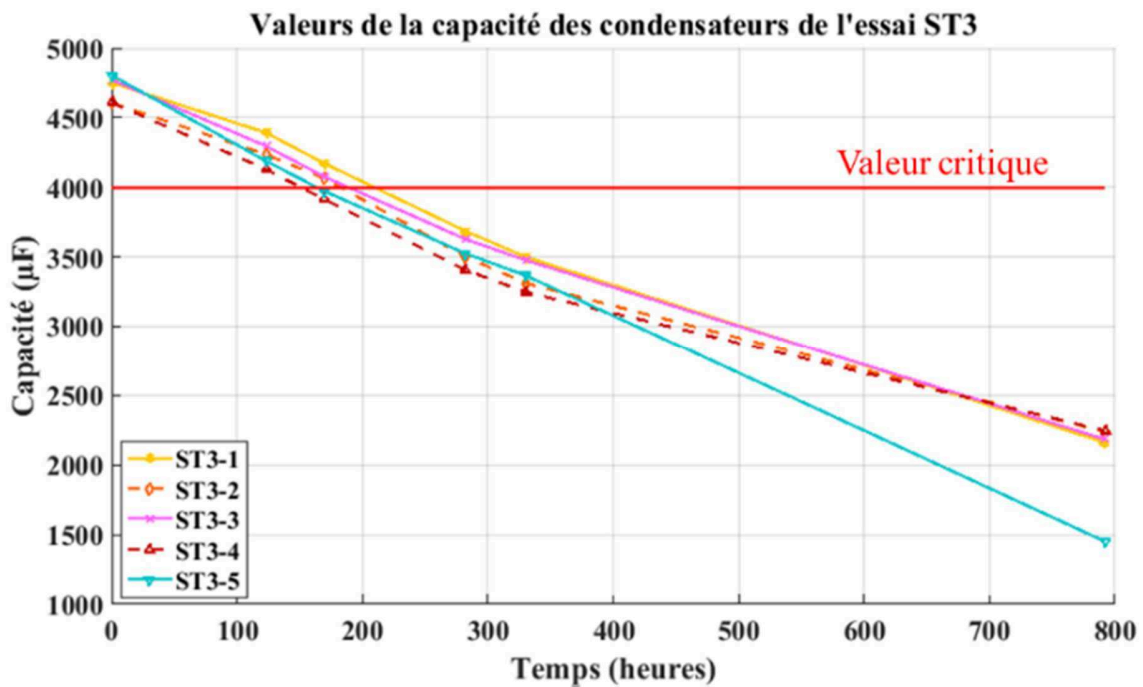


Figure 4-21 : Evolution de la valeur de la capacité des condensateurs ayant subit les conditions de l'essai ST3

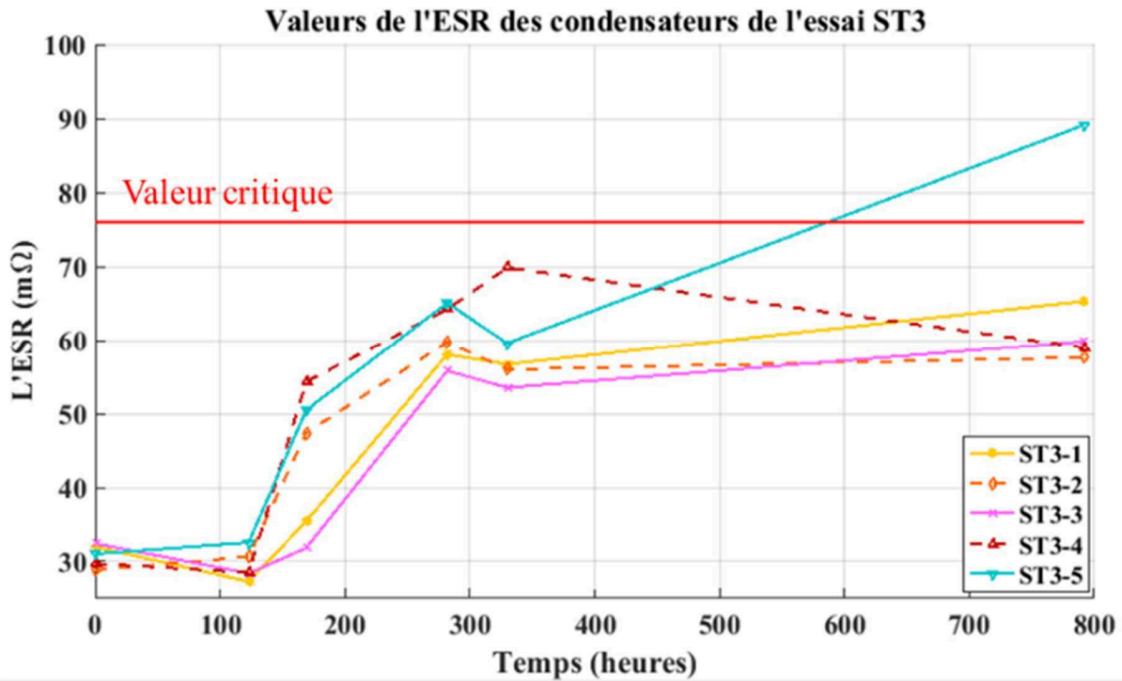


Figure 4-22 : Evolution de la valeur de l'ESR des condensateurs ayant subit les conditions de l'essai ST3

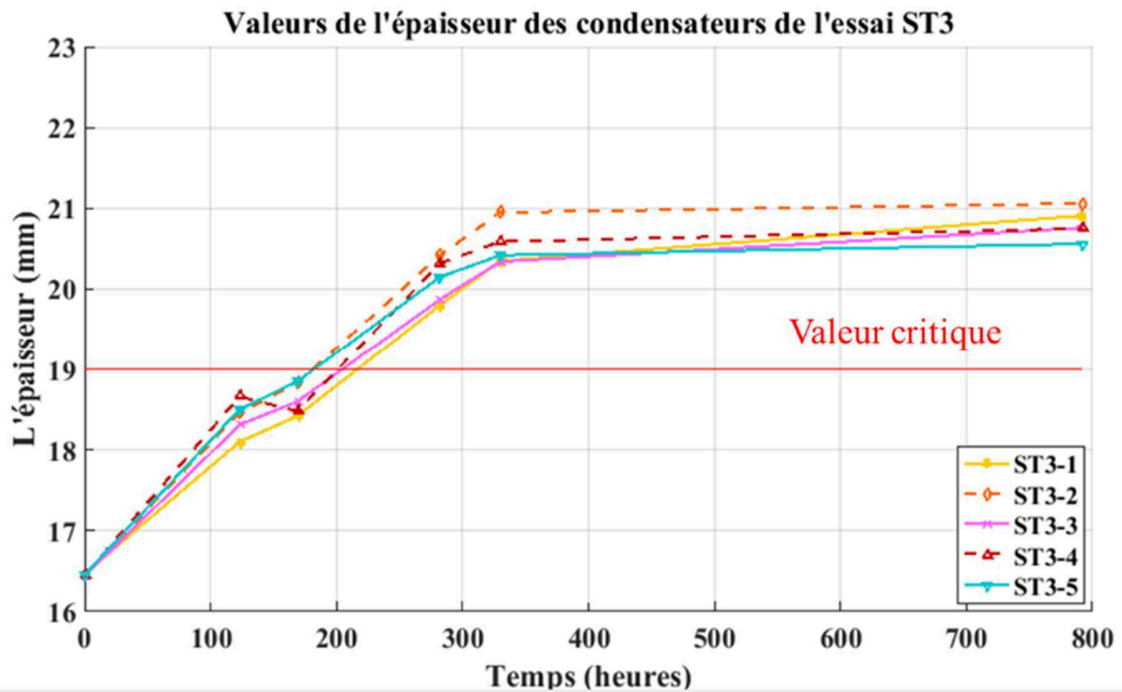


Figure 4-23 : Evolution de la valeur de l'épaisseur des condensateurs ayant subit les conditions de l'essai ST3

X Axis (4,38g rms)		Y Axis (3,91g rms)		Z Axis (4,38g rms)	
Frequency (Hz)	Level ($(m/s^2)^2/Hz$)	Frequency (Hz)	Level ($(m/s^2)^2/Hz$)	Frequency (Hz)	Level ($(m/s^2)^2/Hz$)
5	1	5	1	5	1
8,3	4	13,5	7	7,8	2
9	50	14,4	200	9	40
10	50	18,5	200	10	100
11,5	2	22	4,8	14,4	0,69
20,5	6,2	24,3	20	19,8	0,69
22,7	156	28,1	20	21,5	18
24,9	156	43,5	0,1	26,5	18
28,1	27	49,3	2,5	37	0,6
29,8	105	59,7	2,6	98	0,55
33,8	104	83,5	0,12	140	0,3
37,4	1,16	530	0,05	422	0,3
43,8	0,93	642	0,15	653	0,9
48,7	9,2	2000	0,16	2000	0,9
60,5	7				
72,8	0,25				
255	0,2				
400	0,03				
277	0,034				
1167	0,08				
1269	0,5				
1603	0,5				
2000	0,1				

Figure 4-24 :Spécifications du test d'endurance pour chaque axe

c. Réalisation de l'essai

Les condensateurs à tester sont collés sur un plateau en aluminium contenant des trous pour pouvoir le fixer sur le banc de test à l'aide des boulons. Les essais sont effectués pour chaque axe, cf. Figures 4-25, 4-26 et 4-27 dans les locaux du laboratoire CEVAA (Centre Vibroacoustique et Fiabilité).

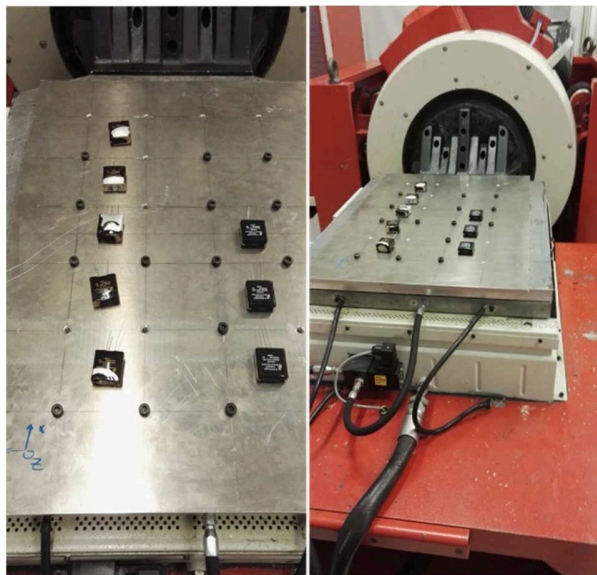


Figure 4-25 :Essai de vibration selon l'axe X

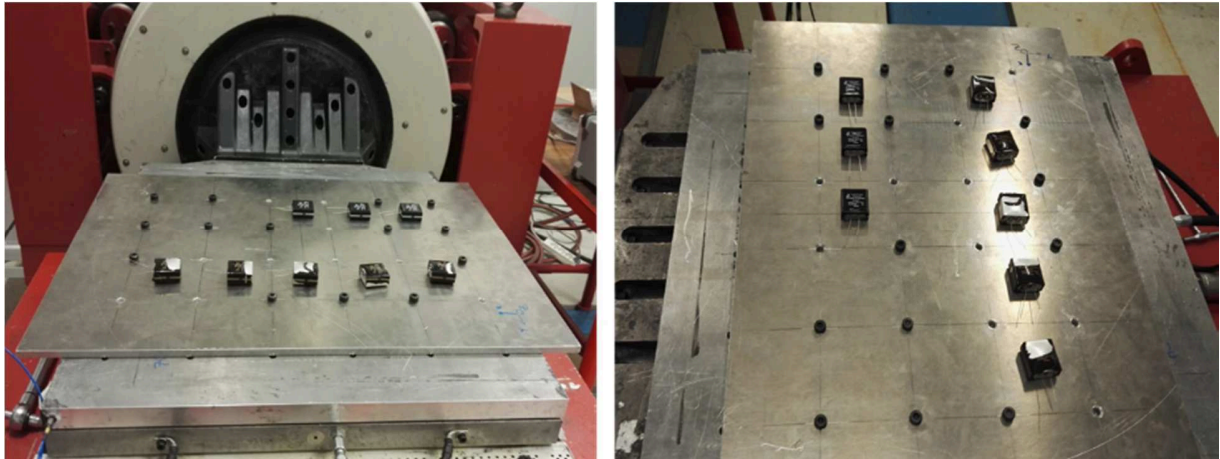


Figure 4-26 : Essai de vibration selon l'axe Y

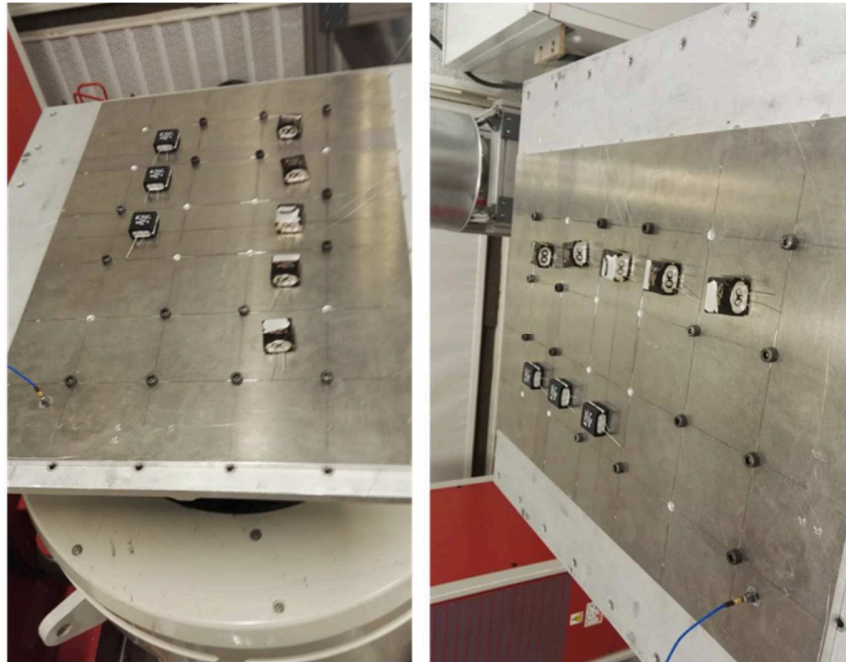


Figure 4-27 : Essai de vibration selon l'axe Z

Les condensateurs sont caractérisés au début et à la fin de l'essai afin d'évaluer l'impact des vibrations sur leurs caractéristiques, cf. Figures 4-28 et 4-29.

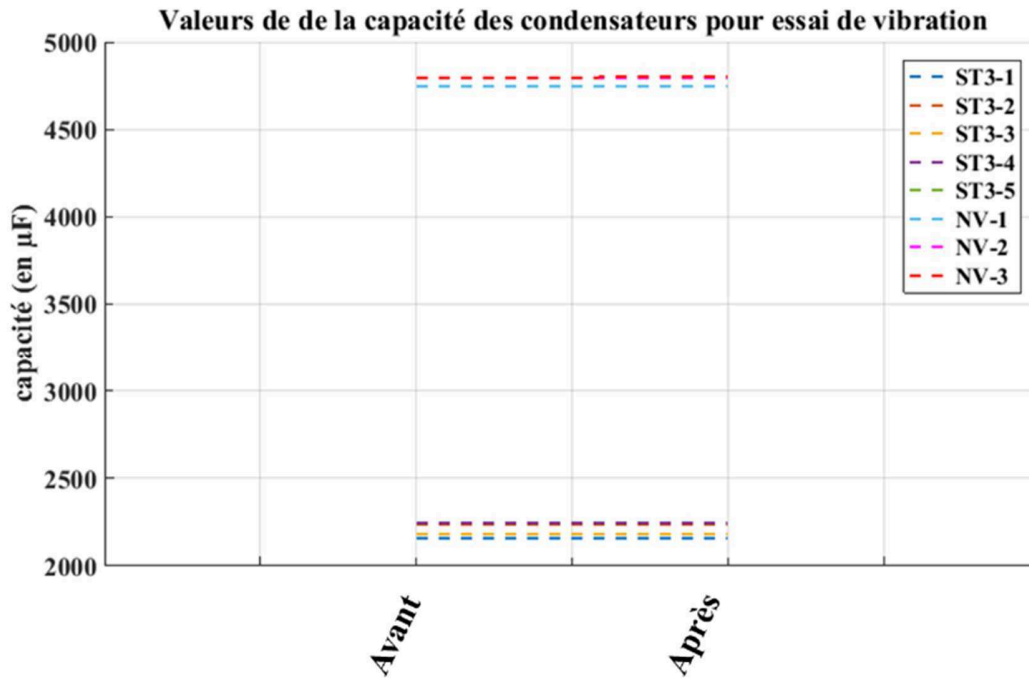


Figure 4-28 : Valeur de la capacité avant et à la fin de l'essai de vibration

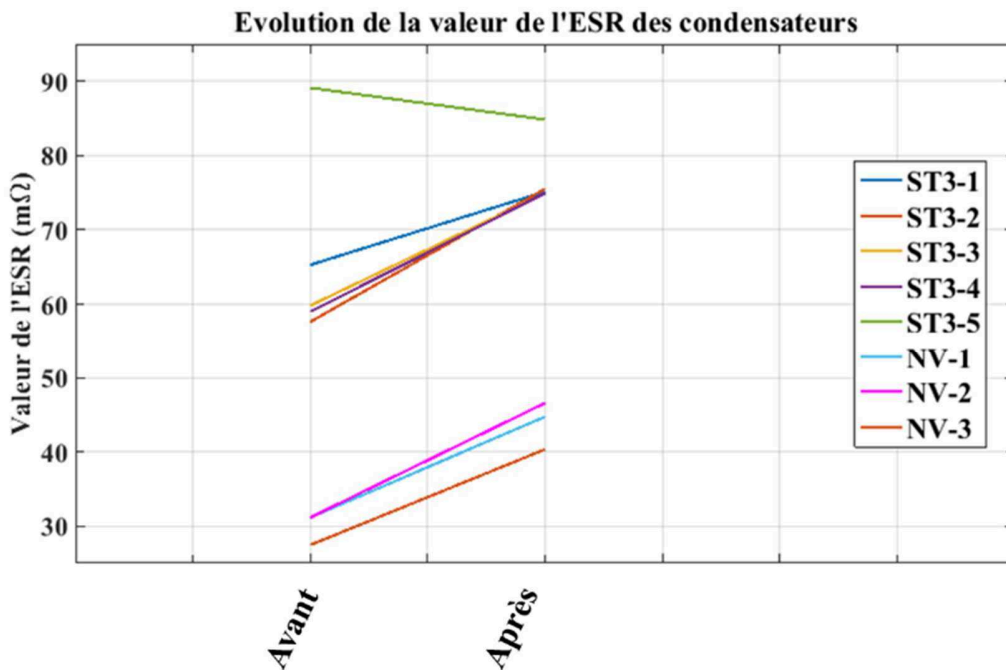


Figure 4-29 : Valeur de l'ESR avant et après l'essai de vibration

Les caractéristiques sont données à la fin des essais selon les trois axes parce qu'à la fin de chaque test par axe, il n'y a pas une variation remarquable de la valeur des caractéristiques. En résumé, la valeur de la capacité reste inchangée, tandis que la valeur de l'ESR a connu une légère variation dans le cas des condensateurs neufs et dans le cas des condensateurs défectueux. Ceci pourrait être dû au stress mécanique appliqué sur le connecteur.

4.5 CONCLUSION

Les essais sur la carte sont primordiaux pour permettre de mettre les composants dans leurs conditions opérationnelles à savoir thermique et électrique, ceci dans le but d'étudier la fiabilité du composant mais également celle de tout le système. Cependant, on peut noter que les essais sur le composant seul étaient aussi représentatifs que les essais sur carte. D'un autre côté, l'essai de vibrations sur les composants est aussi représentatif pour déterminer l'influence de ce stress sur les caractéristiques du condensateur. Ce dernier, pourrait nous renseigner par exemple sur l'effet d'un décollement de l'enroulement du papier du condensateur de son boîtier. Ce phénomène pouvant affaiblir mécaniquement le composant.

CONCLUSION GENERALE

Face à l'évolution de la fiabilité des systèmes électroniques de puissance, les fournisseurs des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide améliorent continument la qualité de leurs produits, en cherchant une conception idéale de boîtier supportant la pression interne et aussi une composition chimique de l'électrolyte qui ne se détériore pas et ne détériore pas les électrodes du condensateur.

Dans un premier temps, les essais réalisés dans cette thèse ont permis de caractériser précisément les paramètres les plus significatifs (capacité, épaisseur et masse) dont l'évolution traduit la dégradation sous l'influence des contraintes thermiques et thermoélectriques. Les résultats ainsi obtenus constituent une base nécessaire à une étude ultérieure de fiabilité plus approfondie. Il convient de noter que les essais ont porté sur une population de composants de taille réduite, ce qui justifie une analyse et une interprétation des résultats tenant compte de la variabilité technologique des composants.

Cette étape est nécessaire pour entamer toute étude de fiabilité sur composant. Les contraintes d'essais de vieillissement appliquées sur une population limitée de condensateurs avaient pour but de représenter et de se rapprocher au mieux du profil opérationnel de l'application de puissance au sein de laquelle ces condensateurs sont utilisés. Des courbes d'évolution des dégradations correspondant aux données expérimentales ont été obtenues. Au cours d'une durée cumulée de 28000 heures d'essais combinés de toutes les contraintes thermique et électrique. Il est important de rappeler l'importance de cette variété d'essais afin d'étudier les effets séparés de chaque contrainte. Nous avons remarqué également que pour certains essais, les dégradations étaient assez lentes. Il aurait été plus favorable de planifier des essais dis aggravés.

Dans le troisième chapitre, la composition et l'historique du processus de fabrication a pu être dévoilée grâce à l'analyse physicochimique des électrodes et de l'électrolyte. Ces analyses ont été menées dans les locaux du LNE (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais) un des partenaires du projet FIRST-MFP.

L'exploitation des différents brevets en relation avec la technologie des condensateurs d'aluminium à électrolyte liquide a pu faire sortir un composant qui porte la mention « Long life ». Pour une technologie de ce type qui est connue par son taux de défaillance élevé, l'application de

la haute température réduit d'une façon remarquable sa valeur de la capacité. Sauf que pour le condensateur étudié la valeur de la capacité reste inchangée, il n'y a qu'une déformation au niveau du boîtier qui est enregistrée. Dans le système étudié, ce phénomène est critique à cause de la forme compacte du châssis du système. Par conséquent, des essais sur système ou plus précisément des essais sur condensateurs montés sur systèmes sont effectués à l'IRSEEM afin d'évaluer l'impact des conditions réelles d'utilisation sur les composants. Les essais ont démontré que bien que les conditions thermiques au niveau système soient plus sévères puisqu'un gradient de température se rajoute à cause de la dissipation de la chaleur au niveau des composants adjacents, les condensateurs restent toujours fonctionnels et ils n'atteignent pas leur valeur critique soit définie par les paramètres électriques soit définie par les contraintes mécaniques (épaisseur du boîtier). Les essais de vibrations sont aussi représentatifs car ils représentent la contrainte mécanique appliquée lors du fonctionnement RADAR. De la même façon, ce facteur n'a pas montré d'influence significative sur les paramètres des condensateurs neufs et défailants.

Ce travail de thèse a permis de mettre en place une méthodologie complète allant de l'expérimental à la modélisation en passant par les caractérisations microscopiques et physicochimiques. Il démontre clairement la complexité des analyses et la nécessité d'expertises à tous les niveaux pour appréhender les mécanismes complexes souvent mis en jeu et/ou observés. Il démontre tous l'intérêt d'un travail collaboratif autour de ces sujets portant sur la fiabilité des nouvelles technologies de composants électroniques.

Malgré les avancées réalisées sur les essais, les interprétations et les modélisations, il reste des travaux de recherche et des perspectives intéressantes à inscrire dans la poursuite logique de ce travail. Nous pouvons en résumer ci-dessous celles qui nous semblent les plus importantes :

- ✓ Mener des essais de même type que ceux réalisés dans le chapitre 2 mais pour le cas de la température maximale en utilisant la tension appliquée au niveau système mais cette fois-ci pour une longue durée (jusqu'à atteindre une des valeurs critiques). Ceci est dans le but de valider les modèles de dégradation que nous avons proposé.
- ✓ Réaliser des essais supplémentaires au niveau système qui permettent d'arriver à une défaillance sur un des condensateurs utilisé sur la carte. Les condensateurs

doivent être caractérisés avant et après essais afin d'extraire leur lois de vieillissement.

REFERENCES

- [1] Military Handbook 217 F, "Reliability prediction of electronic equipment," Feb. 28, 1995.
- [2] K. Harada, A. Katsuki, M. Fujiwara, "Use of ESR for Deterioration Diagnosis of Electrolytic Capacitor" Power Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 8 Issue: 4, Oct. 1993, pp. 355–361.
- [3] A. Lahyani, P. Venet, G. Grellet, and P.J. Vivierge, "Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switchmode power supply," IEEE Transactions on Power Electronics, No. 6, pp. 1197 - 1207, 1998.
- [4] A. M. Imam, T. G. Habetler, R. G. Harley, and D.M. Divan, "Condition monitoring of electrolytic capacitor in power electronic circuits using adaptive filter modeling," Proc. of IEEE PESC, pp. 601–607, Sept. 2005.
- [5] C. Lachkar, M. Kadi, J-P Kouadio, J-F Goupy, Ph. Eudeline, S. Boileau et T. Ait-Younes, Chapitre 3, " Étude de la fiabilité des condensateurs aluminium à électrolyte liquide ayant un format cubique ", Livre " Fiabilité des systèmes mécatroniques de forte puissance 2: Application automobile et aéronautique enjeux, essais et analyses ", Volume 2, pp. 139-167, Février 2018.
- [6] P. Venet, "Surveillance d'alimentation à découpage. Application à la maintenance prédictive", Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon1, Décembre 1993.
- [7] F. Perisse, "Etude et analyse des modes de défaillances des condensateurs électrolytiques a l'aluminium et des thyristors, appliquées au système de protection du LHC (Large Hadron Collider)", Université Claude Bernard - Lyon I, 2003.
- [8] Technical Notes, Nichicon Corporation, Kyoto, Japan, pp. 1–28. CAT.8101D.
- [9] Dubilier, Cornell. "Aluminum electrolytic capacitor application guide." Accessed 6th Sept (2011).
- [10] Gasperi, M. L., Gollhardt, N., Sladky, R., "A Model for Equivalent Series Resistance in Aluminum Electrolytic Capacitors," CARTS 97, Components Technology Institute, Inc., Huntsville, AL, March, 1997, p71-75.
- [11] IEC 60384-4:2007, Fixed capacitors for use in electronic equipment - Part 4: Sectional specification - Aluminium electrolytic capacitors with solid and non-solid electrolyte.
- [12] Albertsen, "Electrolytic capacitor lifetime estimation," Jianghai Capacitor Technical Note. [en ligne]. Disponible sur : http://jianghai-america.com/uploads/technology/JIANGHAI_Elcap_Lifetime_-_Estimation_AAL.Pdf
- [13] Gasperi, Michael L. "Life prediction model for aluminum electrolytic capacitors." Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS'96. Conference Record of the 1996 IEEE. Vol. 3. IEEE, 1996.
- [14] S. G. Parler, "Deriving life multipliers for electrolytic capacitors," IEEE Power Electron. Soc. Newsl., vol. 16, no. 1, pp. 11–12, Feb. 2004.
- [15] Rubycon Corporation, "Technical Notes for Electrolytic Capacitor" www.rubycon.com.

- [16] Wang, Huai, and Frede Blaabjerg. "Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters - an overview." *IEEE Transactions on Industry Applications* 50.5 (2014): 3569-3578.
- [17] R. Cousseau, " Contribution à la modélisation et à l'étude du vieillissement des condensateurs électrolytiques aluminium dédiés à des applications à hautes températures", thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 16 Novembre 2015.
- [18] "Precautions and guidelines of aluminum electrolytic capacitor (non-conductive polymer)." Disponible sur : www.jamicon.com.tw
- [19] Elna, Ltd, "Reliability of Aluminum Electrolytic Capacitors", <http://www.elna.co.jp/en/>.
- [20] United Chemi-Con, "Understanding Aluminum Electrolytic Capacitors", <http://www.chemi-con.com>.
- [21] Hitachi AIC, "Aluminum Electrolytic Capacitors", Technical Report.
- [22] Yang, G, "Reliability Definition, Metrics, and Product Life Distributions", Chapitre 2, Livre "In Life Cycle Reliability Engineering", 23 March 2007, pp. 9-32.
- [23] M. G. Pecht, "Sensor systems for PHM", Chapitre 2, Livre "Prognostics and Health Management of Electronics", John Wiley & Sons Edition, 11 sept. 2008, pp. 25-46.
- [24] Norme NF EN 50126 Applications ferroviaires - Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS) (janvier 2000).
- [25] Lee, D-C., et al. "Online capacitance estimation of DC-link electrolytic capacitors for three-phase AC/DC/AC PWM converters using recursive least squares method. " *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 152.6 (2005) : 1503-1508.
- [26] M. Kim, K. Lee, J. Yoon, S. B. Lee and J. Yoo, "Condition Monitoring of DC Link Electrolytic Capacitors in Adjustable Speed Drives," 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, New Orleans, LA, 2007, pp. 237-243.
- [27] D. -. Lee, K. -. Lee, J. -. Seok and J. -. Choi, "Online capacitance estimation of DC-link electrolytic capacitors for three-phase AC/DC/AC PWM converters using recursive least squares method," in *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 152, no. 6, pp. 1503-1508, 4 Nov. 2005.
- [28] N. Agarwal, A. Arya, M. W. Ahmad and S. Anand, "Lifetime Monitoring of Electrolytic Capacitor to Maximize Earnings From Grid-Feeding PV System," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 11, pp. 7049-7058, Nov. 2016.
- [29] F. G. Hayatee, "Heat dissipation and ripple current rating in electrolytic capacitors", *Electrocomp. Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 109-114, 1975.
- [30] M. L. Gasperi, "Life prediction modeling of bus capacitors in AC variable-frequency drives," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 6, pp. 1430-1435, Nov.-Dec. 2005.
- [31] A. Shrivastava, M. H. Azarian, C. Morillo, B. Sood and M. Pecht, "Detection and Reliability Risks of Counterfeit Electrolytic Capacitors," in *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 63, no. 2, pp. 468-479, June 2014.

- [32] Weast, Robert C., Handbook of Chemistry and Physics, CRC Ratio Ripple Current to Rated Press, Cleveland, OH, 1970, p. D-146.
- [33] A. M. Imam, D. M. Divan, R. G. Harley and T. G. Habetler, "Real-Time Condition Monitoring of the Electrolytic Capacitors for Power Electronics Applications," *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, CA, USA, 2007, pp. 1057-1061.
- [34] O. Ondel, E. Boutleux and P. Venet, "A decision system for electrolytic capacitors diagnosis," *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, Aachen, Germany, 2004, pp. 4360-4364 Vol.6.
- [35] MK. Abdennadher, "Etude et élaboration d'un système de surveillance et de maintenance prédictive pour les condensateurs et les batteries utilisés dans les Alimentations Sans Interruptions (ASI)", Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon1, Juin 2010.
- [36] K. Abdennadher, P. Venet, G. Rojat, J. Retif and C. Rosset, "A Real-Time Predictive-Maintenance System of Aluminum Electrolytic Capacitors Used in Uninterrupted Power Supplies," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1644-1652, July-Aug. 2010.
- [37] J. Ertl, K. Edelmoser, F. Zach, JW. Kolar, "A novel method for on-line monitoring and managing of electrolytic capacitors of DC voltage link PWM converters", na, 2006.
- [38] D. Zhou, H. Wang, F. Blaabjerg, S. K. Kær and D. Blom-Hansen, "Degradation effect on reliability evaluation of aluminum electrolytic capacitor in backup power converter," *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC 2017 - ECCE Asia)*, Kaohsiung, 2017, pp. 202-207.
- [39] K. Ma, H. Wang, and F. Blaabjerg, "New approaches to reliability assessment: using physics-of-failure for prediction and design in power electronics systems," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 3, no. 4, pp. 28-41, Dec. 2016.
- [40] H. Wang, H. Chung, F. Blaabjerg, and M. Pecht, "Reliability engineering in power electronic converter systems," in *Reliability of Power Electronic Converter Systems*, IET, 2015, ch. 1.
- [41] K. Ma, D. Zhou, and F. Blaabjerg, "Evaluation and design tools for the reliability of wind power converter system," *J. Power Electron.*, vol. 15, no. 5, pp. 1149-1157, 2015.
- [42] Reliasoft Corporation, "Life data analysis reference," [Online]. Available: www.reliasoft.com, 2016.
- [43] A. Albertsen, "Electrolytic capacitor lifetime estimation – key parameters are necessary to predict lifetime," *Bodo's power systems*, Apr. 2012.
- [44] R. Cousseau, N. Patin, C. Forgez, E. Monmasson, L. Idkhajine, Improved electrical model of aluminum electrolytic capacitor with anomalous diffusion for health monitoring, *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 131, January 2017, Pages 268-282.
- [45] Naikan, V. N. A., and Arvind Rathore. "Accelerated temperature and voltage life tests on aluminium electrolytic capacitors: A DOE approach." *International Journal of Quality & Reliability Management* 33.1 (2016): 120-139.

- [46] S. G. Parler, "Thermal modeling of aluminum electrolytic capacitors," Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, Phoenix, AZ, 1999, pp. 2418-2429 vol.4.
- [47] A. R. Morley and D. S. Campbell, "Electrolytic capacitors: their fabrication and the interpretation of their operational behaviour," in *Radio and Electronic Engineer*, vol. 43, no. 7, pp. 421-429, July 1973.
- [48] Tsubaki, Y., Matsuura, H., Morokuma, M., Minato, K., & Nitta, Y. Aluminum electrolytic capacitor. U.S. Patent No 6,307,732, 23 oct. 2001.
- [49] Chang, J. K., Liao, C. M., Chen, C. H., & Tsai, W. T. (2004). Material characteristics and capacitive properties of aluminum anodic oxides formed in various electrolytes. *Journal of materials research*, 19(11), 3364-3373.
- [50] Honeycutt III, L. Cleaning and treatment of etched cathode aluminum capacitor foil. U.S. Patent No 4,432,846, 21 févr. 1984.
- [51] Gomez-Aleixandre, C., Albella, J. M., & Martínez-Duart, J. M. (1984). Gas evolution in aluminum electrolytic capacitors. *J. Electrochem. Soc.:(United States)*, 131(3).
- [52] Gómez-Aleixandre, C., Albella, J. M., & Martínez-Duart, J. M. (1986). Pressure build-up in aluminium electrolytic capacitors under stressed voltage conditions. *Journal of applied electrochemistry*, 16(1), 109-115.
- [53] Mori, S., Ue, M., & Ida, K. Electrolyte for aluminum electrolytic capacitor. U.S. Patent No 4,774,011, 27 sept. 1988.
- [54] Thambi, J., et al. "High cycle fatigue behaviour and generalized fatigue model development of lead-free solder alloy based on local stress approach." *Microelectronics Reliability* 66 (2016) : 98-105.