



Analyse de vieillissement, estimation de la durée de vie et méthode de surveillance de l'état de santé des condensateurs électrolytiques

Antoine El Hayek

► To cite this version:

Antoine El Hayek. Analyse de vieillissement, estimation de la durée de vie et méthode de surveillance de l'état de santé des condensateurs électrolytiques. Energie électrique. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSE1037 . tel-02524999

HAL Id: tel-02524999

<https://theses.hal.science/tel-02524999>

Submitted on 30 Mar 2020

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

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



N°d'ordre NNT : 2020LYSE1037

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale
Électronique, Électrotechnique, Automatique

Spécialité de doctorat :
Génie Électrique

Soutenue publiquement le 21 février 2020, par :
Antoine EL HAYEK

Analyse de vieillissement, estimation de la durée de vie et méthode de surveillance de l'état de santé des condensateurs électrolytiques

Devant le jury composé de :

M. Patin, Nicolas - Maître de Conférences, HDR - Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
Mme Pietrzak-David, Maria - Professeur des Universités - Institut National Polytechnique de Toulouse	Rapporteur
Mme Duchamp, Geneviève - Professeur des Universités - Université de Bordeaux	Examinatrice
M. Perisse, Frédéric - Maître de Conférences- Université Clermont Auvergne	Examineur
M. Venet, Pascal - Professeur des Universités - Université Claude Bernard Lyon 1	Directeur de thèse
M. Clerc, Guy - Professeur des Universités - Université Claude Bernard Lyon 1	Co-directeur de thèse
Mme Mitova, Radoslava - Dr. Ingénieur de recherche - Schneider Electric	Co-encadrante industrielle
M. Sari, Ali - Professeur des Universités - Université Claude Bernard Lyon 1	Co-encadrant
M. Wang, Miao-xin - Dr. Ingénieur de Recherche - Schneider Electric	Invité - Co-encadrant industriel

*À mon père Walid,
ma mère Tania
et mes sœurs
Hala et Rana*

Citation pour la vie

« Le lâche se fait lâche, le héros se fait héros »

Jean-Paul SARTRE

Citation pour le manuscrit

« Une heure assis à côté d'une jolie femme semble durer une minute. Une minute assis sur four brûlant semble durer une heure. C'est ça la relativité. »

Albert EINSTEIN

Citation pour l'invention

« The mind is sharper and keener in seclusion and uninterrupted solitude. No big laboratory is needed in which to think. Originality thrives in seclusion free of outside influences beating upon us to cripple the creative mind. Be alone, that is the secret of invention; be alone, that is when ideas are born. That is why many of the earthly miracles have had their genesis in humble surroundings. »

Nikola TESLA

Avant-propos

Cette thèse est le fruit d'un long travail mené au cours de trois années, durant lesquelles j'ai côtoyé le monde professionnel au sein de l'équipe « Power Conversion » de Schneider Electric et au laboratoire Ampère sur le site de l'Université Lyon 1. Ce travail n'aurait pas été possible sans les efforts des personnes qui m'ont entourées toute cette période et à qui j'adresse mes profonds remerciements.

En tête, je remercie vivement mon directeur de thèse Pascal VENET pour son accompagnement, ses orientations et ses conseils qui m'ont beaucoup aidé à mener ces travaux. Il a été ma première référence à laquelle je retournais en cas de souci. Il a su me montrer sa disponibilité et il a été à mon écoute avec patience et gentillesse. J'ai appris de lui la rigueur et un raisonnement scientifique solide.

Je remercie beaucoup mon directeur industriel Miao-Xin WANG pour son soutien et sa forte présence lors de la période de thèse. Je le remercie pour ses propositions efficaces, ses remarques pertinentes ainsi que ses interventions directes en cas de besoin. Il était une source de confiance et de motivation pour moi. J'ai appris de lui comment faire face aux difficultés, en les identifiant et en les contournant au mieux.

Je remercie mon co-directeur de thèse Guy CLERC pour sa gentillesse et son intellect très enrichissant. Guy a su me surprendre par ses idées originales et sa vision experte de mon sujet de thèse.

Je remercie spécialement mon encadrante industrielle Radoslava MITOVA pour son suivi perpétuel et sa forte contribution à mettre à ma disposition toutes les ressources nécessaires en matériel et documentations.

Je remercie aussi mon encadrant Ali SARI pour ses efforts pour pouvoir m'aider dans ma thèse. Malgré ses tâches administratives multiples, j'ai beaucoup apprécié son calme et son très bon relationnel.

Je tiens à remercier Alain DENTELLA, Pierre-Yves BOYER et Lionel DORBAIS pour leur forte participation et leur savoir-faire concernant la partie prototypage de mes travaux et leur accompagnement très enrichissant sur le plan professionnel.

Je suis très reconnaissant à l'avocat de brevet, Thomas MARCUS, qui m'a accompagné dans la rédaction du Brevet Européen EP19305671.0 et à Vincent RAVIER qui s'est chargé de la démarche administrative auprès de l'Office Européen des Brevets (EPO).

Je souhaite aussi indiquer mon respect à toutes les personnes qui ont participé par leur savoir-faire dans l'avancement de ma thèse ; je remercie profondément Pascal BEVILACQUA (INSA Lyon), Michael HARTMANN (Schneider Electric, Autriche) et Mustapha RAHMANI (Schneider Electric, Grenoble).

Je remercie Mohamed BEN MARZOUK mon plus proche ami du laboratoire, avec qui j'ai passé des moments inoubliables. J'ai partagé avec lui les périodes dures et les périodes de joie. Nous avons mangé, discuté et rigolé ensemble pendant trois ans. Avec lui, nous avons dissocié amitié et « business » ; tout service est facturé par l'entreprise de dépannage MBM !

Durant les trois années de thèse, j'ai passé des bons moments au sein de l'entreprise et du laboratoire, où j'ai construit des bonnes relations avec mes collègues de travail qui représentent aujourd'hui une deuxième famille pour moi. A ce titre, je tiens à remercier tous les permanents du laboratoire Ampère et son directeur adjoint. Je remercie également Kepa O., Nagham G., Alaa H., Alfie P., Sofia B., Alexandre E., Seima S., Atef L., Etienne F., Hassan C., Leticia B., Rania S., Hussein E.,

William W., Edgar T., François T., Aurélien C., Maxime S., Malorie H. et Santasri K. pour les moments agréables passés en leur compagnie.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à Monsieur Nicolas PATIN, Maître de Conférences HDR à l'Université de Technologie de Compiègne et Madame Maria PIETRZAK-DAVID, Professeur à Institut National Polytechnique de Toulouse, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en étant rapporteurs de ce mémoire et membres de mon jury de thèse.

Que Madame Geneviève DUCHAMP, Professeur à l'Université de Bordeaux et Monsieur Frédéric PERISSE, Maître de Conférences à l'Université Clermont Auvergne, soient assurés de ma sincère reconnaissance pour avoir été membre de mon jury

Je salue et remercie tous les membres de ma famille : mon père, ma mère et mes deux sœurs. Leur soutien psychique en permanence malgré la distance qui nous sépare m'a motivé et donné plus de force pour pouvoir surmonter toute sorte de difficulté.

Résumé

Titre : Analyse du vieillissement, estimation de la durée de vie et méthode de surveillance de l'état de santé des condensateurs électrolytiques.

Mots clés : Condensateurs électrolytiques, Vieillissement, Durée de vie, État de santé, Diagnostic, Pronostic, Maintenance préventive conditionnelle, Maintenance prédictive

Résumé : Avec l'émergence de nouvelles technologies, nous assistons au développement de techniques permettant d'améliorer la sûreté de fonctionnement et notamment la maintenabilité des convertisseurs statiques d'énergie et de leurs composants.

Dans ces systèmes de conversion, les condensateurs électrolytiques, assurant un réseau DC stable, représentent un élément important de la chaîne de conversion de l'énergie électrique AC/DC et/ou DC/AC. En fonctionnement, ils sont sujets à des contraintes électriques et environnementales (température ambiante, ondulation de courant, tension appliquée, humidité, vibrations, etc.). Ces condensateurs subissent des réactions d'oxydo-réductions, qui consomment et évaporent de l'électrolyte. La durée de vie du condensateur en est alors affectée. Dès lors, il est intéressant d'estimer l'état de santé de ces composants afin de pouvoir programmer des opérations de maintenance. Il est donc utile d'élaborer des outils permettant d'appliquer une maintenance préventive conditionnelle.

C'est dans ce cadre que nous avons effectué ces travaux dont l'objectif est de proposer un système de surveillance de l'état de santé des condensateurs électrolytiques.

Nous avons donc développé des

modèles d'évolution de leurs indicateurs de vieillissement qui sont les variations de la résistance équivalente série ESR et de la capacité équivalente C. L'algorithme de prédiction se base sur l'évolution de ces indicateurs pour estimer l'état de santé et la durée de vie restante du module de condensateurs. Le système de surveillance en temps réel développé ne comporte pas de capteurs supplémentaires à ceux déjà existants dans les convertisseurs d'énergie considérés et ne nécessite pas d'essais de vieillissement accéléré préalables.

Dans ce manuscrit, nous détaillons d'abord la procédure expérimentale de vieillissement accéléré, les différentes étapes de la caractérisation, le processus de vieillissement et les résultats associés. Nous proposons une méthode simple et efficace pour identifier les indicateurs de vieillissement ESR et C en temps réel. L'algorithme proposé est basé sur une mise à l'échelle temporelle et sur un référentiel de contraintes en température et en tension. Par la suite, les résultats de la simulation du système de surveillance et de la prévision de l'état de santé retenu sont présentés. Des essais expérimentaux ont été menés sur des condensateurs intégrés au sein d'un variateur de vitesse industriel de puissance 15 kW. Les algorithmes mis en œuvre et leurs contraintes d'implémentation respectives, pour une application temps réel, sont détaillés.

Abstract

Title: Aging analysis, lifetime estimation and health monitoring method of electrolytic capacitors.

Keywords: Electrolytic capacitors, Aging, Lifetime estimation, State of Health, Diagnosis, Prognosis, Conditional monitoring, Predictive maintenance

Summary: With the emergence of new technologies, we are witnessing the development of techniques to improve dependability and in particular the maintainability of static energy converters and their components.

In these conversion systems, the electrolytic capacitors, ensuring a stable DC network, represent an important element in the AC / DC and / or DC / AC electrical energy conversion chain. In operation, they are subject to electrical and environmental constraints (ambient temperature, current ripple, applied voltage, humidity, vibrations, etc.). These capacitors undergo redox reactions, which consume and evaporate electrolyte. The lifetime of the capacitor is thus affected. Therefore, it is interesting to estimate the state of health of these components in order to be able to schedule maintenance operations. It is therefore useful to develop tools for applying conditional monitoring.

In the context of this work, the objective is to propose a system for monitoring the state of health of the electrolytic capacitors.

We have therefore developed evolution models of their aging indicators which are the variations of the equivalent series resistance ESR and equivalent capacity

C. The prediction algorithm is based on the evolution of these indicators to estimate the state remaining life of the capacitor module. The real-time monitoring system developed does not include additional sensors to those already existing in the energy converters considered and does not require prior accelerated aging tests.

In this manuscript, we first detail the experimental procedure for accelerated aging, the different stages of characterization, the aging process and the associated results. We propose a simple and effective method to identify ESR and C aging indicators in real time. The proposed algorithm is based on time scaling and on a reference frame of temperature and voltage constraints. Subsequently, the results of the simulation of the surveillance system and the forecast of the selected state of health are presented. Experimental tests have been carried out on capacitors integrated into an industrial speed controller with a power of 15 kW. The algorithms implemented and their respective implementation constraints, for a real-time application, are detailed.

Sommaire

SOMMAIRE.....	11
LISTE DES FIGURES.....	16
LISTE DES TABLEAUX.....	21
GLOSSAIRE.....	23
INTRODUCTION	27
 1. LES CONDENSATEURS ELECTROLYTIQUES AU CŒUR DES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE 30	
1.1. Exigence de conception et challenges de fiabilité dans les convertisseurs de puissance 30	
1.1.1. Exigences de conception	30
1.1.2. Challenges de fiabilité	30
1.1.3. De la fiabilité au choix du type de maintenance	31
1.1.4. Analyse de la physique de défaillance.....	33
1.1.5. Impact des condensateurs sur la durée de vie des convertisseurs.....	34
1.2. Les condensateurs	35
1.2.1. Généralités	35
1.2.2. Choix des condensateurs.....	36
1.2.3. Les condensateurs électrolytiques à l'aluminium	36
1.2.3.1. Principe et structure	36
1.2.3.2. Processus de fabrication d'un condensateur électrolytique à l'aluminium ...	39
1.2.3.3. Modèles équivalents et caractéristiques	41
1.2.3.4. Mécanismes, modes et indicateurs de défaillance.....	43
1.2.3.5. Indicateurs de défaillance et de vieillissement.....	46
1.3. Méthodes existantes de pronostic des défaillances des condensateurs électrolytiques	46
1.3.1. Présentation de quelques méthodes existantes.....	46
1.3.2. Inconvénient majeur de ces méthodes.....	47
1.3.3. Utilisation actuelle par les industriels de la maintenance préventive systématique 49	
1.4. Présentation du système de surveillance des condensateurs électrolytiques	49

1.4.1.	Principe	49
1.4.2.	Cahier des charges du système de surveillance des condensateurs électrolytiques	50
2.	DUREE DE VIE DES CONDENSATEURS ELECTROLYTIQUES ET ESSAIS DE VIEILLISSEMENT	
ACCELERE	52	
2.1.	Moyens d'évaluation de la durée de vie	52
2.1.1.	Essais de vieillissement accéléré	52
2.1.2.	Évaluation de la durée de vie	53
2.2.	Loi de vieillissement des condensateurs électrolytiques.....	55
2.2.1.	Modèle de durée de vie proposé par les fabricants.....	55
2.2.2.	Influence de la température sur le modèle de durée de vie.....	56
2.2.3.	Influence de l'ondulation de courant sur le modèle de durée de vie	57
2.2.4.	Influence de la tension sur le modèle de durée de vie	60
2.2.5.	Modèle le plus exact d'estimation de la durée de vie des condensateurs	
électrolytiques	63	
2.3.	Présentation des essais expérimentaux de vieillissement.....	65
2.3.1.	Présentation des condensateurs en essai	65
2.3.2.	Caractérisations systématiques des condensateurs en essai	66
2.3.2.1.	Mesures en fréquence	68
2.3.2.2.	Mesures en continu	69
2.4.	Effets de la température sur les valeurs de l'ESR et de C lors d'une caractérisation .	70
2.5.	Reconditionnement des condensateurs et effet de la mise sous tension des	
condensateurs stockés	72	
2.6.	Présentation des essais de vieillissement	73
2.6.1.	Vieillissements standards par « floating ».....	73
2.6.2.	Vieillissements par ondulation de courant	73
2.6.3.	Les différents essais de vieillissement réalisés.....	74
3.	ANALYSE DES DEFAILLANCES ET DU VIEILLISSEMENT DES CONDENSATEURS.....	76
3.1.	Introduction	76
3.2.	Défaillances par dérive	76
3.2.1.	Variation de l'ESR et de C	77
3.2.1.1.	Évaluation des erreurs de mesure	77
3.2.1.2.	Variation de l'ESR	81
3.2.1.3.	Modèle de vieillissement de l'ESR	83
3.2.1.4.	Variation de la capacité C.....	85
3.2.1.5.	Modèle de vieillissement de la capacité C.....	87

3.2.2.	Variation du courant de fuite	88
3.2.3.	Variation de la masse	88
3.2.4.	Identification des paramètres de la loi de vieillissement.....	89
3.2.4.1.	Effets liés à l'ondulation de courant	90
3.2.4.2.	Identification de l'énergie d'activation et de l'exposant n	90
3.3.	Défaillances catalectiques.....	101
3.3.1.	Condensateurs défaillants et analyse post mortem	101
3.3.2.	Inspections visuelles et observations.....	102
3.3.3.	Types de défaillances observés	110
3.3.4.	Cause des défaillances.....	110
3.3.4.1.	Défauts dus à la connectique - Corrosion de l'anode	110
3.3.4.2.	Défauts dus à la fuite d'électrolyte	110
3.3.4.3.	Défauts dus au diélectrique	111
3.3.4.4.	Défauts dus au court-circuit.....	111
3.3.5.	Une fabrication mal maîtrisée.....	111
3.4.	Conclusion des analyses.....	112
4.	IDENTIFICATION DES INDICATEURS DE VIEILLISSEMENT EN LIGNE	113
4.1.	Cas d'étude	113
4.1.1.	Variateur de vitesse.....	113
4.1.1.1.	Architecture	115
4.1.1.2.	Capteurs présents et configuration du circuit	116
4.2.	Calcul du courant absorbé par les condensateurs	117
4.2.1.	Configuration du circuit.....	117
4.2.2.	Courant sortant du redresseur à pont diode	117
4.2.3.	Courant entrant dans l'onduleur triphasé.....	119
4.2.4.	Courant passant dans les condensateurs.....	120
4.3.	Extraction des indicateurs de vieillissement	121
4.3.1.	Rappel du comportement du condensateur à basse fréquence.....	121
4.3.2.	Méthode 1 : Méthode simple et précise d'extraction des indicateurs de vieillissement (ESR et C).....	121
4.3.2.1.	Description	121
4.3.2.2.	Difficulté liée à la fréquence de découpage du prototype	124
4.3.2.3.	Solution simple et générique pour surmonter cette difficulté : Méthode par système d'équations	124
4.3.3.	Méthode 2 : Application de l'algorithme des moindres carrés récursifs pour extraire les indicateurs de vieillissement ESR et C	126
4.3.3.1.	Description	126
4.3.3.2.	Modèle estimé échantillonné	127
4.3.3.3.	Algorithme d'adaptation paramétrique.....	129

4.4. Conception du prototype et résultats expérimentaux	130
4.4.1. Description de la maquette expérimentale	130
4.4.2. Carte prototype	131
4.4.2.1. Présentation.....	131
4.4.2.2. Carte d'interface et de conditionnement	131
4.4.2.3. Carte d'acquisition, de calcul et de transmission	132
4.4.3. Résultats expérimentaux.....	135
4.4.3.1. Comparaison entre la méthode simple et l'algorithme des moindres carrés récursifs pour l'identification des indicateurs de vieillissement – Simulation	135
4.4.3.2. Intérêt des filtres anti-repliement sur les signaux de commande des IGBT issus de la MLI	138
4.4.3.3. Comparaison entre la mesure et l'estimation du courant parcourant les condensateurs	140
4.4.3.4. Identification de ESR et de C avec le prototype expérimental	144
 5. SYSTEME DE PREDICTION EN TEMPS REEL DE LA DUREE DE VIE DES CONDENSATEURS ELECTROLYTIQUES ET SANS ESSAIS PREALABLES DE VIEILLISSEMENT	 146
5.1. Prérequis.....	146
5.2. Principe de fonctionnement du système de prédiction de la durée de vie restante (RUL) des condensateurs	149
5.2.1. Description	149
5.2.2. Description globale du système de surveillance et d'estimation de la durée de vie restante des condensateurs	149
5.2.2.1. Les entrées du système de surveillance.....	150
5.2.2.2. Extraction des données utiles à partir des mesures	150
5.2.2.3. Identification des indicateurs de vieillissement ESR et C.....	151
5.2.2.4. Ajustement vers les conditions extrêmes.....	151
5.2.2.5. Modélisation sous les conditions extrêmes.....	152
5.2.2.6. Réajustement vers les conditions actuelles de fonctionnement et affichage du RUL	153
5.2.2.7. Pré-calculs nécessaires si la mesure du courant dans les condensateurs n'est pas disponible	154
5.2.2.8. Interactions entre les différentes étapes.....	155
5.3. Adaptation des indicateurs de vieillissement vers un même référentiel	156
5.3.1. Ajustement de la mesure des indicateurs de vieillissement	156
5.3.2. Notions de compression, de dilatation et de segmentation du temps de fonctionnement des condensateurs suivant les conditions d'utilisation.....	157
5.3.2.1. Notions de compression et de dilatation du temps.....	157
5.3.2.2. Notion de segmentation du temps de fonctionnement.....	158
5.3.2.3. Intérêt de la segmentation avec la compression du temps.....	159
5.3.2.4. Intérêt de la segmentation avec la dilatation du temps.....	160

5.4. Modélisation sous les conditions extrêmes et estimation de durée de vie des condensateurs.....	163
5.4.1. Algorithme d'optimisation à régression non linéaire.....	163
5.4.1.1. Modèle de représentation	163
5.4.1.2. Méthodes numériques itératives.....	164
5.4.1.3. Les fonctions de sensibilité	166
5.4.1.4. Apprentissage et modélisation en ligne.....	167
5.4.2. Estimation de la durée de vie restante RULO des condensateurs dans les conditions extrêmes	168
5.5. Fonctionnement global du système de prédiction.....	169
5.6. Simulations et expérimentations.....	173
5.6.1. Validation à partir d'un historique de mesures réelles d'utilisation.....	173
5.6.2. Validation à partir des essais de vieillissement accéléré des condensateurs effectués dans le variateur de vitesse	178
5.6.2.1. Description de la maquette expérimentale	178
5.6.2.2. Présentation de l'essai de vieillissement et des conditions de mesure.....	182
CONCLUSION	189
ANNEXES	191
Annexe A : Les sous-ensembles du banc et leurs constituants	191
Annexe B : Les différentes étapes de calcul de ESR et de C par la « méthode par système d'équations »	194
BIBLIOGRAPHIE	196

Liste des figures

Figure 1.1 Comparaison des trois types de maintenance.....	33
Figure 1.2 Distribution des défauts (à gauche) et des sources de stress (à droite) dans les convertisseurs d'énergie [46], [47].....	35
Figure 1.3 Croquis simplifié de l'interface anode-cathode d'un condensateur électrolytique à l'aluminium	37
Figure 1.4 Croquis simplifié d'un condensateur électrolytique à l'aluminium	38
Figure 1.5 Gravure d'une feuille d'aluminium (400×).....	39
Figure 1.6 Formation de couche d'oxyde (400×).....	39
Figure 1.7 Découpage des feuilles.....	39
Figure 1.8 Bobinage	40
Figure 1.9 Imprégnation	40
Figure 1.10 Assemblage	40
Figure 1.11 Structure complète du condensateur	40
Figure 1.12 Quelques produits finis	41
Figure 1.13 Schéma électrique équivalent d'un condensateur	41
Figure 1.14 Schéma équivalent normalisé d'un condensateur	42
Figure 1.15 Module de $Z(f)$ pour un condensateur électrolytique à l'aluminium équivalent $1500\mu F/800V$	43
Figure 1.16 Schéma équivalent normalisé d'un condensateur aux basses fréquences	43
Figure 1.17 Les mécanismes et modes de défaillance en fonction des différentes contraintes [29]- [46]	44
Figure 1.18 Mécanismes, modes et indicateurs de défaillance des condensateurs électrolytiques	45
Figure 1.19 Synoptique des techniques existantes de pronostic de défaillances des condensateurs électrolytiques	48
Figure 1.20 Évaluation des indicateurs de vieillissement pour des condensateurs récupérés	49
Figure 1.21 Synoptique de la méthode proposée de pronostic de défaillances des condensateurs électrolytiques	50
Figure 2.1 Effet de la tension sur l'épaisseur du diélectrique	61
Figure 2.2 Phénomènes de dégradation et d'auto-cicatrisation de la couche d'oxyde	61
Figure 2.3 Dégagement de dihydrogène.....	62
Figure 2.4 Facteur multiplicateur de tension K_V suivant différents fabricants et pour différents exposants n [96]	63
Figure 2.5 Distribution de ESR et C à 120Hz et IL à 5min pour les composants sains du fabricant A (courbe bleue) et du fabricant B (courbe rouge).....	67
Figure 2.6 Distribution de masse pour les composants sains du fabricant A (courbe bleue) et du fabricant B (courbe rouge).....	68
Figure 2.7 Configuration retenue pour l'impédancemètre pour nos mesures	68
Figure 2.8 Circuit du mégohmmètre capable de mesurer le courant de fuite des condensateurs.....	69
Figure 2.9 Banc expérimental pour la caractérisation des condensateurs en fonction de la température	70
Figure 2.10 Variation de l'ESR et de C à 120Hz pour différentes températures	71
Figure 2.11 Intérêt du reconditionnement sur l'amélioration des caractéristiques électriques	72
Figure 2.12 Banc de vieillissement standard par floating	73

Figure 2.13 Forme d'onde de la tension appliquée par l'équipement Chroma	74
Figure 3.1 Caractérisations fréquentielles d'un condensateur au cours de son vieillissement.....	77
Figure 3.2 Abaque de précision sur la mesure en fonction de la valeur de l'impédance et de la fréquence de mesure.....	79
Figure 3.3 Différentes mesures faites à 120Hz des étalons à chaque caractérisation de l'ensemble des condensateurs en essai.....	80
Figure 3.4 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement sans tension « shelf life » F(85 ; 0).....	81
Figure 3.5 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement F(85 ; 500).....	81
Figure 3.6 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement à plus faible température F(75 ; 500).....	82
Figure 3.7 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement à forte température F(95 ; 500).....	82
Figure 3.8 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement à tension « réduite » F(85 ; 400).....	82
Figure 3.9 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement à forte température et tension « réduite » F(95 ; 400)	83
Figure 3.10 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement avec oscillation O(85 ; 500)	83
Figure 3.11 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement « shelf life » F(85 ; 0).....	85
Figure 3.12 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement accéléré F(85 ; 500).....	85
Figure 3.13 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement accéléré F(75 ; 500).....	86
Figure 3.14 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement accéléré F(95 ; 500).....	86
Figure 3.15 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement d'endurance à tension réduite F(85 ; 400).....	86
Figure 3.16 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai d'endurance lourde à tension réduite F(95 ; 400).....	87
Figure 3.17 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement de durée de vie utile O(85 ; 500).....	87
Figure 3.18 Évolution du courant de fuite de 0 à 320 sec (5min+20sec) pour trois condensateurs du fabricant B sous états de santé différents	88
Figure 3.19 Évolution de la masse des condensateurs des fabricants A et B en fonction des ESR normalisées lors du vieillissement O(85 ; 500).....	89
Figure 3.20 Variations de l'ESR et de C avec le temps de vieillissement lors des essais O (85 ; 500) et F (95 ; 500).....	90
Figure 3.21 Évolution temporelle des moyennes normalisées de l'ESR et de C à 120Hz pour différents essais de vieillissement à 500V	91
Figure 3.22 Évolution temporelle des moyennes normalisées de l'ESR et de C à 120Hz pour différents essais de vieillissement à 400V	92
Figure 3.23 Évolution temporelle des moyennes normalisées de l'ESR et de C à 120Hz pour différents essais de vieillissement.....	93
Figure 3.24 Méthodes de calcul de l'énergie d'activation E_a et de l'exposant n	93
Figure 3.25 Évolution normalisée des indicateurs ESR et C pour deux vieillissements différents.....	95

Figure 3.26 Évolution normalisée des variations $\ln$ (ESR) et ΔC lors de deux vieillissements différents	95
Figure 3.27 Homothétie (à gauche) et isométrie (rotation) suivie d'une homothétie (à droite).....	96
Figure 3.28 Deux rectangles S et S' liés par homothétie	96
Figure 3.29 Estimation de l'énergie d'activation à 500V par rapport à la variation de l'ESR (à gauche) et de C (à droite).....	98
Figure 3.30 Estimation de l'exposant n à 85°C et 95°C par rapport à la variation de l'ESR (à gauche) et de C (à droite).....	98
Figure 3.31 Estimation de l'énergie d'activation à 400V par rapport à la variation de l'ESR (à gauche) et de C (à droite).....	99
Figure 3.32 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B2-1	104
Figure 3.33 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B2-3	104
Figure 3.34 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-1	105
Figure 3.35 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-2T	105
Figure 3.36 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-3	106
Figure 3.37 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-4.....	106
Figure 3.38 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-5.....	107
Figure 3.39 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-6.....	107
Figure 3.40 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-3R	108
Figure 3.41 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B5-1	108
Figure 3.42 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur A5-1.....	109
Figure 3.43 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur A5-2.....	109
Figure 3.44 Teneur en eau du condensateur après assemblage (réf : fabricant B)	111
Figure 3.45 Condensateurs non scellés à l'air libre (à gauche) dans une boîte hermétique (à droite) (réf : fabricant B).....	112
Figure 4.1 Configuration typique d'un système de variateur de vitesse.....	113
Figure 4.2 Distribution des défaillances suivant les composants dans les convertisseurs d'énergie...	114
Figure 4.3 Altivar ATV930D15N4AD.....	115
Figure 4.4 Variateur de vitesse triphasé	115
Figure 4.5 Dispositif d'identification des indicateurs de vieillissement	116
Figure 4.6 Quelques configurations possibles du redresseur pont de diodes	117
Figure 4.7 Onduleur triphasé à IGBT	119
Figure 4.8 Quelques configurations possibles de l'onduleur triphasé à IGBT.....	120
Figure 4.9 Schéma du variateur de vitesse indiquant le spectre fréquentiel composant l'ondulation du courant dans les condensateurs.....	121

Figure 4.10 Diagramme de Bode présentant la zone de fréquence dominante respectivement pour identifier ESR et C du module des condensateurs du prototype (mesures réalisées avec l'impédancemètre Agilent4294A).....	122
Figure 4.11 Emplacement des filtres passe-bande sur les signaux de courant et de tension des condensateurs	123
Figure 4.12 Valeurs de ESR et C aux fréquences 6fL et fd mesurées avec l'impédancemètre Agilent 4294A pour le module de condensateurs sains du prototype	125
Figure 4.13 Organigramme d'estimation de ESR et C par la méthode 1« Méthode par système d'équations »	126
Figure 4.14 Application des moindres carrés récursifs pour identifier les indicateurs de vieillissement de l'ensemble des condensateurs.....	127
Figure 4.15 Schéma équivalent des condensateurs retenu	127
Figure 4.16 Utilisation du filtre des moindres carrés récursifs « MCR » pour identifier les indicateurs de vieillissement de l'ensemble des condensateurs.....	130
Figure 4.17 Schéma de fonctionnement du banc expérimental.....	131
Figure 4.18 Synthétique de fonctionnement de la carte d'interface et de conditionnement	132
Figure 4.19 Synthétique de fonctionnement de la carte d'acquisition, de calcul et de transmission en mode « Run »	133
Figure 4.20 Synthétique de fonctionnement de la carte d'acquisition, de calcul et de transmission en mode oscilloscope	134
Figure 4.21 Synthétique de fonctionnement initial de la carte prototype en mode « Run »	135
Figure 4.22 Évolution de l'estimation de ESR selon les deux méthodes d'extraction à une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz.....	137
Figure 4.23 Évolution de l'estimation de C selon les deux méthodes d'extraction à une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz.....	137
Figure 4.24 Les différentes formes d'onde de l'état d'un interrupteur filtré ou non à une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz	139
Figure 4.25 La commande « s » et la tension « Vs » (collecteur-émetteur) d'un IGBT.....	140
Figure 4.26 États de commande et tension collecteur émetteur d'un IGBT. (a) États passant/bloqué des commandes idéales s1 et s4 complémentaires. (b) États passant/bloqué des commandes complémentaires en incluant les temps morts Tm. (c) Tension collecteur émetteur réelle de l'IGBT commandé par s1. (d) Tension équivalente aux états passant/bloqué de l'IGBT.	142
Figure 4.27 Différentes formes d'onde du courant des condensateurs calculé et mesuré à une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz.....	143
Figure 4.28 Les différentes formes d'onde du courant des condensateurs calculé et mesuré à 6fL et à fd pour une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz	143
Figure 4.29 Caractérisation du module des condensateurs DC avec l'impédancemètre Agilent 4294A	144
Figure 4.30 Estimation de ESR et C en utilisant le courant mesuré d'une part et le courant calculé d'autre part.....	145
Figure 5.1 Entrées requises pour le système estimant la durée de vie restante RUL	149
Figure 5.2 Étape 1 : les données d'entrée du dispositif.....	150
Figure 5.3 Étape 2 : extraction des données utiles des mesures	151
Figure 5.4 Étape 3 : identification des indicateurs de vieillissement ESR et C.....	151
Figure 5.5 Étape 4 : ajustement vers les conditions extrêmes	152
Figure 5.6 Étape 5 : modélisation sous les conditions extrêmes	152
Figure 5.7 Étape 6 : réajustement vers les conditions actuelles de fonctionnement.....	153
Figure 5.8 Étape 7 : affichage du RUL avec les conditions actuelles	153

Figure 5.9 Étapes 6 et 7 : calcul de l'état de santé du module des condensateurs et affichage	154
Figure 5.10 Étape 0 : pré-calculs nécessaires si la mesure du courant dans les condensateurs est indisponible	154
Figure 5.11 Organigramme de fonctionnement du dispositif de calcul de durée de vie RUL des condensateurs	155
Figure 5.12 Profil de contraintes vécu jusqu'à l'instant présent t_x	158
Figure 5.13 Détermination de la durée de vie L_0 tot consommée au lieu de L_x tot en transformant les contraintes vécues jusqu'à présent aux contraintes extrêmes	160
Figure 5.14 Durée de vie restante RUL_0 , aux conditions extrêmes, estimée à l'instant virtuel t_0	160
Figure 5.15 Profil de contraintes prévues	161
Figure 5.16 Compression du temps du profil prévu et arrêt lorsque $i = 1mL'_0i \geq RUL_0$	161
Figure 5.17 Schéma bloc d'optimisation des paramètres α_i	164
Figure 5.18 Évolution du critère quadratique et de son gradient suivant les valeurs de α_i	165
Figure 5.19 Un modèle d'évolution qui s'affine avec l'augmentation du nombre des observations ..	168
Figure 5.20 Estimation du RUL_0 des condensateurs après avoir construit le modèle d'évolution dans les conditions extrêmes	169
Figure 5.21 Fonctionnement complet du dispositif : de la récupération des mesures de l'équipement à l'estimation de la RUL des condensateurs	171
Figure 5.22 Fonctionnement pratique du dispositif d'estimation de la durée de vie des condensateurs	172
Figure 5.23 Ajustement des conditions de mesures pour ESR et C	174
Figure 5.24 Compression du temps suivant les conditions de fonctionnement	175
Figure 5.25 Compression du temps suivant les conditions de fonctionnement	176
Figure 5.26 Estimation de la durée de vie restante suivant chaque indicateur de vieillissement	177
Figure 5.27 Architecture du module des condensateurs dans l'Altivar ATV930	178
Figure 5.28 Revêtement des condensateurs par des colliers chauffants et ajout de thermocouples	180
Figure 5.29 Face avant du banc de vieillissement	181
Figure 5.30 Face arrière du banc de vieillissement	182
Figure 5.31 Ajustement des conditions de mesures de ESR et C	185
Figure 5.32 Compression du temps suivant les conditions de fonctionnement	186
Figure 5.33 Construction du modèle de vieillissement pour chaque indicateur	187
Figure 5.34 Extrapolation des modèles et estimation de la durée de vie restante	188
Figure 0.1 Photos d'insertion de quelques capteurs ajoutés	192
Figure 0.2 L'Altivar ATV930 avec les capteurs dupliqués	193
Figure 0.3 Extraction des formes d'onde des harmoniques à 300 Hz et à 4 kHz du courant et de la tension du module des condensateurs	194
Figure 0.4 Calcul des valeurs RMS des harmoniques à 300 Hz et à 4 kHz du courant et de la tension du module des condensateurs	195
Figure 0.5 Calcul de l'impédance des condensateurs à 300 Hz et 4 kHz du module des condensateurs afin de déterminer ESR et C	195

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Challenges de fiabilité et de maintenance dans l'industrie au passé, au présent et dans le futur	32
Tableau 1.2 Durées de vie typiques de l'électronique de puissance dans différentes applications [3], [42]	34
Tableau 1.3 Processus de fabrication des condensateurs électrolytiques[55]–[57].....	41
Tableau 1.4 Résumé des différents travaux de recherche pour prédire la durée de vie d'un condensateur électrolytique	47
Tableau 2.1 Termes relatifs à la durée de vie suivant les essais de vieillissement accéléré réalisés par des fabricants sur les condensateurs selon les conditions définies par les normes [55], [83]–[85]	54
Tableau 2.2 Constantes et stress identifiés dans l'équation d'Eyring.....	65
Tableau 2.3 Caractéristiques géométriques et électriques des condensateurs en essai	66
Tableau 2.4 Valeurs moyennes initiales des paramètres électriques avec leurs écarts-types.....	67
Tableau 2.5 Masse des condensateurs de chaque fabricant.....	67
Tableau 2.6 Les différents essais de vieillissement réalisés	75
Tableau 3.1 Résultats expérimentaux pour E_a et n	99
Tableau 3.2 Durée de vie des condensateurs jusqu'à la défaillance, état final et équipe qui a pris en charge l'analyse post-mortem	101
Tableau 3.3 Différents types d'examen post-mortem réalisés	102
Tableau 3.4 Résultats généraux observés sur les 13 condensateurs analysés.....	103
Tableau 4.1 Capteurs présents dans un variateur de vitesse Altivar.....	116
Tableau 4.2 Caractéristiques techniques de l'Altivar ATV930D15N4AD utilisé	124
Tableau 4.3 Les différentes fonctions et rôles de la carte utilisée	133
Tableau 4.4 L'estimation de ESR et C suivant les deux méthodes sur deux fréquences d'échantillonnage différentes (10fd et 4fd) et comparaison des erreurs d'estimation et du temps de convergence pour un condensateur équivalent avec $ESR = 20m\Omega$, $C = 1500\mu F$	138
Tableau 4.5 Estimations de ESR et C issues de la mesure et du calcul de iC avec le prototype testé sur un variateur de vitesse et comparaison avec la mesure ex situ.....	144
Tableau 5.1 Tableau résumant les principales formules utilisées pour le fonctionnement du dispositif d'estimation de durée de vie des condensateurs.....	147
Tableau 5.2 Profil de contraintes vécu jusqu'au temps présent	158
Tableau 5.3 Passage des contraintes vécues jusqu'à présent aux contraintes extrêmes	159
Tableau 5.4 Profil de contraintes prévues	161
Tableau 5.5 Profil de contraintes prévu en temps compressé.....	162
Tableau 5.6 Quelques méthodes numériques itératives.....	166
Tableau 5.7 Tableau représentant les données utiles des condensateurs dans une application industrielle	173
Tableau 5.8 Caractéristiques géométriques et électriques des condensateurs du module	179
Tableau 5.9 Caractéristiques électriques équivalent du module de condensateur.....	179
Tableau 5.10 Nouveaux constituants pour effectuer le vieillissement accéléré du module de condensateurs	180
Tableau 5.11 Trois conditions de vieillissement du module et trois conditions de mesure de ESR et C	182
Tableau 5.12 Mesure de ESR et de C équivalent puis ajustement au même référentiel d'environnement de mesure.....	184

Tableau 5.13 Compression du temps selon les conditions de vieillissement	186
Tableau 0.1 Constituants de l'ensemble électrique	191
Tableau 0.2 Constituants de l'ensemble mécanique.....	192

Glossaire

Symboles	Significations
ε_0	Permittivité absolue du vide ($\varepsilon_0 = 8,854.10^{-12}$ F/m)
ε_r	Permittivité relative du diélectrique (sans dimension)
S	Surface en regard anode-cathode (m ²)
e	Épaisseur du diélectrique en (m)
C_{AK}	Capacité idéale entre l'anode et la cathode (F)
C	Capacité équivalente série (en F)
ESR	Résistance équivalente série (en Ω)
ESL	Inductance équivalente série (en H)
f_r	Fréquence de résonance du condensateur (en Hz)
L_0	Durée de vie spécifiée (heures) sous un fonctionnement aux conditions extrêmes (température maximale supportée, ondulation de courant maximale permise, tension nominale). Cette valeur est indiquée dans les « datasheets » des condensateurs utilisés.
L_x	Durée de vie à estimer suivant les conditions prévues d'utilisation (heures)
K_T	Facteur multiplicateur de température ambiante
K_I	Facteur multiplicateur de courant
K_V	Facteur multiplicateur de tension
θ_x	Température ambiante prévue (en °C)
θ_0	Température maximale (en °C)
$\Delta\theta_0$	Échauffement interne maximal (en °C)
$V_0 ; I_{RMS0}$	Tension nominale ; courant efficace nominal
$V_x ; I_{RMSx}$	Tension d'application prévue ; courant efficace prévu
n	Exposant par rapport à la tension : Constante empirique de sécurité
v	Vitesse de réaction
$s(T, \dots)$	Coefficient de vitesse qui dépend notamment de la température et peut être représenté par la loi d'Arrhenius
$g(c_i)$	Fonction liée aux quantités des substances dans le milieu réactionnel
E_a	Energie d'activation (en eV)
k	Constante de Boltzmann ($8,617.10^{-5} eV/K$)
T_x	Température ambiante (en Kelvin)
T_0	Température maximale (en Kelvin)
L_0	Durée de vie spécifiée (heures) sous un fonctionnement aux conditions extrêmes
L_x	Durée de vie à estimer suivant les conditions prévues d'utilisation (heures)
v_0	Vitesse de réaction sous un fonctionnement aux conditions extrêmes
v_x	Vitesse de réaction suivant les conditions prévues d'utilisation
P	Dissipation de puissance interne (en W)
$I_{RMSx,f}$	Courant efficace (en A) à une température T_x donnée pour les fréquences $f_1 \dots f_n$
$ESR_{x,f}$	Résistance équivalente série (en Ω) à une température T_x donnée pour les fréquences $f_1 \dots f_n$

T_{cx}	Température cœur (en Kelvin)
ΔT_x	Échauffement interne dû à l'ondulation de courant
$\mathcal{R}_{th}$	Résistance thermique du condensateur entre son cœur et l'air ambiant (en K/W)
T_{cx}, T_{c0}	Températures cœurs en Kelvin (K) respectivement actuelle et maximale
K_{TI}	Facteur multiplicateur de température ambiante et de l'ondulation du courant. Ce facteur remplace $K_T \cdot K_I$ de la formule initiale
T_K	= 273.15K
θ_{cx}, θ_{c0}	Températures en Celsius (°C)
e_0	L'épaisseur de diélectrique correspondante à V_0
e_x	L'épaisseur de diélectrique correspondante à V_x
Q_0	Charge électrique maximale du condensateur, quantité d'électrons en Coulomb (C)
Q_x	Charge électrique actuel du condensateur, quantité d'électrons en Coulomb (C)
A	Constante liée au processus spécifique modélisé
T	Température absolue (K)
α, B, C, D, E	Constantes d'accélération et d'interaction
S_1, S_2	Les contraintes (stress) ; fonctions du courant et de la tension dans notre cas d'étude
R	Résistance du diélectrique (pouvant être considérée comme constante pour les faibles tensions (inférieures à la moitié de la tension nominale $V_0/2$) (Ω))
I_{L0}	Courant de fuite à V_0 (A)
U	Tension de polarisation du mégohmmètre
V_0	Tension nominale du composant (condensateur dans notre cas)
θ_k	Température du composant en °C
$\theta_{20^\circ C}$	Température de référence en °C (ici 20°C)
ESR_{θ_k}	ESR à la température θ_k
$ESR_{\theta_{20^\circ C}}$	ESR à la température de référence $\theta_{20^\circ C}$
C_{θ_k}	C à la température θ_k
$C_{\theta_{20^\circ C}}$	C à la température de référence $\theta_{20^\circ C}$
$\beta_{esr1}, \dots, \beta_{esr3}$	Coefficients de ESR par rapport à la température dépendants du composant
$\beta_{c1}, \dots, \beta_{c2}$	Coefficients de C par rapport à la température dépendants du composant
$E (\%)$	Précision relative en pourcentage de l'appareil de mesure
E'_p, Z'_S, Y'_0	Termes en fonction de la fréquence, de l'impédance, du niveau de signal ainsi que du mode et du temps de mesure
Z_x	Impédance mesurée
Q_x	Facteur de qualité mesuré, représentant le rapport entre la partie réelle R et la partie imaginaire X de l'impédance Z_x mesurée
$ESR_{ajustée i}^{cond j}$	Valeur ajustée de l'ESR (à 120Hz) du condensateur j lors de la caractérisation i
$ESR_{mesuré i}^{cond j}$	Valeur mesurée de l'ESR (à 120Hz) du condensateur j lors de la caractérisation i
$ESR_{moyenne}^{étalon}$	Valeur moyenne de l'ESR (à 120Hz) du condensateur étalon de toutes les caractérisations
$ESR_{mesurée i}^{étalon}$	Valeur mesurée de l'ESR (à 120Hz) lors de la caractérisation i du condensateur étalon A ou B

$ESR(t)$	La valeur de l'ESR à t
$ESR(0)$	La valeur de l'ESR initiale (à $t = 0$) à une température donnée (cf. §2.4 du chapitre 2)
A_0	Coefficients dépendant du composant à déterminer par des essais de vieillissement accéléré
T	Température de vieillissement en Kelvin
$\alpha_{esr1}; \alpha_{esr2}; \alpha_{esr3}$	Coefficients d'évolution temporelle de ESR dépendant du composant à déterminer en ligne (cahier de charge §1.4.2 - chapitre 1)
$\alpha_{c1}; \alpha_{c2}$	Coefficients d'évolution temporelle de C dépendant du composant à déterminer en ligne (cahier de charge §1.4.2 - chapitre 1)
$\Delta \dot{ESR}$	Variation normalisée de $(ESR - ESR_0)/ESR_0$
$\dot{ESR}$	Variation normalisée de ESR/ESR_0
$\Delta \dot{C}$	Variation normalisée de $(C - C_0)/C_0$
i_C	Courant passant dans les condensateurs
i_R	Courant sortant du redresseur à pont de diodes
i_O	Courant entrant dans l'onduleur
f_k	Fréquence de mesure (Hz)
ω_k	Pulsation correspondante à la fréquence telle que $\omega_k = 2\pi f_k$ (rad/s)
$v_{BUS_RMS}(f_k)$	Tension efficace à la fréquence f_k du bus DC correspondante à la tension aux bornes de l'ensemble des condensateurs
$i_{C_RMS}(f_k)$	Courant efficace à la fréquence f_k passant dans le module des condensateurs
$ Z_C (f_k)$	Module de l'impédance de l'ensemble des condensateurs à la fréquence f_k
ESR, C	Indicateurs de vieillissement à identifier pour l'ensemble des condensateurs
T_e	Période d'échantillonnage $T_e = 1/f_e$
s	Variable complexe de Laplace
z	Variable complexe discrétisée
$\hat{\theta}(k+1)$	Nouvelle estimation de paramètre (vecteur $m \times 1$)
$\hat{\theta}(k)$	Estimation de paramètre précédente (vecteur $m \times 1$)
$F(k+1)$	Gain d'adaptation (matrice $m \times m$)
$\phi(k)$	Fonction de mesure (vecteur $m \times 1$)
$\varepsilon(k+1)$	Fonction de l'erreur de prédiction (scalaire)
$y(k)$	Sortie estimée à l'instant k (dans notre cas c'est $v_{BUS}(k)$)
$x(k)$	Variables internes qui peuvent être mesurées à l'instant (k) ou $(k-1)$ ou estimées à l'instant $(k-1)$
$H(k)$	Vecteur des paramètres à identifier
L_0 ga	Appelé dans le chapitre 2 L_0 , c'est la durée de vie spécifiée et garantie (heures) par le constructeur sous un fonctionnement aux conditions extrêmes (température maximale supportée, ondulation de courant maximale permise, tension nominale). Cette valeur est indiquée dans les « datasheets » des condensateurs utilisés.
EOL_0	Durée de fin de vie estimée (heures) par l'algorithme dans le cas des conditions extrêmes
t_x	Instant présent pour les conditions actuelles
t_0	Instant présent extrapolé pour les conditions extrêmes
t_{xi}	Instant pour lequel les conditions actuelles changent pour la $i^{ème}$ fois

t_{0i}	Instant extrapolé pour les conditions extrêmes pour la $i^{ème}$ fois
$T_{xi}, V_{xi}, I_{RMSxi}$	Conditions de fonctionnement stables d'indice i
T_0, V_0, I_{RMS0}	Conditions extrêmes quel que soit l'indice i
T'_x, V'_x, I'_{RMSx}	Conditions de fonctionnement prévues
$K_{TIi}; K_{Vi}$	Facteurs influençant la durée de vie des condensateurs liés aux conditions de fonctionnement $T_{xi}, V_{xi}, I_{RMSxi}$
$K'_{TI}; K'_V$	Facteurs influençant la durée de vie des condensateurs liés aux conditions de fonctionnement prévues T'_x, V'_x, I'_{RMSx}
L_{xi}	Période de fonctionnement dans les conditions fixes $(T_{xi}, V_{xi}, I_{RMSi})$ entre l'instant t_{xi-1} et t_{xi}
L_{0i}	Période de vie consommée dans les conditions extrêmes (après extrapolation de la période de fonctionnement $[t_{xi-1}; t_{xi}]$) entre l'instant t_{0i-1} et t_{0i}
$L_{x tot}$	Durée de fonctionnement totale dans les conditions actuelles depuis l'instant initial 0 jusqu'à t_x $L_{x tot} = \sum L_{xi} = t_x - 0$
$L_{0 tot}$	Durée de vie totale consommée dans les conditions extrêmes (T_0, V_0, I_{RMS0}) (après extrapolation des durées de fonctionnement) depuis l'instant initial 0 jusqu'à t_0 . $L_{0 tot} = \sum L_{0i} = t_0 - 0$
RUL_0	Durée de vie restante aux conditions extrêmes entre l'instant t_0 et EOL_0
RUL_x	Durée de vie restante extrapolée aux conditions envisagées $(T'_{xi}, V'_{xi}, I'_{RMSi})$ pour des conditions prévues du fonctionnement des condensateurs

Introduction

L'augmentation de la consommation d'énergie et le besoin de réduction des émissions des gaz à effet de serre nécessitent une meilleure sécurisation et gestion de l'énergie électrique. Dans ce contexte, les équipements électriques qui permettent de sécuriser, de réduire la consommation de l'énergie ou bien de produire de l'énergie à partir de sources non fossiles sont en plein essor et sont très utilisés dans l'industrie ou les bâtiments tertiaires ou résidentiels. Parmi ces équipements se trouvent des produits tels que les variateurs de vitesse, les onduleurs solaires ou les alimentations sécurisées....

L'utilisation de l'électronique de puissance est soumise aux exigences de durée de vie de plusieurs années de fonctionnement sans interruption sous différentes contraintes environnementales et cycles de fonctionnement. Cela nécessite que les composants constituant ces équipements soient fiables et robustes. Lors du fonctionnement, ces derniers sont exposés à différentes contraintes environnementales et fonctionnelles (température ambiante, cyclage thermique, tension d'application, vibrations, choc, altitude, humidité...). Or, tous ces facteurs impactent la durée de vie des composants électroniques et, par conséquent, la fiabilité et durée de vie des produits. Parmi les composants électroniques les plus à risque, au cœur des convertisseurs, se trouvent les composants de puissance tels que les modules de puissance et les condensateurs électrolytiques [1]–[4]. Vue leur sensibilité au vieillissement, ils représentent un enjeu économique important. Dans ce mémoire, nous traitons des condensateurs électrolytiques à l'aluminium.

La demande croissante en fiabilité des convertisseurs statiques d'énergie requiert le développement de produits avec une durée de vie importante. La diversification des applications des convertisseurs (utilisés par exemple dans le secteur de l'automobile ou de l'aéronautique) a imposé de nouvelles contraintes liées à la réduction du poids, du volume, à la température de fonctionnement, à la tenue en tension L'analyse de défaillance des convertisseurs a mis en évidence que l'utilisation des programmes de maintenance basés sur des lois statistiques avec un taux de défaillance constant ne sont plus adéquats car d'une part ce dernier n'est pas constant et d'autre part ces lois nécessitent une évaluation reposant sur un grand nombre de produits afin d'obtenir une signification statistique raisonnable. Ces lois sont usuellement développées pour des produits de masse, et ne s'appliquent pas sur des petites séries de production, ce qui est le cas de notre application (variateurs de vitesse, alimentations sans interruption). L'estimation de la durée de vie des convertisseurs est un sujet multidisciplinaire et complexe. En effet, il regroupe trois aspects différents que sont la physique des matériaux (avec des couplages électro-thermo-chimique), la physique de défaillance et la prise en compte du profil de charge de l'application. Dans ce cadre, le développement de nouvelles techniques de prédiction des défaillances a vu le jour et font l'objet de nombreuses recherches. Les premières investigations ont commencé chez les fabricants de condensateurs, compte tenu de leur parfaite maîtrise des produits (de leurs caractéristiques électriques, chimiques, physiques ...) et de leur expertise pour le développement et la vérification des modèles de durée de vie. La plupart de ces modèles sont empiriques. Ils sont basés sur une analyse statistique menée sur des essais accélérés de vieillissement conduits sur une longue durée. Les essais accélérés de vieillissement sont généralement menés afin d'émuler les conditions de défaillances présentes lors du fonctionnement normal des condensateurs. Grâce au modèle extrait de ces essais, il est possible de calculer la durée de vie des condensateurs exposés à des contraintes thermiques et électriques uniformes (parfois cycliques). Souvent, ce modèle ne prend pas en compte les variations temporelles des contraintes.

Les défaillances obtenues sont causées par des effets de vieillissement d'origine thermoélectrique. La défaillance principale des condensateurs électrolytiques à l'aluminium provient de l'évaporation de l'électrolyte et de la dégradation du diélectrique. Le développement de modèles empiriques pour chaque mécanisme de dégradation s'avère complexe. Ils sont souvent basés sur la surveillance des caractéristiques électriques des condensateurs telles que la capacité C et la résistance équivalente série ESR [5]–[9]. Ils se focalisent sur l'évolution temporelle de ces indicateurs de vieillissement en fonction des contraintes appliquées. En étudiant séparément l'influence de chaque contrainte sur la dégradation, un meilleur aperçu du processus de dégradation peut être obtenu. La calibration des paramètres d'un modèle de vieillissement peut se faire en menant plusieurs essais expérimentaux. Ce nombre est fonction du nombre de paramètres à identifier et de la complexité du modèle.

D'un point de vue économique, il est moins pénalisant de programmer une maintenance avec un remplacement de composants des convertisseurs que de subir un arrêt brutal dû à une panne. Il est nécessaire pour cela de se doter d'outils de prévision de durée de vie restante de ces équipements et de leurs composants. La problématique est donc celle de la prévision, pendant son service, de l'état de santé des condensateurs présents dans un convertisseur afin de prévoir la maintenance de l'équipement avant la défaillance. Cette problématique est générique au niveau industriel et a un intérêt en termes de développements méthodologiques de manière générale.

C'est dans ce cadre que les travaux de thèse s'inscrivent et ont pour but de développer sur les convertisseurs de Schneider Electric, un outil permettant la prédiction de durée de vie restante des condensateurs électrolytiques à l'aluminium. Le convertisseur considéré pour nos travaux est un variateur de vitesse (réf. ATV930D15N4AD) de 15kW. La thèse fait partie du projet « Diagnostic Prédictif » au sein de l'équipe « Power Conversion » de Schneider Electric et est menée en collaboration avec la priorité « Systèmes et Énergies Sûrs » du laboratoire Ampère dans le cadre d'un contrat CIFRE.

L'objectif de cette thèse est donc l'élaboration, la mise en place et la validation d'une méthodologie générique permettant l'estimation de l'état de santé et de la durée de vie restante des condensateurs électrolytiques à l'aluminium. De nombreux travaux ont déjà abordé ce sujet, mais il manque à ce jour des algorithmes prêts à exploiter, génériques et faciles à implémenter. Des systèmes de pronostic de l'état de santé des condensateurs électrolytiques ont déjà été conçus [5], [10]–[23] (comme au laboratoire Ampère ainsi qu'à Schneider Electric [11], [22], [24]–[26]) mais ceux-ci nécessitent la connaissance précise des lois de vieillissement et donc des essais préalables de vieillissement accélérés doivent être réalisés sur chaque type de composants à surveiller. Un des principaux verrous des travaux de cette thèse est que les algorithmes doivent s'affranchir de la connaissance a priori et précise des paramètres des lois de vieillissement des condensateurs considérés. Ces derniers doivent être paramétrés en ligne et au cours du fonctionnement de l'équipement. Le cahier des charges prévoit que l'utilisateur de l'équipement pourra rentrer les données du catalogue des condensateurs mais ne devra pas réaliser d'essais de vieillissement accéléré préalables. Par ailleurs, il est spécifié qu'aucun capteur non existant dans l'équipement ne peut être ajouté pour estimer l'état de santé des condensateurs.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire comporte cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, le contexte général de notre travail est présenté. Ensuite, la technologie, les caractéristiques et la modélisation des condensateurs électrolytiques à l'aluminium sont examinées. Enfin, un aperçu général sur les systèmes de surveillance existants pour ces composants est donné en soulignant leurs principaux inconvénients. Ceci permet de proposer le cahier des charges qui est considéré.

Dans le deuxième chapitre, nous détaillons la loi de vieillissement proposée par les fabricants pour les condensateurs électrolytiques et nous proposons une amélioration de ce modèle pour une estimation plus précise de la durée de vie restante de ces composants. Puis, nous présentons la procédure expérimentale de vieillissement et les différents essais de vieillissement accéléré prévus pour valider le modèle de vieillissement proposé.

Dans le troisième chapitre, nous détaillons les différentes étapes de caractérisation et de vieillissement. Nous déduisons les courbes d'évolution des indicateurs de vieillissement que sont ESR (résistance équivalente série) et C (capacité). Puis, nous présentons quelques cas de défaillance catastrophiques. Enfin, nous exposons une méthode capable de déduire l'énergie E_a d'activation ainsi que l'exposant n de l'équation de vieillissement des condensateurs.

Dans le quatrième chapitre, nous expliquons l'architecture des convertisseurs statiques d'énergie supports de ces travaux. Nous détaillons la manière dont sont récupérés les indicateurs de vieillissement ESR et C dans une application réelle qui considère un variateur de vitesse. Ensuite, nous présentons les cartes électroniques conçues et les algorithmes mis en œuvre et leurs contraintes d'implémentation respectives pour une réalisation en temps réel.

Dans le cinquième chapitre, nous exposons notre système de pronostic capable d'estimer en ligne la durée de vie restante RUL (Remaining Useful Life) des condensateurs et leur état de santé. Puis nous présentons les résultats de simulation de l'algorithme de vieillissement que nous avons retenu. Enfin, nous abordons la partie expérimentale en décrivant le système développé et les résultats obtenus qui confirment le bon fonctionnement du système de diagnostic et de pronostic.

Enfin une synthèse des travaux effectués et des perspectives sont présentés dans la dernière partie.

1. Les condensateurs électrolytiques au cœur des convertisseurs de puissance

1.1. Exigence de conception et challenges de fiabilité dans les convertisseurs de puissance

1.1.1. Exigences de conception

Les dispositifs électriques requièrent de plus en plus l'utilisation de l'électronique de puissance dans de nombreuses applications industrielles (variateurs de vitesse, onduleurs, postes de transformation AC/DC ...). Dans ces systèmes électriques, les performances du convertisseur dépendent directement des performances des composants le constituant, du mode de contrôle et des conditions d'usage. En dehors des fonctions que le convertisseur de puissance doit remplir, sa conception prend en considération cinq facteurs de performance [27] : la faisabilité, le coût, l'efficacité, la densité de puissance et la fiabilité. La fiabilité est la probabilité qu'un système réalise certaines fonctions sans défaillance, sous des conditions de fonctionnement prédéfinies pour une durée donnée [28].

1.1.2. Challenges de fiabilité

L'étude de la fiabilité est devenue une discipline depuis 1950 avec la nécessité de résoudre les problèmes de fiabilité des produits électroniques destinés à des applications militaires [29]. Dès lors, de nombreux travaux ont été consacrés à divers sujets liés à la fiabilité. L'un des principaux travaux concerne la prévision statistique de fiabilité basée sur des données simplifiées. Divers recueils ou normes ont été publiés par l'armée et l'industrie [30]. Jusqu'aux années 80, les modèles de taux de défaillance constants, basés par exemple, sur la norme Military-Handbook-217 [5] [6] ont été principalement utilisés pour déterminer le taux de défaillance des composants électroniques. Après les années 90, avec la complexité croissante des systèmes électroniques et en particulier l'utilisation des circuits intégrés, les modèles à taux de défaillance constants sont délaissés [33]. La norme Military-Handbook-217F est donc officiellement abandonnée en 1995. Une approche basée sur la physique des défaillances de composants (PoF : Physics of Failure) commence alors à être considérée pour les calculs de fiabilité [34], [35]. Elle est axée sur l'identification et la modélisation des causes physiques des défaillances de composants. Les initiatives de mise à jour du Military-Handbook-217F considère une approche hybride entre la prévision statistique et la physique de défaillance et donne le jour à la nouvelle version, le Military-Handbook-217H [36]. Au cours de la phase de conception et de développement du système, une modélisation physique de la fiabilité ainsi que des méthodes probabilistes sont appliquées. Des recherches intensives sur la physique des défaillances de composants (PoF) ont été menées de manière continue depuis les années 90 en microélectronique [33], [37]. Avec la transition des méthodes empiriques simplifiées vers des approches tirant profit de la physique de la défaillance, le paradigme dans la recherche sur la fiabilité change.

Avec plus de 70% d'électricité convertie en utilisant l'électronique de puissance, de nombreux travaux de recherche sont menés pour améliorer la fiabilité des convertisseurs et répondre aux exigences des utilisateurs. Ces travaux tentent de répondre aux contraintes suivantes [3] :

- Applications sous des profils de mission critiques (ex. : aérospatial, militaire, avionique, traction ferroviaire, véhicules électriques, centres des données...) ou sous des conditions environnementales sévères (ex. : éoliennes onshore et offshore, systèmes photovoltaïques, pompes...),
- Augmentation continue de la densité de puissance avec des convertisseurs à haut niveau d'intégration. Des études récentes traitent de la fiabilité des nouvelles technologies d'assemblage et de matériaux (ex. : composants en Carbure de Silicium (SiC), en Nitrure de Galium (GaN)...),
- Croissance de la complexité des systèmes à base d'électronique de puissance, surtout en termes de nouvelles fonctionnalités, du nombre de composants et d'algorithmes de contrôle et de commande,
- Contraintes de coût et de temps sur les essais de fiabilité.

1.1.3. De la fiabilité au choix du type de maintenance

Les différentes approches de la fiabilité et de la maintenance, considérées au cours du temps sont rapportées dans Tableau 1. Afin de répondre aux tendances futures et aux attentes des utilisateurs, il est essentiel de comprendre les mécanismes de défaillance qui surviennent dans les convertisseurs d'énergie, pour développer des nouveaux outils d'évaluation de fiabilité durant la phase de conception et de maintenance durant la phase de fonctionnement. Les études basées sur la physique de défaillance sont nécessaires dans le domaine de la conversion de puissance, pour intégrer les nouveaux modes de fonctionnement et les nouvelles technologies de composants.

En France, le montant total de la dépense de maintenance industrielle s'élève à 22 milliards d'euros et pèse pour 24% du pourcentage du coût total de la production. À titre d'exemple 2.5 M€ est le coût horaire moyen d'un arrêt de production dans l'automobile. Près de 90% du temps de maintenance sont liés à une maintenance corrective suite à une panne non prévue [38]. En réduisant le nombre de pannes de moitié, l'industriel peut espérer une diminution de ses coûts de maintenance de 15 à 40% et simultanément gagner en productivité grâce à l'amélioration du taux de rendement global [39].

	Passé	Présent	Futur
Attentes des clients	- Remplacement en cas de panne - Garantie	- Faible taux de défaillance - Demande de maintenance	Tranquillité d'esprit face aux défaillances imprévues ou des maintenances non nécessaires
Approche de la R&D	Tests de fiabilité	- Tests de robustesse - Amélioration de la fiabilité des composants « faibles »	- Conception pour la fiabilité - Prise en compte des profils de charges
Outils de la R&D	Fonctions de test	Essais aux limites, autrement dit, essais de vieillissement accéléré	- Compréhension des mécanismes de défaillance avec prise en compte des contraintes de fonctionnement - Simulation multi domaine
Réponse du marché	Maintenance corrective	Maintenance préventive	Maintenance préventive conditionnelle, ou prédictive
État de l'équipement suivant les tâches à réaliser	Arrêt non prévu et durée de la réparation non maîtrisée	- Arrêt pour la révision - Arrêt pour le changement de pièces	- En fonctionnement pour la surveillance - Arrêt pour le changement des pièces
Objectif	Remise en service de la machine	Garantir le fonctionnement d'une machine pendant une période déterminée	Détecter les dérives ou anomalies à temps et programmer leurs corrections
Inconvénients	- Équipe de maintenance en alerte et sous stress - Pertes économiques ingérables suite à l'arrêt de service	- Maintenance systématique donc parfois inutile et trop tôt - Le risque d'avoir une panne reste probable car aucune surveillance en ligne n'est mise en place	Nécessité d'un travail de réflexion en amont : - Etude de la physique de défaillance de chaque composant ou élaboration d'un modèle empirique le cas échéant - Etude mathématique sur l'évolution des indicateurs de vieillissement

Tableau 1.1 Challenges de fiabilité et de maintenance dans l'industrie au passé, au présent et dans le futur

La maintenance préventive conditionnelle (aussi traduite de l'anglais par maintenance prédictive) permet de détecter, grâce à un diagnostic non destructif ni intrusif, l'apparition d'un vieillissement ou d'une défaillance progressive afin d'anticiper les pannes. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place une surveillance intelligente et périodique d'un ou plusieurs paramètres sur les équipements en fonctionnement.

Les avantages de la maintenance préventive conditionnelle sont [40] :

- amélioration de la fiabilité et la disponibilité des équipements industriels en diminuant le nombre de pannes ;
- disparition de la très coûteuse maintenance corrective en planifiant les interventions et en organisant les arrêts de production ;
- réduction des coûts de maintenance préventive en prévoyant au mieux le moment du changement des pièces, ni trop tôt (maintenance préventive), ni trop tard (maintenance corrective).

Le graphique de la Figure 1.1, ci-dessous, montre l'avantage de la maintenance préventive conditionnelle par rapport aux autres types de maintenance vis-à-vis de la durée de service de l'équipement avant son remplacement.

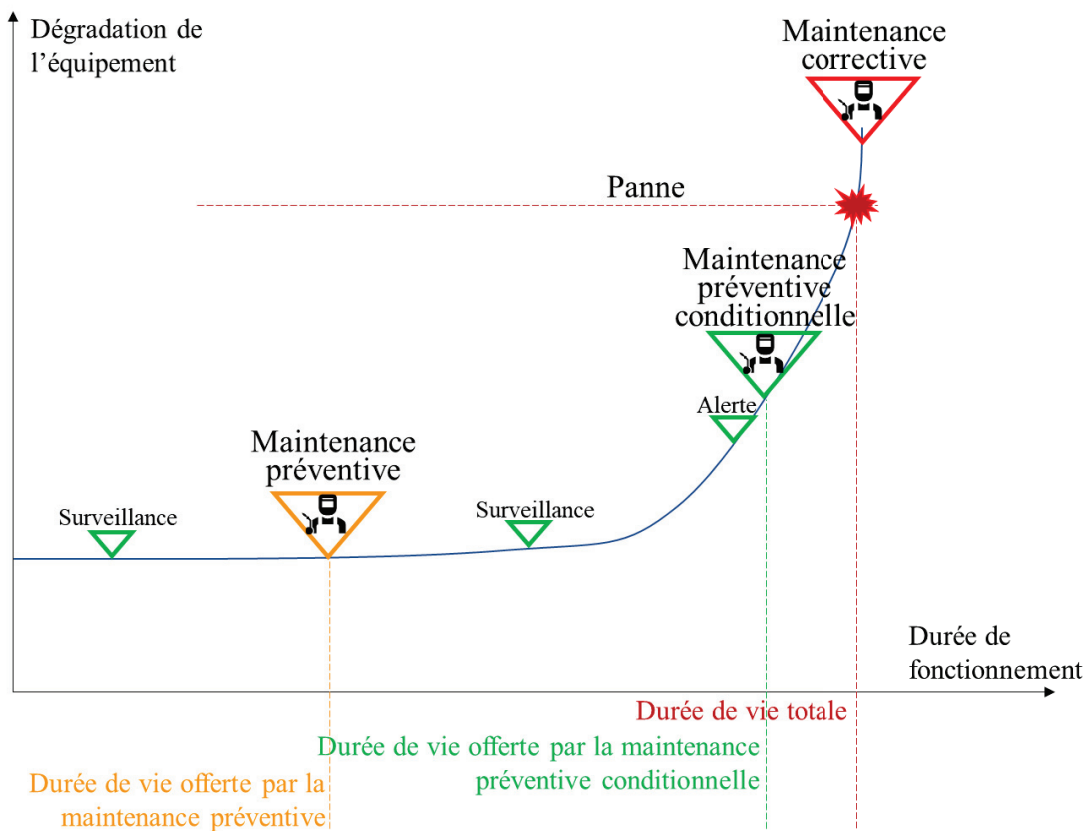


Figure 1.1 Comparaison des trois types de maintenance

1.1.4. Analyse de la physique de défaillance

Le concept de fiabilité focalisé sur la modélisation de la physique de défaillance (PoF) a été initialement présenté en 1962 [34]. C'est une méthodologie basée sur l'analyse des mécanismes de défaillance ainsi que l'évaluation de l'impact des matériaux, des défauts et des contraintes sur la fiabilité d'un produit [41]. La physique de défaillance est une approche fondée sur la conviction que la défaillance dans les systèmes électroniques est gouvernée par des processus d'origine mécanique, électrique, thermique et chimique. Cette approche commence pendant la phase de conception, où le concepteur doit définir les exigences du produit en se basant sur les besoins des utilisateurs et les capacités des fournisseurs. En même temps, le concepteur identifie l'environnement de fonctionnement du produit (aérospatial, automobile, ...) et spécifiquement la température ambiante, les contraintes électriques, l'humidité, les vibrations, Avec ces informations, le concepteur devient capable de modéliser le comportement électrique, thermique et mécanique ainsi que l'action des contraintes sur le produit. Ensuite, l'analyse de ces dernières combinées avec la connaissance de leurs réponses en fonction des matériaux utilisés permet au concepteur d'identifier la zone où la défaillance pourrait se produire, quelle forme elle peut prendre (mode) et comment elle a lieu (mécanisme). La défaillance se déclenche généralement soit à cause d'un défaut précoce, soit à cause d'une contrainte excessive ou alors d'un vieillissement cumulé au fil du temps. Le concepteur doit prendre en considération les mécanismes de défaillance potentiels de son produit, afin de développer pour chacun d'entre eux un

modèle de durée de vie. La validation de ces derniers peut être réalisée en menant des essais de vieillissement accéléré. Une fois les modèles élaborés, la durée de vie du produit est directement liée à celle du composant le constituant la plus faible [41]. Un aperçu de modèles basés sur la physique de défaillance des condensateurs est rapporté dans [10].

1.1.5. Impact des condensateurs sur la durée de vie des convertisseurs

L'électronique de puissance est aujourd'hui au cœur des systèmes électriques : alimentation sans interruption, transmission électrique de puissance, variation de vitesse, énergies renouvelables, stockage de l'énergie... L'accroissement des puissances disponibles et le besoin en matière d'intégration nécessitent de nouvelles technologies, architectures et topologies de conversion. Au sein de ces systèmes, de longues durées de fonctionnement sont souvent demandées aux convertisseurs d'énergie (Tableau 1.2). Pendant le fonctionnement, le convertisseur est un des maillons faibles qui limite la durée de vie de tout le système. Par exemple, dans l'utilisation des énergies renouvelables, les convertisseurs sont fréquemment les éléments critiques en termes de taux de défaillance, durée de vie, et coût [42]. Une enquête représentative dans [43] conclut que, pour une centrale photovoltaïque de 3.5MW, les onduleurs sont responsables de 37% des maintenances non-programmées et de 59% des coûts associés sur une durée de fonctionnement de 5 années.

Applications	Durées de vie typiques des convertisseurs
Variateurs de vitesse industriels	5 à 20 années (60 000 heures à pleine charge)
Traction ferroviaire	20 à 30 années (73 000-110 000 heures, 10h/jour)
Éoliennes	20 années (120 000 heures, 16h/j)
Panneaux photovoltaïques	30 années (90 000-130 000 heures, 12h/j)
Aérospatial	24 années (100 000 heures de vol)
Automobile	15 années (10 000 heures de fonctionnement, ou 300 000 km)

Tableau 1.2 Durées de vie typiques de l'électronique de puissance dans différentes applications [3], [42]

Comme il est illustré sur le diagramme de gauche de la Figure 1.2, les condensateurs représentent 30% des défaillances dans les convertisseurs d'énergie [44]. Le diagramme de droite de cette figure montre les sources de stress ayant une influence significative sur la fiabilité des convertisseurs [45]. La température possède une influence dominante sur le vieillissement des composants et particulièrement sur les condensateurs.

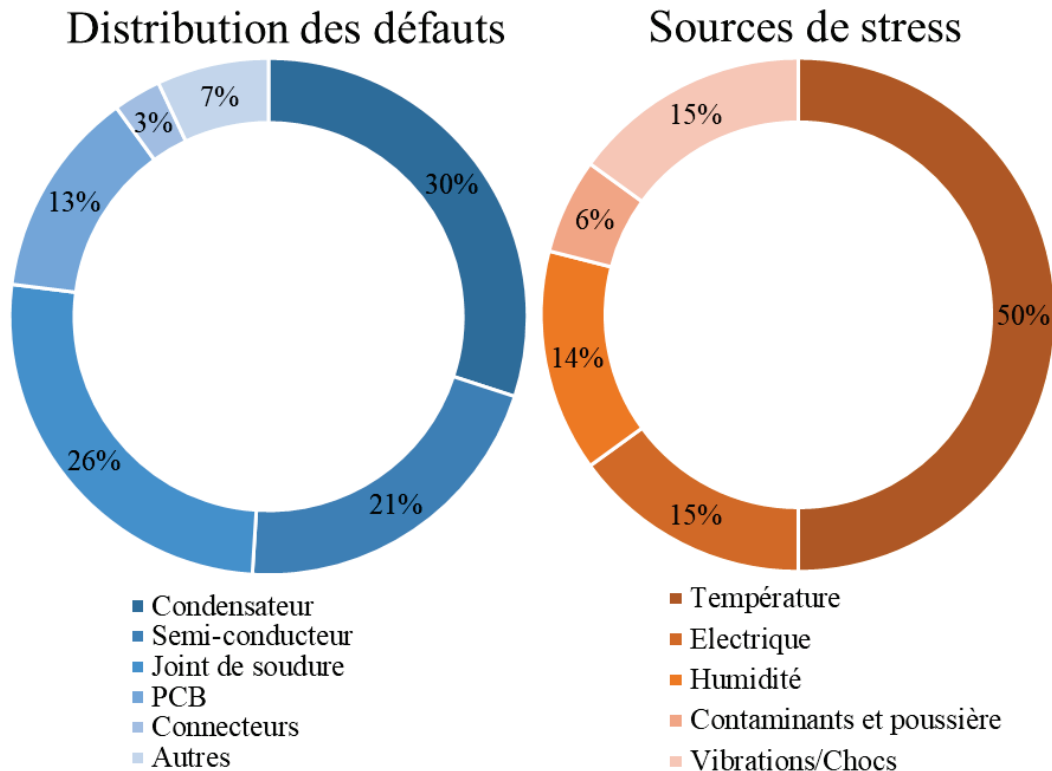


Figure 1.2 Distribution des défauts (à gauche) et des sources de stress (à droite) dans les convertisseurs d'énergie [46], [47]

La défaillance des condensateurs peut conduire à des accidents qui peuvent causer des pertes matérielles et financières et, dans des cas très graves, peut mener à des dégâts humains. Afin de pouvoir appliquer une maintenance préventive conditionnelle, il faut identifier les causes, les mécanismes et les modes qui régissent les défaillances des condensateurs. Ensuite, une sélection des mécanismes potentiels de défaillance est nécessaire afin de réduire le nombre d'indicateurs de vieillissement à suivre. Des modèles de vieillissement liés à ces indicateurs servent à estimer la durée de vie restante et à surveiller l'état de santé des condensateurs. Tous ces aspects sont discutés ci-après et dans les chapitres 2 et 3.

1.2. Les condensateurs

1.2.1. Généralités

Les condensateurs sont utilisés dans de nombreux domaines de l'électronique. Leurs utilisations principales sont les suivantes [48]–[50] : stockage d'énergie (sauvegarde de données, protection de systèmes...), correction du facteur de puissance, régulation de la tension de sortie des alimentations à découpage, filtre d'entrée ou de sortie des convertisseurs statiques, réduction des impédances des lignes, démarrage des moteurs électriques,...

Les contraintes électriques, thermiques et mécaniques liées à l'utilisation de ses composants sont très diverses. Il existe différents types de condensateurs qui permettent de couvrir l'ensemble des besoins des utilisateurs. Trois principaux types de condensateurs peuvent couvrir l'ensemble des besoins des utilisateurs :

- les condensateurs à films plastiques ou papier ;

- les condensateurs céramiques, mica ou verre ;
- les condensateurs électrolytiques à l'aluminium ou au tantale.

1.2.2. Choix des condensateurs

Les deux principaux facteurs à prendre en compte pour le choix d'un type de condensateur sont la capacité et la tension d'utilisation du composant. Parmi tous les types de condensateurs existants, les condensateurs électrolytiques ont une structure qui leur procure des valeurs de capacité très élevées, une excellente efficacité volumique et massique et un excellent compromis capacité-prix [51]. En raison de ces atouts, ce sont les composants préférés pour les applications basses fréquences telles que le filtrage. Néanmoins, leur durée de vie très limitée et leur taux de défaillance relativement élevé sont des inconvénients importants [26], -[27]. Il existe des condensateurs électrolytiques à l'aluminium et au tantale. Dans nos travaux, nous nous focalisons sur les condensateurs électrolytiques à l'aluminium puisque ce sont le plus utilisés dans les convertisseurs pour la fonction de filtrage.

1.2.3. Les condensateurs électrolytiques à l'aluminium

1.2.3.1. Principe et structure

Les condensateurs électrolytiques à l'aluminium sont constitués de deux feuilles d'aluminium et d'une ou plusieurs feuilles de papier imprégnées d'électrolyte (en général de l'acide borique ou benzoïque dissout dans un solvant comme l'éthylène glycol [54]). Les feuilles de papier imprégnées d'électrolyte servent aussi de séparateurs physiques entre les deux électrodes. Une couche d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) constituant le diélectrique est formée sur la surface de la feuille d'anode par électrolyse, avant l'assemblage. Un croquis simplifié d'un tel condensateur est représenté sur la Figure 1.3.

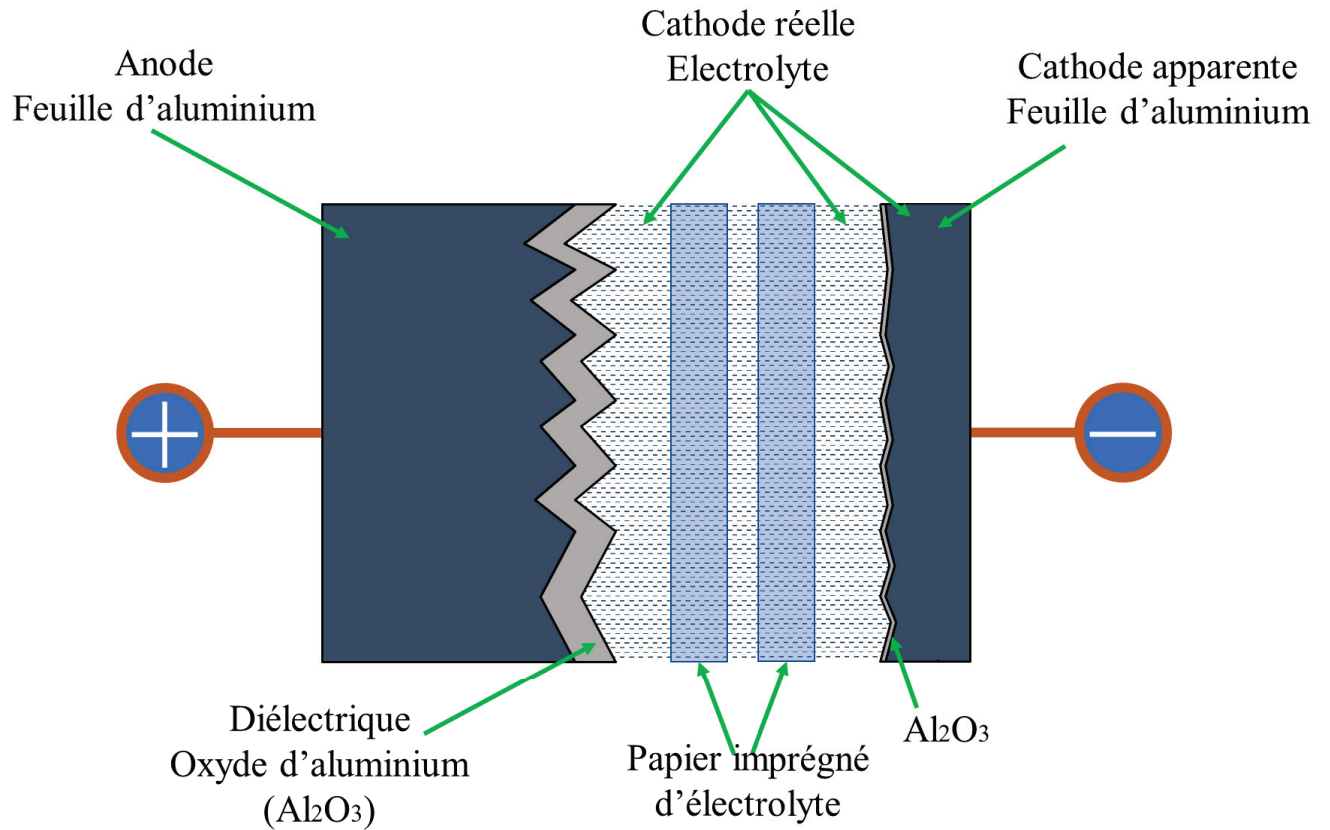


Figure 1.3 Croquis simplifié de l'interface anode-cathode d'un condensateur électrolytique à l'aluminium

Dans le cas d'un condensateur plan idéal, la valeur de la capacité C_{AK} est proportionnelle à la surface S des armatures en regard avec le diélectrique et inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique.

$$C_{AK} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{e} \quad (1.1)$$

Symboles	Significations
ε_0	Permittivité absolue du vide ($\varepsilon_0 = 8,854.10^{-12}$ F/m)
ε_r	Permittivité relative du diélectrique (sans dimension)
S	Surface en regard anode-cathode (m ²)
e	Épaisseur du diélectrique en (m)
C_{AK}	Capacité idéale entre l'anode et la cathode (F)

La gravure de la feuille d'aluminium constituant l'anode (permettant une augmentation de la surface effective de 20 à 100 fois [11]) et la faible épaisseur de la couche d'oxyde (quelques nm à quelques centaines de nm) permet d'obtenir des capacités importantes (de 1μF à ~1F).

Ce type de condensateur est polarisé (couche d'oxyde d'aluminium sur l'anode) et ne peut supporter qu'une très faible tension inverse (quelques volts). Si cette limite de tension inverse est dépassée, une électrolyse au niveau de la cathode aura lieu avec dégagement de dihydrogène gazeux qui, en grande quantité, peut engendrer un risque d'explosion.

À titre d'exemple, la Figure 1.4 représente la structure d'un condensateur électrolytique possédant une connectique à bornes à vis. Le bobinage est placé dans un boîtier aluminium étanche et des bandes de connexion permettent de relier les électrodes aux bornes de connexion. Suivant les boîtiers, un point de rupture ou une valve de sécurité (Figure 1.4) permet l'évacuation d'une éventuelle surpression, en cas d'évaporation de l'électrolyte.

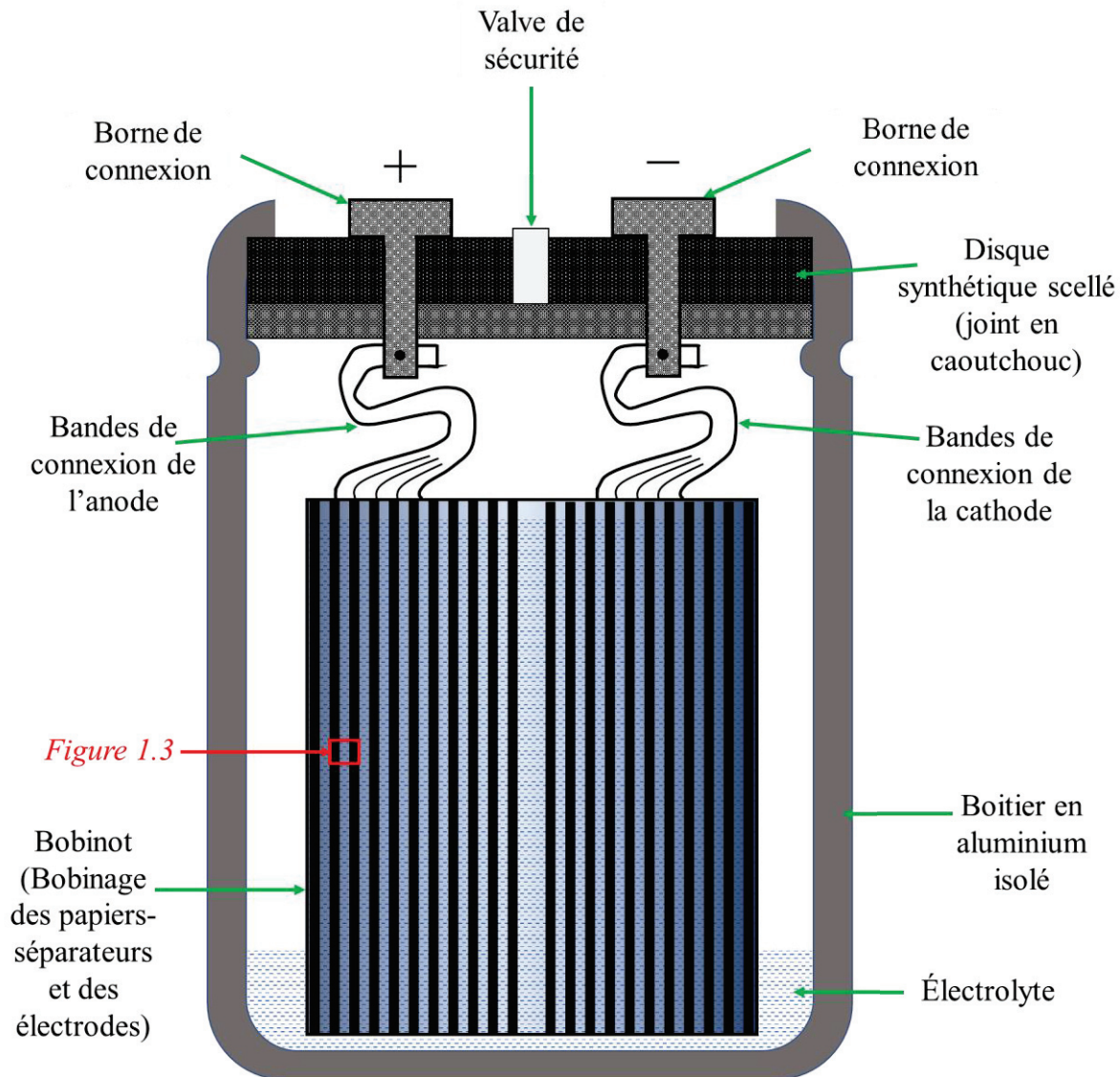


Figure 1.4 Croquis simplifié d'un condensateur électrolytique à l'aluminium

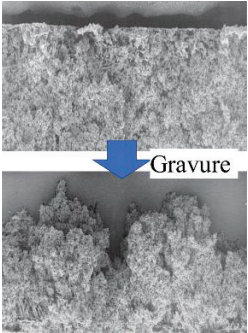
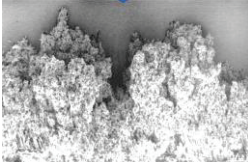
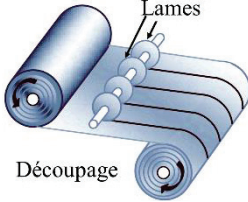
L'électrolyte liquide des condensateurs électrolytiques leur confère des caractéristiques techniques spécifiques :

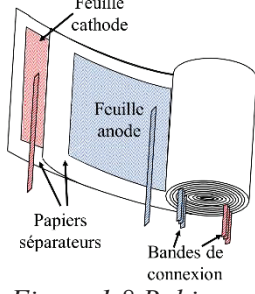
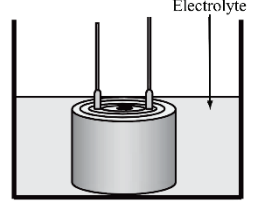
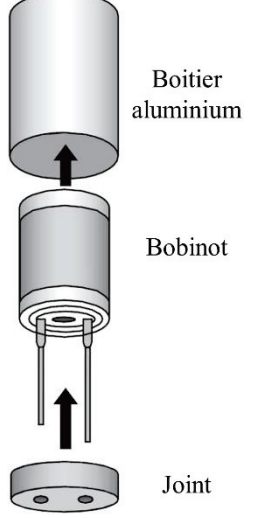
- Le flux de courant électrique à travers l'électrolyte est dû au mouvement des ions. Une augmentation de la température de l'électrolyte diminue ainsi sa viscosité et, à son tour, réduit la résistance électrique (dénommée par la suite résistance équivalente série *ESR*) ;

- Le point d'ébullition de l'électrolyte détermine la température cœur maximale et donc la limite de l'auto-échauffement autorisée qui vient s'ajouter à la température ambiante ;
- La perte d'électrolyte causée par des réactions électrochimiques suite à la reconstruction de la couche diélectrique (auto-régénération de l'oxyde expliqué dans le chapitre 2 §2.2.4) et la diffusion à travers le joint en caoutchouc (séchage) (Figure 1.4) entraînent une dérive des paramètres électriques (ESR et C_{AK}) et une réduction de la durée de vie du condensateur électrolytique.

1.2.3.2. Processus de fabrication d'un condensateur électrolytique à l'aluminium

Les différentes étapes du processus de fabrication d'un condensateur à électrolyte liquide sont détaillées dans le Tableau 1.3 ci-dessous :

1. Gravure des feuilles d'aluminium	La feuille d'anode de 0,05mm à 0,11mm d'épaisseur et éventuellement la feuille de cathode de 0,02mm à 0,05mm d'épaisseur (pour améliorer l'échange avec l'électrolyte) sont gravées par un procédé électrochimique dans une solution de chlorure avec un courant continu ou alternatif (Figure 1.5).	 Figure 1.5 Gravure d'une feuille d'aluminium (400×)
2. Formation de la couche d'oxyde	La couche d'oxyde d'aluminium constituant le diélectrique du condensateur est formée sur l'anode gravée, par électrolyse sous une tension continue supérieure à la tension nominale désirée du composant (Figure 1.6).	Dépôt d'alumine  Figure 1.6 Formation de couche d'oxyde (400×)
3. Découpe des feuilles	Les feuilles d'aluminium sont coupées selon la valeur de capacité et les dimensions géométriques voulues (Figure 1.7).	 Figure 1.7 Découpage des feuilles

4. Bobinage	L'anode et la cathode sont bobinées avec le papier entre les électrodes. Des bandes de connexion réparties sur le bobinage sont serties sur l'anode et la cathode. La Figure 1.8 représente le bobinage d'un condensateur électrolytique.	 Figure 1.8 Bobinage
5. Imprégnation	Le bobinage est imprégné avec l'électrolyte pour imbiber le papier et pénétrer la gravure afin d'effectuer un bon contact électrique entre l'oxyde d'aluminium et la cathode réelle (Figure 1.9). L'imprégnation est effectuée par immersion avec des cycles de pression dépression avec ou sans chauffage.	 Figure 1.9 Imprégnation
6. Assemblage, finition	Le bobinage est assemblé dans un boîtier aluminium étanche. Le type de boîtier ainsi que les connexions externes diffèrent selon la taille du composant. La Figure 1.10 représente la constitution d'un condensateur. Le boîtier est en général relié à la cathode par contact entre elle et le fond du boîtier.	 Figure 1.10 Assemblage
7. Reformage	On applique une tension continue supérieure à la tension nominale aux bornes du composant, mais inférieure à la tension de formation de l'oxyde. Cette tension est appliquée à température maximale du condensateur ou à la température ambiante. Cette étape permet de reformer ou de réparer la couche d'oxyde qui a pu être détériorée localement lors de l'assemblage. Le condensateur est alors prêt (Figure 1.11).	 Figure 1.11 Structure complète du condensateur

8. Inspection et emballage	Après le reformage, les produits sont soumis à des essais de qualités et de vérification de leurs caractéristiques électriques et géométrique puis emballés (Figure 1.12).	 Figure 1.12 Quelques produits finis
----------------------------	--	--

Tableau 1.3 Processus de fabrication des condensateurs électrolytiques[55]–[57]

1.2.3.3. Modèles équivalents et caractéristiques

Un condensateur idéal représenté uniquement par sa capacité (C_{AK}) n'existe pas. Il existe toujours (Figure 1.13) :

- une résistance des connexions, des électrodes et du papier imprégné d'électrolyte pour les condensateurs électrolytiques à l'aluminium (R_S) ;
- une résistance représentant les pertes dans le diélectrique et les fuites entre les deux électrodes compte tenu des défauts du diélectrique (R_P) ;
- une inductance créée par les connexions et les enroulements (L_S).

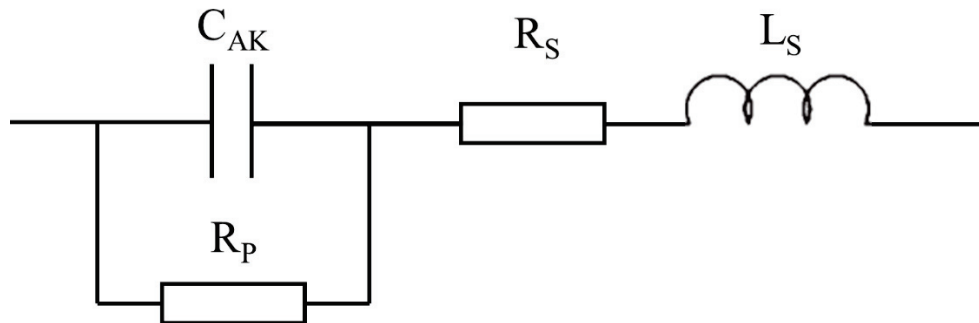


Figure 1.13 Schéma électrique équivalent d'un condensateur

D'autres modèles plus ou moins complexes du condensateur existent dans la littérature [26], [58], mais ils sont construits pour un environnement ou une plage d'exploitation plus particuliers (cyclage thermique, températures négatives...). Le modèle de la Figure 1.13 représente un bon compromis simplicité-précision.

Le schéma de la Figure 1.13 peut être simplifié suivant la représentation normalisée de la Figure 1.14. Il se compose de trois éléments en série :

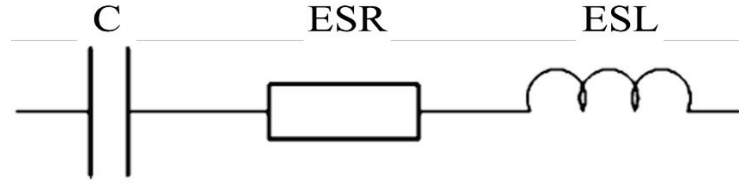


Figure 1.14 Schéma équivalent normalisé d'un condensateur

Symboles	Significations
C	Capacité équivalente série (en F)
ESR	Résistance équivalente série (en Ω)
ESL	Inductance équivalente série (en H)

En identifiant les impédances du circuit représenté ci-dessus avec celui représenté de la Figure 1.13, on obtient les relations suivantes :

$$C(\omega) = C_{AK} \left(1 + \frac{1}{R_P^2 C_{AK}^2 \omega^2} \right) \quad (1.2)$$

$$ESR(\omega) = R_S + \frac{R_P}{1 + R_P^2 C_{AK}^2 \omega^2} \quad (1.3)$$

$$ESL = L_S \quad (1.4)$$

avec : ω la pulsation électrique en (rad/s)

La fréquence de résonance f_r s'exprime par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{ESL \cdot C}} \quad (1.5)$$

La représentation de la Figure 1.14 est intéressante car elle permet le calcul rapide de la fréquence de résonance. C'est aussi ce modèle qui définit les valeurs nominales du condensateur [59], [60].

La Figure 1.15 représente le module de l'impédance complexe $|Z|$ en fonction de la fréquence du module de condensateurs électrolytiques à l'aluminium 1500 μ F / 800 V considéré dans ces travaux. La résistance ESR représente la partie réelle de l'impédance alors que la partie imaginaire est assimilable aux réactances $-1/C\omega$ à basse fréquence et $ESL \cdot \omega$ à haute fréquence.

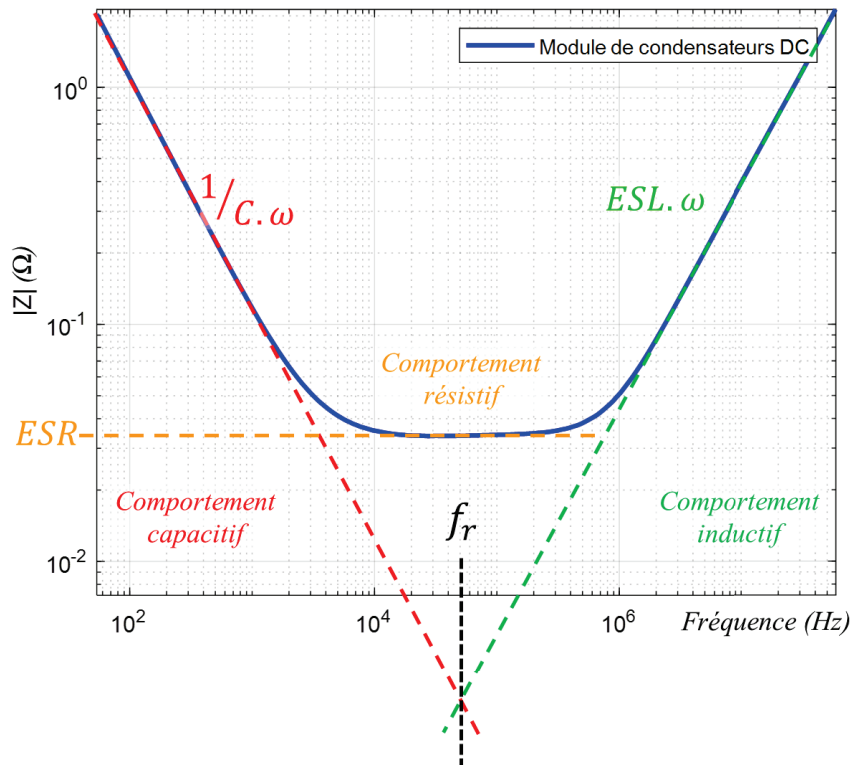


Figure 1.15 Module de $|Z|$ (f) pour un condensateur électrolytique à l'aluminium équivalent $1500\mu\text{F}/800\text{V}$

Dans les applications de conversion de puissance considérée pour cette thèse, les convertisseurs fonctionnent à des fréquences inférieures à la fréquence de résonance f_r des condensateurs. L' ESL des condensateurs peut donc être négligée lors de la représentation du condensateur par le modèle normalisé. On peut alors représenter, en première approximation, le comportement du condensateur par un modèle RC série (Figure 1.16).

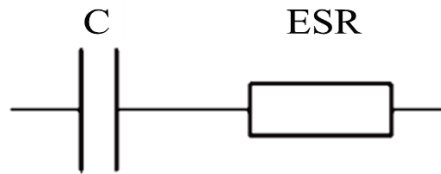


Figure 1.16 Schéma équivalent normalisé d'un condensateur aux basses fréquences

1.2.3.4. Mécanismes, modes et indicateurs de défaillance

Les principales caractéristiques des condensateurs sont, en général, dépendantes de la température, de la fréquence et de la tension. [12], [26], [53], [61]–[64] étudient l'effet des contraintes thermiques sur ces caractéristiques. [12], [53], [61], [63]–[65] examinent l'effet du courant. [61], [64], [66] étudient l'effet de la tension. Enfin, [61], [66] examinent l'effet d'un cyclage continu

charge/décharge des condensateurs électrolytiques. La Figure 1.17 résume les différents mécanismes et modes qui apparaissent suivant chacune des contraintes. Des discussions plus détaillées au sujet des différents mécanismes et modes de défaillance sont données dans [67].

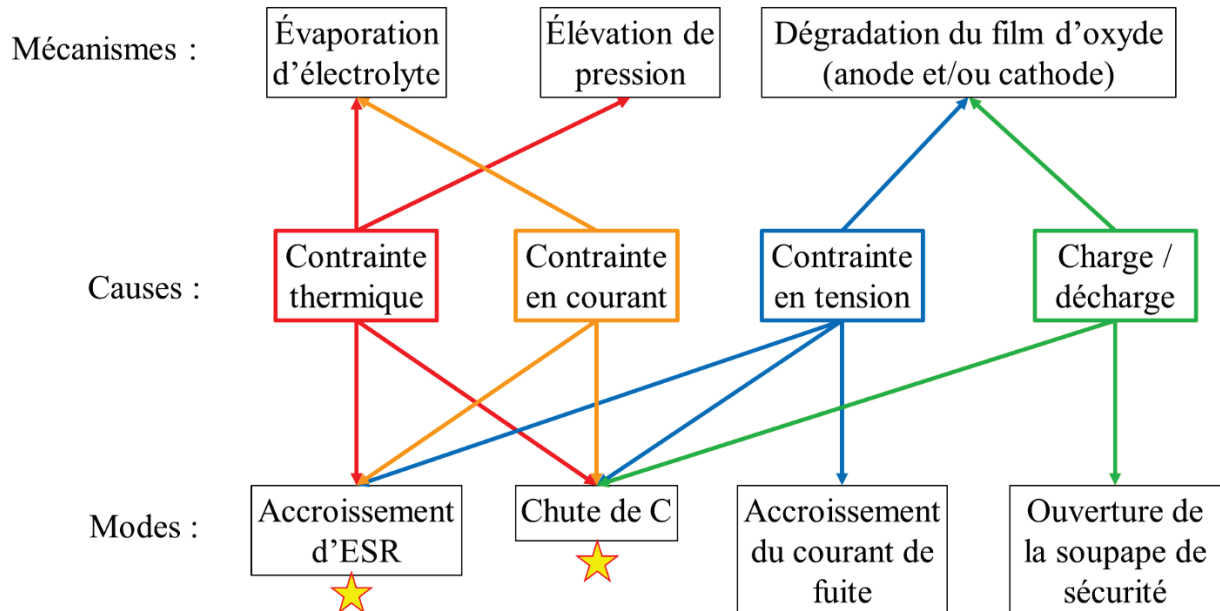


Figure 1.17 Les mécanismes et modes de défaillance en fonction des différentes contraintes [29]-[46]

Les causes de défaillance des condensateurs électrolytiques à l'aluminium sont nombreuses. Certaines d'entre elles peuvent entraîner divers modes de défaillance. Les causes sont généralement soit liées aux défauts de fabrication, soit liées aux contraintes anormales d'utilisation soit liée à l'usure (vieillesse) du composant. La prédiction de défaillance de ces composants, autre que celle due à l'usure ne peut donc être que statistique. L'accroissement de l'ESR et la diminution de C sont des modes de vieillissement génériques qui interviennent après n'importe quels types de contraintes appliquées (cf. Figure 1.17).

Compte tenu des travaux de recherche [29]- [46], des informations fournies par les fabricants [55], [56], [68] et des vieillissements effectués dans notre projet (cf. chapitres 2 et 3), il est possible de résumer les différents mécanismes et modes de défaillance ainsi que leurs causes sur le diagramme synthétique de la Figure 1.18. Cette figure montre, de nouveau, que la quasi-totalité des pannes liées soit à l'usure, soit à une mauvaise utilisation peut être détectée à travers l'évolution des paramètres que sont la résistance équivalente série ESR et/ou la capacité C.

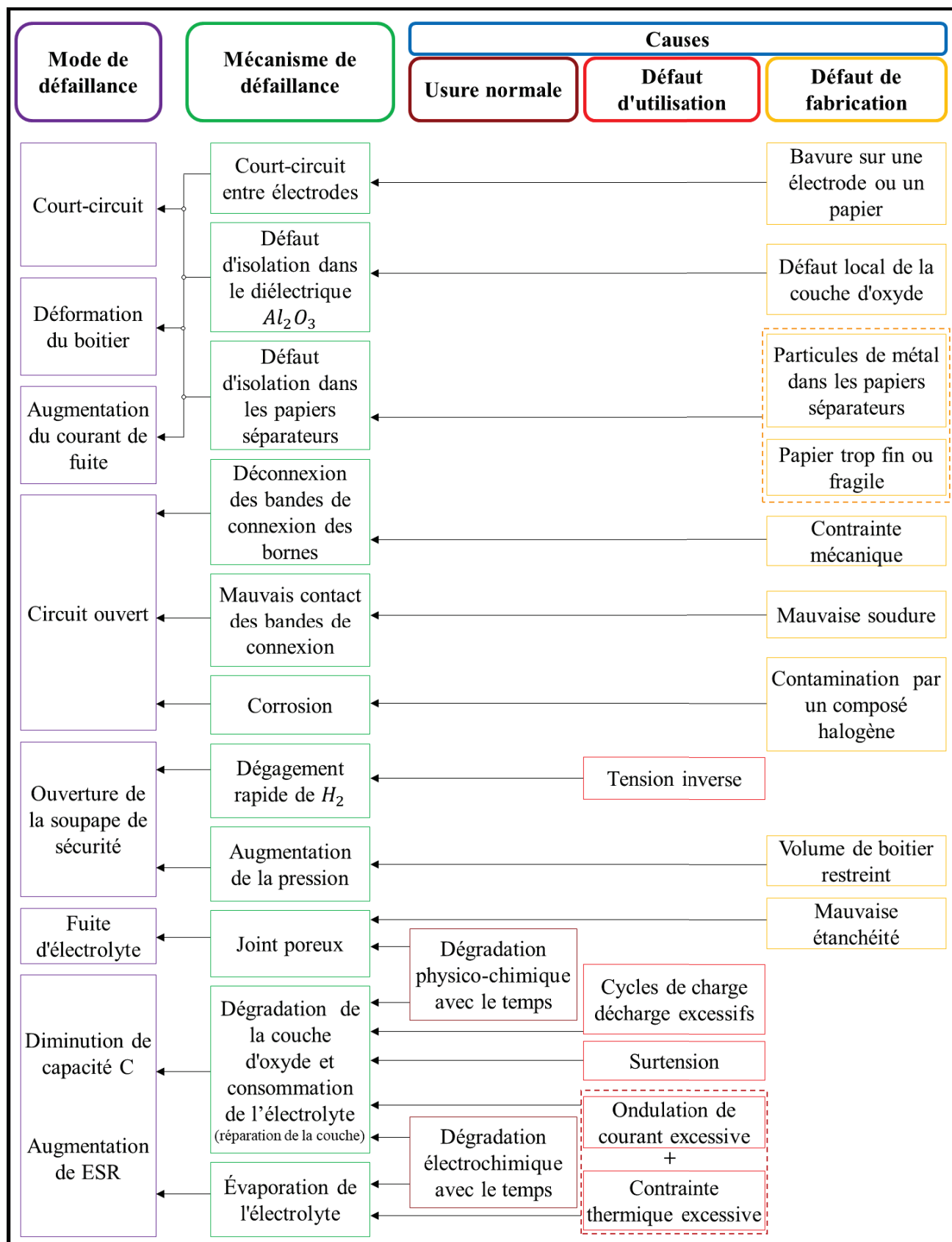


Figure 1.18 Mécanismes, modes et indicateurs de défaillance des condensateurs électrolytiques

1.2.3.5. Indicateurs de défaillance et de vieillissement

Selon leur utilisation, deux paramètres électriques principaux se détériorent en fonction du temps : l'ESR et la capacité C. Selon leurs degrés de dégradation, ces paramètres permettent donc de quantifier et suivre le vieillissement global du condensateur. C'est pour cette raison qu'ils sont nommés, dans la suite, indicateurs de vieillissement.

Les normes industrielles [13], [31], [60], [69] spécifient que la fin de vie d'un condensateur électrolytique sous contraintes thermique et électrique est définie par :

- une augmentation de l'ESR de 100% par rapport à sa valeur initiale et/ou
- une diminution de la capacité de 20% par rapport à sa valeur initiale.

En conséquence, il est important d'avoir une estimation, en temps réel, de ces deux indicateurs de vieillissement. Le chapitre 4 explique la procédure utilisée pour identifier en temps réel ces deux paramètres ESR et C.

Le courant de fuite, quant à lui, n'apporte pas d'information supplémentaire au couple d'indicateurs pour surveiller l'état de santé du composant. D'après les essais de vieillissement menés aux chapitres 2 et 3, ce courant ne présente pas une évolution par dérive, mais plutôt soudaine, et toujours accompagné par des défauts catalectiques (c'est-à-dire catastrophique). Ajoutons à cela, que le courant de fuite reste difficile à quantifier en ligne.

1.3. Méthodes existantes de pronostic des défaillances des condensateurs électrolytiques

1.3.1. Présentation de quelques méthodes existantes

Plusieurs méthodes existent dans la littérature pour détecter le vieillissement des condensateurs électrolytiques [5], [10]–[23]. Les plus significatives pour notre application sont résumées dans le Tableau 1.4 ci-dessous :

Type de contrainte	Réf.	Modèle utilisé	Contribution	Besoin
Température	[12]	Équation d'Arrhenius	Un modèle de physique de défaillance pour prédire le changement de l'ESR en évaluant la perte d'électrolyte est proposé. La durée de vie des condensateurs à différentes températures est calculée selon la loi d'Arrhenius et les résultats sont comparés aux durées de vie obtenues via une loi d'approximation utilisée dans l'industrie.	Essais
	[22]	Équation d'Arrhenius	La méthode permet de prédire la durée de vie d'un condensateur électrolytique via une estimation de l'ESR à l'état actuel et une comparaison à sa valeur à l'état neuf à la température de fonctionnement.	
	[11]			

	[5] [17]	Équation d'Arrhenius + Équation de régression	Pour une température ambiante fixée du condensateur, la durée de vie totale est donnée par l'équation d'Arrhenius. Le temps de fonctionnement du condensateur est obtenu à l'aide d'équations de régression caractérisant les variations temporelles de la capacité C et de l'ESR en fonction de la température. La durée de vie restante est estimée en soustrayant la durée de vie totale à la durée de fonctionnement obtenue par les équations de régression.	de vieillessement accélééré Requis
	[18]	Équation d'Arrhenius + Équation de régression	Une approche de modélisation de la dégradation est proposée dans laquelle les paramètres des équations de régression caractérisant la capacité et l'ESR dans le temps suivent la loi d'Arrhenius. L'augmentation de l'ondulation du courant dans les condensateurs est considérée comme un critère de défaillance. Le délai avant défaillance peut être calculé dans des conditions de fonctionnement à température variable.	
Température + Tension	[14]	Équation d'Arrhenius + Loi de puissance inverse + Équation de régression	Une nouvelle méthode de prévision de la durée de vie des condensateurs est introduite. La durée de vie obtenue s'avère plus précise que les modèles précédents car les condensateurs sont affectés par les tensions appliquées.	
	[19]			
Température + Courant	[21]	Équation d'Arrhenius	Une méthode permet de prédire la durée de vie d'un condensateur électrolytique via une estimation de l'ESR et du courant traversant le condensateur.	
Tension	[15]	Équation de régression	Une méthodologie de prédiction de la vie utile restante pour les condensateurs électrolytiques basée sur un filtre de Kalman est présentée.	
Conditions nominales	[20]	Équation d'Arrhenius + Équation de régression	Dans des conditions nominales, la dérive de l'ESR en fonction du temps est déterminée par le modèle d'Arrhenius (modèle exponentiel). Un modèle de régression au troisième degré est proposé pour la dégradation de la capacité moyenne en fonction du temps.	

Tableau 1.4 Résumé des différents travaux de recherche pour prédire la durée de vie d'un condensateur électrolytique

1.3.2. Inconvénient majeur de ces méthodes

Il est nécessaire de disposer de modèles de dégradation des condensateurs en temps réel prenant en compte les conditions de fonctionnement (température ambiante, tension, courant ondulé, fréquence,

etc.) pour prédire la durée de vie des condensateurs. Il convient de combiner des modèles physiques et des modèles pilotés par les données, pour représenter la dégradation des condensateurs. La modélisation de la dégradation fondée sur la régression est la plus largement utilisée, parmi les approches fondées sur les données. Mais ces modèles basés sur la régression nécessitent de grands ensembles d'échantillons pour augmenter la précision d'estimation. Les travaux menés jusqu'à ce jour se basent sur des essais de vieillissement accéléré pour définir un référentiel de vieillissement. Ceux-ci constituent une phase d'apprentissage primordiale, à réaliser hors-ligne, avant toute évaluation en ligne de la durée de vie des condensateurs (Figure 1.19).

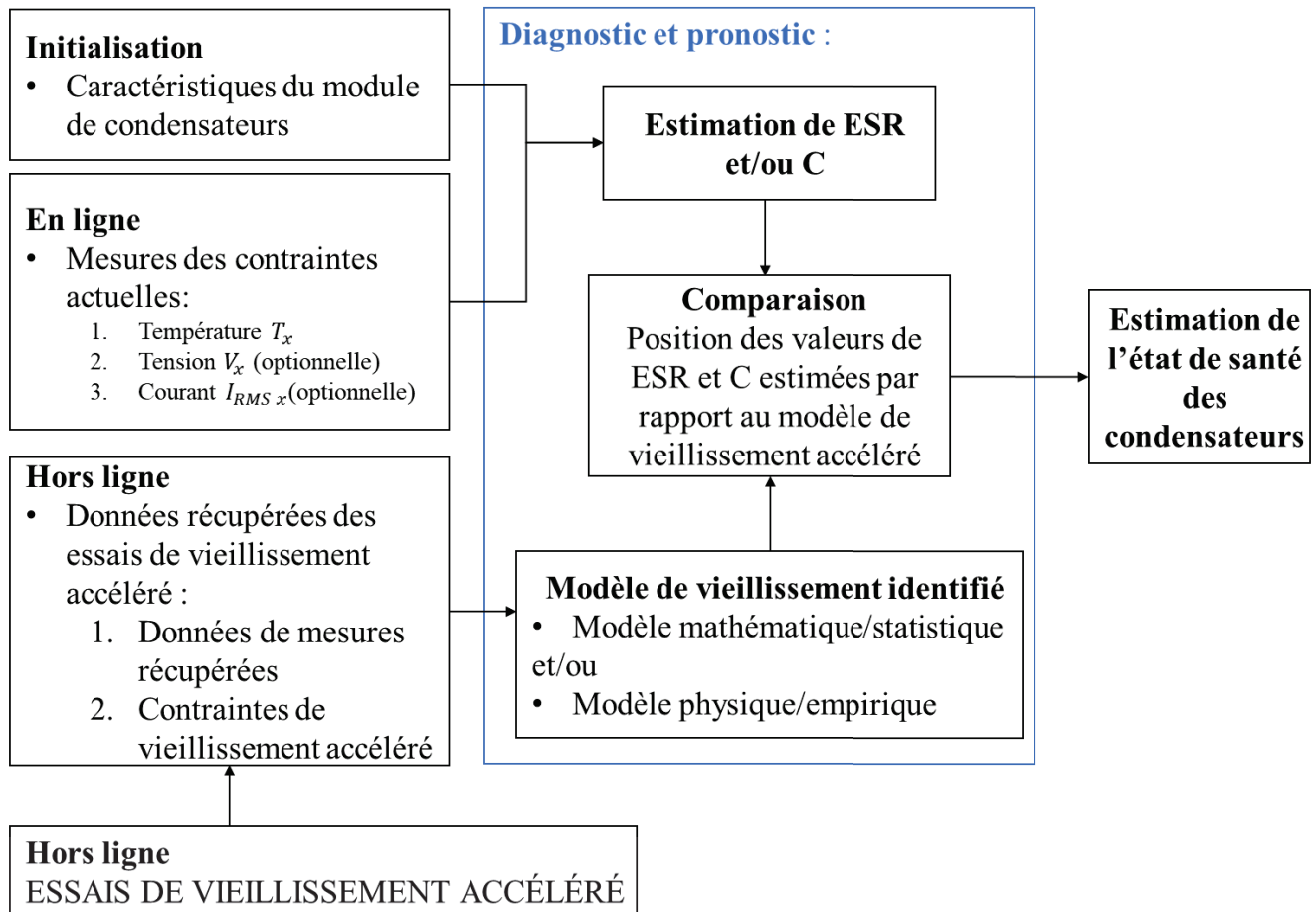


Figure 1.19 Synoptique des techniques existantes de pronostic de défaillances des condensateurs électrolytiques

Dans l'analyse de régression, de nombreuses variables sont sensibles aux bruits générés par les appareils de mesure qui ne sont généralement pas les mêmes pour la phase d'apprentissage (impédancemètre) et la phase d'évaluation (méthode d'identification de ESR et/ou de C embarquée) ou à d'autres paramètres exogènes d'influence, réduisant ainsi le pouvoir de prévision de l'analyse. Il faut aussi remarquer que le fait de devoir réaliser des essais de vieillissement accéléré à chaque nouvelle version de condensateur avant de l'intégrer dans un convertisseur est une tâche à la fois coûteuse et d'une durée relativement longue, ce qui rend cette étape non viable au niveau industriel. Il est donc nécessaire de concevoir une stratégie offrant de meilleures performances en utilisant le moins de ressources hors-ligne au préalable à l'intégration des condensateurs dans les équipements électriques. Cette stratégie permettra non seulement améliorer l'ajustement du modèle, mais également la prédiction de l'état de santé.

1.3.3. Utilisation actuelle par les industriels de la maintenance préventive systématique

Réaliser des essais de vieillissement accéléré à chaque nouvelle version de condensateur avant intégration dans un convertisseur rend les techniques de pronostic présentées précédemment difficilement viable au niveau industriel. Schneider Electric offre à ses clients une garantie de fonctionnement de leurs équipements. Celle-ci nécessite de remplacer les composants à risque de façon périodique pour empêcher les pannes. Une maintenance préventive systématique reste donc souvent le choix préféré des industriels compte tenu de la difficulté de mise en œuvre d'une maintenance préventive conditionnelle.

Pour une génération de convertisseurs dans les alimentations sans interruption, Schneider Electric préconise de remplacer les condensateurs électrolytiques tous les 5 ans. Les condensateurs récupérés ont été analysés et leur état de santé a été évalué. La Figure 1.20 compare les valeurs de ESR et C des condensateurs remplacés au bout de 5 ans par rapport à un essai de vieillissement accéléré de la même version des condensateurs.

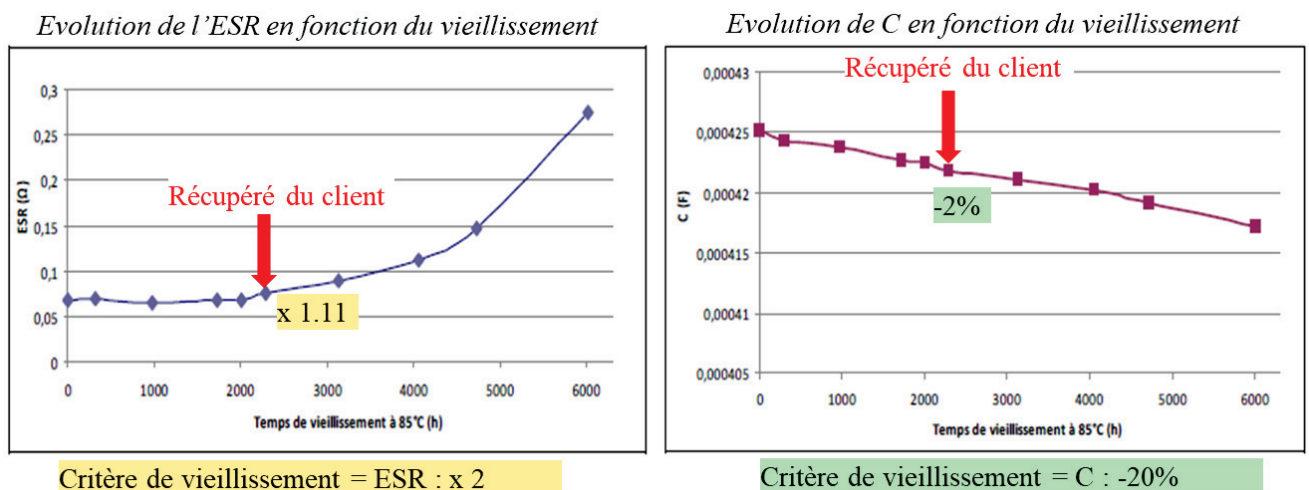


Figure 1.20 Évaluation des indicateurs de vieillissement pour des condensateurs récupérés

Nous pouvons constater que les valeurs de ESR et C sont très loin de leurs seuils de vieillissement limites puisque l'ESR a augmenté de 11% (au lieu de 100% permis) et C a diminué de 2% (au lieu de 20% permis). La maintenance préventive est donc réalisée trop tôt puisque les condensateurs sont encore largement dans les tolérances prévues.

1.4. Présentation du système de surveillance des condensateurs électrolytiques

1.4.1. Principe

Notre objectif est de proposer une nouvelle méthode qui permet de détecter en temps réel l'évolution de l'ESR et de la capacité C en vue de réaliser un système de surveillance et de maintenance préventive conditionnelle des condensateurs électrolytiques.

Le synoptique de ce projet est donnée par la Figure 1.21 :

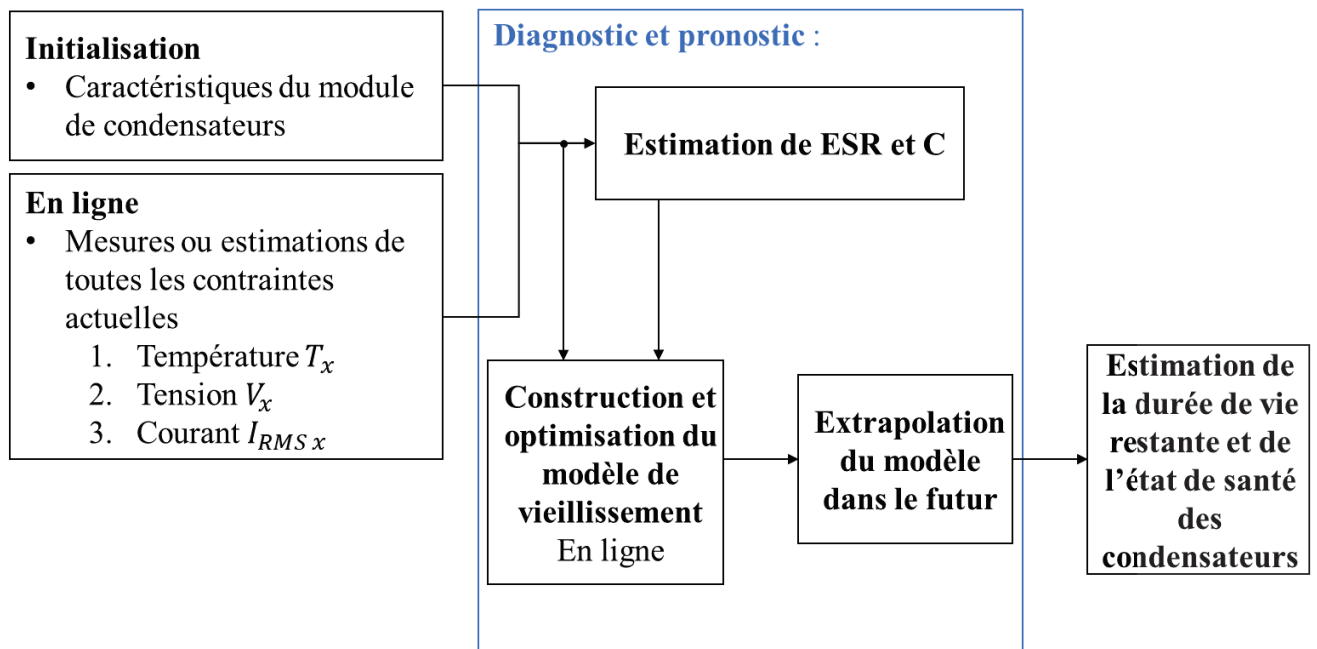


Figure 1.21 Synoptique de la méthode proposée de pronostic de défaillances des condensateurs électrolytiques

Il y a deux grandes phases pour atteindre cet objectif. La première est la création d'une méthode capable d'identifier en temps réel des indicateurs de vieillissement ESR et C de condensateurs quelconques intégrés dans un convertisseur de puissance. La deuxième phase est la mise en place d'un algorithme capable de construire, grâce aux estimations de ESR et C, un modèle de vieillissement en temps réel et de déduire la durée de vie restante des condensateurs. La réalisation et les résultats de ces deux phases sont détaillés respectivement dans les chapitres 4 et 5 de ce mémoire.

1.4.2. Cahier des charges du système de surveillance des condensateurs électrolytiques

L'objectif de nos travaux est de surveiller l'état de santé des condensateurs électrolytiques dans un convertisseur d'énergie. Ce système de surveillance doit être implémenté dans un produit commercial en respectant des contraintes économiques et industrielles qui sont résumées ci-dessous :

- **Économique** : le système doit se contenter des capteurs de mesure déjà présents dans le convertisseur
- **Robuste** : le système doit être capable de fonctionner (estimation des indicateurs de vieillissement et estimation de durée de vie) en dépit des variations de plusieurs paramètres (température, charge appliquée, variation de la tension...)
- **Compétitif au niveau du marché** : le système doit réagir en temps réel et ne doit pas nécessiter une phase d'apprentissage (essais de vieillissement accéléré).
- **Simple à implémenter** : le système proposé doit être implémenté en tâche de fond sans perturber le fonctionnement normal du convertisseur.

Dans le début de ce chapitre, nous avons présenté les exigences de conception et les challenges de fiabilité dans le monde de l'électronique de puissance (§1.1). Dans la deuxième partie, nous avons introduit la technologie des condensateurs électrolytiques (§1.2), les mécanismes et modes de défaillance (Figure 1.18), ainsi que les contraintes électriques ou thermique responsables. Puis nous avons défini les indicateurs de vieillissement, à savoir ESR et C (§1.2.4).

Le modèle électrique « ESR – C » utilisé nous permet de caractériser les condensateurs, et de remonter à leur état de santé.

La prédiction de la durée de vie des condensateurs repose principalement sur des modèles empiriques basés sur la physique de défaillance. Le modèle le plus utilisé pour les condensateurs électrolytiques est présenté dans le chapitre 2. Il se base, d'une part, sur la loi d'Arrhenius, qui décrit l'influence des contraintes liées à la température ambiante et au courant traversant les condensateurs et d'autre part, sur la loi empirique de Coffin-Manson pour la prise en compte de la tension appliquée.

Dans un premier temps (chapitre 2 et 3), nous validerons les différents résultats expérimentaux et de vieillissement des travaux de recherche antérieurs réalisés [11], [13]–[15], [19], [20], [22], [24], [25], [58], [70]–[76] sur différents condensateurs électrolytiques afin de déterminer si les différentes lois d'évolution des paramètres électriques ESR et C en fonction de la température et du temps de vieillissement sont généralisables pour tous les condensateurs électrolytiques. Nos résultats permettront de déterminer les différentes lois d'évolution des indicateurs de vieillissement en fonction du temps de vieillissement et l'influence de la température sur ces derniers.

L'objectif final souhaité est de pouvoir paramétrer ces lois directement à partir de « datasheets » fournies par les fabricants, sans devoir réaliser des essais expérimentaux pour chaque condensateur utilisé. Ces lois d'évolution sont auto-paramétrées par l'algorithme de vieillissement implémenté surveillant les indicateurs de vieillissement en temps réel et permettant ainsi de déterminer le temps restant avant la panne des condensateurs utilisés dans les convertisseurs considérés (Chapitre 4 et 5).

2. Durée de vie des condensateurs électrolytiques et essais de vieillissement accéléré

2.1. Moyens d'évaluation de la durée de vie

2.1.1. Essais de vieillissement accéléré

Les condensateurs électrolytiques utilisés dans les équipements industriels, les véhicules et les avions doivent être garantis pour de longues durées de fonctionnement [2], [11], [67], [71], [77]. Afin d'évaluer la fiabilité d'un système, la collecte d'informations sous des conditions d'utilisation réelles pendant plusieurs années de fonctionnement n'est pas envisageable compte tenu de la durée nécessaire. Pour cette raison, des essais de vieillissement sont menés afin d'accélérer les phénomènes de dégradation en amplifiant les contraintes dans le composant jusqu'à sa défaillance. Ainsi il peut être envisagé d'évaluer la fiabilité et la durée de vie utile d'un condensateur dans un temps relativement court. Des normes internationales comme celles fournies par l'IEC [60], [73], [78] (International Electrotechnical Commission) définissent des conditions typiques pour les essais de vieillissement accéléré. En revanche les procédures d'essai et les paramètres de réglage diffèrent d'un constructeur à un autre. À partir des résultats des essais, un modèle empirique permettant l'estimation de durée de vie en fonction des contraintes subies peut être obtenu.

Les contraintes principales qui influencent la durée de vie des condensateurs sont :

- la température ambiante ;
- la tension qui leur est appliquée à leurs bornes ;
- l'ondulation du courant les traversant.

Ces contraintes doivent quand même rester dans les limites acceptables des spécifications du condensateur pour ne pas engendrer l'apparition de phénomènes totalement différents et non représentatifs d'un vieillissement réel en fonctionnement.

La température est la principale contrainte à prendre en considération pour les composants électroniques car elle a une influence majeure sur leurs taux de défaillance. La température à considérer est celle au cœur du composant, qui est fonction de la température ambiante et de son échauffement créé par dissipation.

La dégradation dans les condensateurs électrolytiques est principalement induite par des phénomènes électrochimiques tels que l'évaporation de l'électrolyte. [79], [80]

La fin de vie est supposée atteinte lorsque certains paramètres (capacité, ESR, courant de fuite) dépassent des valeurs de seuil prédéfinies (Chapitre1 §1.2.4) qui sont :

- La diminution de 20% de la capacité ;
- L'augmentation de 100% de l'ESR ;
- Le dépassement d'une limite établie pour le courant de fuite.

À partir des modèles basés sur les essais de vieillissement accéléré, une extrapolation peut être effectuée pour passer des conditions des essais à celles réelles. En revanche, ces modèles sont limités.

En effet, sans hybridation avec d'autres méthodes issues de la physique de défaillance, ils ne permettent que l'estimation de durée de vie, en cas de contraintes uniformes. Or ce n'est pas forcément le cas dans une application réelle. De amples détails sur les modèles de durée de vie seront donnés dans la suite de ce chapitre (§2.2).

2.1.2. Évaluation de la durée de vie

Plusieurs termes et définitions peuvent être utilisés pour évaluer la durée de vie d'un condensateur électrolytique tels que :

- Endurance life : La méthode pour effectuer un essai d'endurance est décrite dans la norme IEC60384-4. Les condensateurs sont soumis à leur tension nominale et à leur température maximale. Leurs paramètres électriques (capacité, ESR, courant de fuite) sont observés jusqu'à ce que les seuils soient atteints.
- Useful life : Le terme « Useful life » se rapporte à la norme DIN IEC 60384-4 [81] [82]. En plus de la tension nominale et la température maximale, un courant d'ondulation est superposé, ce qui provoque une contrainte thermique supplémentaire par auto-échauffement ainsi que des échauffements localisés.

Lors de la comparaison des données constructeur (datasheet) de condensateurs électrolytiques de différents fabricants, d'autres définitions sont parfois introduites telles que « load life », « life expectancy », « operational life » et « service life » [55], [83]–[85]. De plus, du fait que différentes limites sont utilisées pour définir la fin de vie, certains fabricants utilisent plusieurs définitions, ce qui rend une comparaison des valeurs de durée de vie entre les différents fournisseurs difficile.

Le tableau 1.1 donne deux exemples de fabricants utilisant des termes relatifs à la durée de vie et aux essais accélérés de manière différente [55], [83]–[85].

Pour certains fabricants :					
	Durée de vie	Variation de la capacité	Variation de l'ESR	Courant de fuite	Conditions :
Useful Life	7000h	+/-30% de la valeur initiale	300% de la valeur spécifiée dans le « datasheet »	Inférieur à la valeur spécifiée dans le « datasheet »	-Tension nominale V_0 -Courant efficace nominal I_{RMS0} -Température maximale θ_0
Load life	5000h	+/-20% de la valeur initiale	200% de la valeur spécifiée dans le « datasheet »	Inférieur à la valeur spécifiée dans le « datasheet »	V_0 I_{RMS0} θ_0
Endurance life	5000h	+/-20% de la valeur initiale	130% de la valeur spécifiée dans le « datasheet »	Inférieur à la valeur spécifiée dans le « datasheet »	V_0 θ_0
Shelf Life	1000h	+/-20% de la valeur initiale	200% de la valeur spécifiée dans le « datasheet »	Inférieur à la valeur spécifiée dans le « datasheet »	θ_0
Pour d'autres fabricants :					
	Durée de vie	Variation de la capacité	Variation de l'ESR	Courant de fuite	Conditions :
Load life	5000h	+/-20% de la valeur initiale	200% de la valeur spécifiée dans le « datasheet »	Inférieur à la valeur spécifiée dans le « datasheet »	V_0 θ_0
Endurance life (Operational life test)	5000h	+/-20% de la valeur initiale	200% de la valeur spécifiée dans le « datasheet »	Inférieur à la valeur spécifiée dans le « datasheet »	V_0 I_{RMS0} θ_0
Shelf Life	1000h	+/-20% de la valeur initiale	200% de la valeur spécifiée dans le « datasheet »	Inférieur à la valeur spécifiée dans le « datasheet »	θ_0

Tableau 2.1 Termes relatifs à la durée de vie suivant les essais de vieillissement accéléré réalisés par des fabricants sur les condensateurs selon les conditions définies par les normes [55], [83]–[85]

2.2. Loi de vieillissement des condensateurs électrolytiques

2.2.1. Modèle de durée de vie proposé par les fabricants

La durée de vie des condensateurs électrolytiques dépend en grande partie des conditions d'application : facteurs environnementaux (température, humidité et vibrations) et facteurs électriques (tension de fonctionnement, ondulation de courant et courant de charge / décharge). Lorsque les condensateurs sont utilisés à des fins de filtrage, comme pour les applications usuelles en électronique de puissance, la température ambiante et l'échauffement dû aux ondulations de courant ainsi que la tension appliquée sont des facteurs déterminants de leur durée de vie. Les autres facteurs ont une incidence mineure et peuvent être ignorés.

Les fabricants de condensateurs proposent, dans leurs catalogues, une formule simplifiée d'estimation de la durée de vie des condensateurs en fonction des différentes contraintes [56], [83], [86] :

$$L_x = L_0 \cdot K_T \cdot K_I \cdot K_V \quad (2.1)$$

avec :

$$K_T = 2^{\frac{\theta_0 - \theta_x}{10}} \quad (2.2)$$

$$K_I = 2^{\left(1 - \left(\frac{I_{RMSx}}{I_{RMS0}}\right)^2\right) \frac{\Delta\theta_0}{10}} \quad (2.3)$$

$$K_V = \left(\frac{V_0}{V_x}\right)^n \quad (2.4)$$

Symboles	Significations
L_0	Durée de vie spécifiée (heures) sous un fonctionnement aux conditions extrêmes (température maximale supportée, ondulation de courant maximale permise, tension nominale). Cette valeur est indiquée dans les « datasheets » des condensateurs utilisés.
L_x	Durée de vie à estimer suivant les conditions prévues d'utilisation (heures)
K_T	Facteur multiplicateur de température ambiante
K_I	Facteur multiplicateur de courant
K_V	Facteur multiplicateur de tension
θ_x	Température ambiante prévue (en °C)
θ_0	Température maximale (en °C)
$\Delta\theta_0$	Échauffement interne maximal (en °C)
$V_0 ; I_{RMS0}$	Tension nominale ; courant efficace nominal
$V_x ; I_{RMSx}$	Tension d'application prévue ; courant efficace prévu
n	Constante empirique de sécurité

De la formule (2.2), il peut être déduit que les fabricants supposent qu'une diminution de 10°C entraîne un doublement de la durée de vie des condensateurs [56]. La formule (2.1) provient de la loi de vitesse d'une réaction chimique [87] (cinétique chimique). Très souvent, pour les condensateurs électrolytiques, il est admis que le processus de défaillance est équivalent à une réaction chimique [88].

La loi de vitesse d'une réaction chimique exprime la relation entre la vitesse de réaction et tous les facteurs qui l'influencent. Parmi ces facteurs, sont distingués d'une part les facteurs physiques (en particulier la température) et d'autre part, les quantités (ou les concentrations) des substances (réactifs) présentes dans le milieu réactionnel. La loi de réaction peut s'écrire sous la forme :

$$v = s(T, \dots) \cdot g(c_i) \quad (2.5)$$

Symboles	Significations
v	Vitesse de réaction
$s(T, \dots)$	Coefficient de vitesse qui dépend notamment de la température et peut être représenté par la loi d'Arrhenius
$g(c_i)$	Fonction liée aux quantités des substances dans le milieu réactionnel

Souvent, $g(c_i)$ est mis sous la forme :

$$g(c_i) = \prod_i c_i^{n_i} \quad (2.6)$$

Symboles	Significations
c	Concentration ou quantité d'un réactif
n	Ordre partiel par rapport au réactif
i	Chaque réactif présent

Dans la suite de cette partie (§2.2), il sera démontré que la formule industrielle (2.1) de calcul de durée de vie des condensateurs provient de la loi de vitesse de réaction (2.5) (loi d'Arrhenius, loi de Coffin-Manson, loi d'Eyring) et il sera proposé une formule de calcul, plus précise et plus complète, de la durée de vie des condensateurs électrolytiques.

2.2.2. Influence de la température sur le modèle de durée de vie

La loi d'Arrhenius est la relation utilisée lorsque le facteur d'accélération (ou stress) est la température [89]. Selon Dakin-Arrhenius, une augmentation de température accroît la vitesse de la réaction chimique. La vitesse de dégradation d'un dispositif est proportionnelle à la vitesse d'une réaction chimique et donc croît avec sa température [76], [90], [91]. De ce fait, la vitesse de la réaction chimique sera accélérée par la température T , et par conséquent, la durée de vie L_x , quant à elle, variera avec son inverse $1/T$. Si la température est l'unique facteur qui influence la durée de vie, l'équation est donnée par la relation ci-dessous [92], [93] :

$$\frac{L_x}{L_0} = \frac{v_0}{v_x} = K_T = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.7)$$

Symboles	Significations
E_a	Energie d'activation (en eV)
k	Constante de Boltzmann ($8,617 \cdot 10^{-5} eV/K$)
T_x	Température ambiante (en Kelvin)
T_0	Température maximale (en Kelvin)
L_0	Durée de vie spécifiée (heures) sous un fonctionnement aux conditions extrêmes
L_x	Durée de vie à estimer suivant les conditions prévues d'utilisation (heures)
v_0	Vitesse de réaction sous un fonctionnement aux conditions extrêmes
v_x	Vitesse de réaction suivant les conditions prévues d'utilisation

La loi d'Arrhenius illustrée par l'équation (2.7) permet l'extrapolation de la durée de vie en fonction de la température. Elle donne une bonne approximation de la durée de fonctionnement d'un composant, mais se limite à l'unique effet de la température. Cette estimation dépend également de l'intervalle de l'extrapolation (de la température) ; les valeurs de durée de vie étant d'autant plus précises que la différence entre les deux températures est faible.

2.2.3. Influence de l'ondulation de courant sur le modèle de durée de vie

Un condensateur électrolytique est souvent soumis à des tensions alternatives donc traversé par des ondulations de courant provoquant des pertes par effet Joule.

La puissance P dissipée par le composant est le produit de l'ESR du condensateur avec le courant I au carré, I correspondant à la valeur efficace de l'ondulation de courant. Comme la résistance ESR dépend de la fréquence, le calcul de la puissance P se fait en additionnant les puissances relatives à chacun des harmoniques du courant. Comme l'ESR dépend aussi de la température du composant, elle peut être calculée à la vraie température du condensateur. La puissance a donc comme formule :

$$P = \sum_{f=1}^n ESR_{x,f} \cdot I_{RMSx,f}^2 \quad (2.8)$$

Symboles	Significations
P	Dissipation de puissance interne (en W)
$I_{RMSx,f}$	Courant efficace (en A) à une température T_x donnée pour les fréquences $f_1 \dots f_n$
$ESR_{x,f}$	Résistance équivalente série (en Ω) à une température T_x donnée pour les fréquences $f_1 \dots f_n$

Comme la puissance relative au fondamental f_1 est usuellement dominante par rapport aux puissances des autres harmoniques dans les applications de conversion de puissance, on peut se contenter de celui-ci pour la mesure de l'échauffement et écrire :

$$P = ESR_{x,f1} \cdot I_{RMSx,f1}^2 = ESR_x \cdot I_{RMSx}^2 \quad (2.9)$$

C'est la température T_c au cœur du condensateur qui détermine réellement la durée de vie du condensateur et non la température ambiante. Calculer l'échauffement ΔT_x créé par l'ondulation de courant est donc une étape importante pour obtenir la température cœur. La température cœur est donc donnée par l'équation (2.10).

$$T_{cx} = T_x + \Delta T_x \quad (2.10)$$

Symboles	Significations
T_{cx}	Température cœur (en Kelvin)
ΔT_x	Échauffement interne dû à l'ondulation de courant

La température cœur, à laquelle l'équilibre est atteint entre la production de chaleur et la dissipation, dérive de l'équation (2.11).

$$ESR_x \cdot I_{RMSx}^2 = \frac{\Delta T_x}{\mathcal{R}_{th}} \quad (2.11)$$

Symboles	Significations
$\mathcal{R}_{th}$	Résistance thermique du condensateur entre son cœur et l'air ambiant (en K/W)

En reprenant l'équation (2.7) de la loi d'Arrhenius pour la température cœur au lieu de la température ambiante, on obtient :

$$\frac{L_x}{L_0} = \frac{\nu_0}{\nu_x} = K_{TI} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{cx}} - \frac{1}{T_{c0}} \right)} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x + \Delta T_x} - \frac{1}{T_0 + \Delta T_0} \right)} \quad (2.12)$$

Symboles	Significations
T_{cx}, T_{c0}	Températures cœurs en Kelvin (K) respectivement actuelle et maximale
K_{TI}	Facteur multiplicateur de température ambiante et de l'ondulation du courant. Ce facteur remplace $K_T \cdot K_I$ de la formule initiale

En remplaçant les échauffements en considérant l'équation (2.11) on obtient :

$$K_{TI} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x + \mathcal{R}_{th} \cdot ESR_x \cdot I_{RMSx}^2} - \frac{1}{T_0 + \mathcal{R}_{th} \cdot ESR_0 \cdot I_{RMS0}^2} \right)} \quad (2.13)$$

À partir de l'équation (2.13), on peut retrouver en partie l'équation (2.1) proposée par les fabricants.

L'équation d'Arrhenius souvent exprimée dans la littérature considère la température en Celsius :

$$K_{TI} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_K + \theta_{cx}} - \frac{1}{T_K + \theta_{c0}} \right)} \quad (2.14)$$

Symboles	Significations
T_K	$= 273.15K$
θ_{cx}, θ_{c0}	Températures en Celsius (°C)

Pour le terme à l'intérieur de l'exponentielle, une approximation linéaire aux alentours de 0 des variables $\frac{\theta_{cx}}{T_K}$ et $\frac{\theta_{c0}}{T_K}$ (développement limité du 1^{er} ordre) donne l'approximation suivante :

$$\begin{aligned} & \frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_K + \theta_{cx}} - \frac{1}{T_K + \theta_{c0}} \right) \\ &= \frac{E_a}{k \cdot T_K} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\theta_{cx}}{T_K}} - \frac{1}{1 + \frac{\theta_{c0}}{T_K}} \right) \\ &\approx \frac{E_a}{k \cdot T_K} \cdot \left(1 - \frac{\theta_{cx}}{T_K} - \left(1 - \frac{\theta_{c0}}{T_K} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

En tenant compte de cette approximation, l'équation de la durée de vie peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$K_{TI} \approx e^{\frac{E_a}{k \cdot T_K^2} \cdot (\theta_{c0} - \theta_{cx})} \quad (2.16)$$

En remplaçant le terme $\frac{E_a}{k \cdot T_K^2}$ par une constante $\frac{1}{M}$ et $(\theta_{c0} - \theta_{cx})$ par $\Delta\theta$, on obtient :

$$K_{TI} \approx e^{\frac{\Delta\theta}{M}} \quad (2.17)$$

Cette équation permet d'exprimer un concept empirique industriel souvent utilisé pour les composants de stockage tels que les condensateurs électrolytiques : la durée de vie d'un tel composant est divisée par 2 pour toute augmentation de 10 °C. Une telle tendance n'est respectée que si la constante est choisie telle que :

$$\text{Pour } \Delta\theta = 10^\circ C, \quad e^{\frac{\Delta\theta}{M}} = \frac{1}{2}, \text{ cela implique que } M = \frac{10}{\ln(2)}$$

Remplacer la constante M par sa tendance empirique donne l'équation simplifiée suivante :

$$K_{TI} \approx 2^{\frac{(\theta_{c0} - \theta_{cx})}{10}} \quad (2.18)$$

En développant l'équation (2.13), on obtient :

$$K_{TI} \approx 2^{\frac{\theta_0 + \Delta\theta_0 - (\theta_x + \Delta\theta_x)}{10}} = 2^{\frac{\theta_0 - \theta_x}{10}} \cdot 2^{\frac{\Delta\theta_0 - \Delta\theta_x}{10}} \quad (2.19)$$

Une équation approximative entre l'échauffement et le courant ondulé peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{\Delta\theta_x}{\Delta\theta_0} = \frac{\mathcal{R}_{th} \cdot ESR \cdot I_{RMSx}^2}{\mathcal{R}_{th} \cdot ESR \cdot I_{RMS0}^2} = \left(\frac{I_{RMSx}}{I_{RMS0}} \right)^2 \quad (2.20)$$

En factorisant par $\Delta\theta_0$ et en remplaçant le terme de l'équation (2.20) dans l'équation (2.19), on obtient [86], [94] :

$$K_{TI} \approx 2^{\frac{\theta_0 - \theta_x}{10}} \cdot 2^{\left(1 - \left(\frac{I_{RMSx}}{I_{RMS0}} \right)^2 \right) \frac{\Delta\theta_0}{10}} = K_T \cdot K_I \quad (2.21)$$

La formule industrielle simplifiée avec les facteurs K_T et K_I vient donc d'être démontrée. Par la suite, nous ne considérerons que l'équation d'Arrhenius exacte (2.14).

2.2.4. Influence de la tension sur le modèle de durée de vie

Plus la tension nominale des condensateurs électrolytiques est importante, plus le champ électrique appliqué devient important. Par conséquent, la tension appliquée peut affecter leur durée de vie, car elles exercent une contrainte sur la couche diélectrique. Plus la tension de fonctionnement est proche de celle nominale, plus les ions de l'électrolyte sont consommés pour la cicatrisation de petits défauts de la couche diélectrique, appelée auto-régénération. Ainsi, une tension de fonctionnement inférieure à la tension nominale peut prolonger la durée de vie des condensateurs.

En effet, l'épaisseur de la couche d'oxyde (diélectrique) détermine la tenue en tension (1,1-1,5nm / volt). Plus la tension à supporter V_x est grande, plus l'épaisseur e_x du diélectrique doit être importante (Figure 2.1), donc :

$$\text{pour } V_x \leq V_0 \text{ alors } e_x \leq e_0 \quad (2.22)$$

Symboles	Significations
e_0	L'épaisseur de diélectrique correspondante à V_0
e_x	L'épaisseur de diélectrique correspondante à V_x

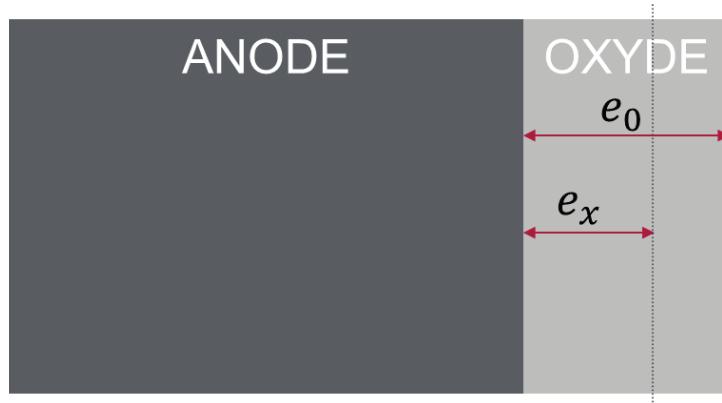


Figure 2.1 Effet de la tension sur l'épaisseur du diélectrique

Le phénomène qui contrôle la vitesse de réaction est ici probablement la dissolution chimique du film d'oxyde. Avec le temps et la température, l'oxyde se dissout et s'amincit. La tension appliquée requiert une épaisseur minimum pour empêcher le phénomène de claquage. Une fois que l'épaisseur nécessaire au maintien de tension est dépassée, le phénomène d'auto-cicatrisation a lieu instantanément (Figure 2.2).

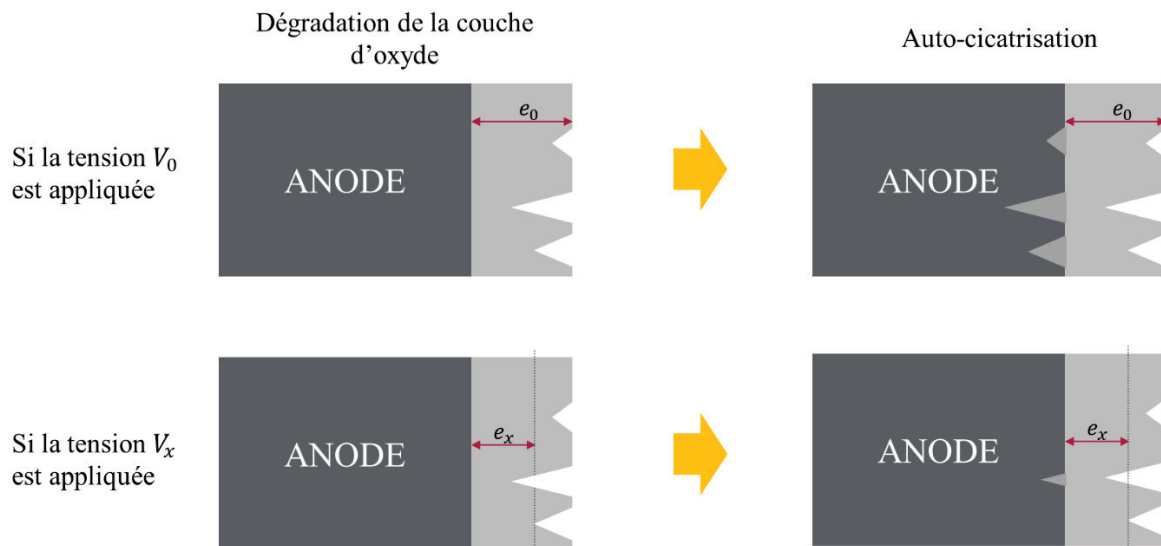
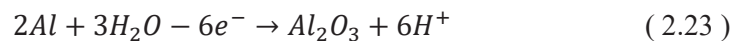


Figure 2.2 Phénomènes de dégradation et d'auto-cicatrisation de la couche d'oxyde

En effet, plus il y a de phénomènes d'auto-cicatrisation, plus les ions de l'électrolyte sont consommés, suivant l'équation anodique suivante :



Les ions hydrogène formés dans la réaction (1.23) vont réagir avec les électrons fournis par la cathode pour créer du dihydrogène gazeux (Figure 2.3) suivant l'équation suivante :





Figure 2.3 Dégagement de dihydrogène

À l'état d'équilibre, la dissolution de l'oxyde est juste contrebalancée par la formation d'oxyde. Le résultat final est la consommation de l'aluminium et la production d'hydrogène.

Le modèle utilisé pour étudier l'influence de la tension K_V dérive de la loi de Coffin-Manson ou « loi de puissance inverse » [95]. En pratique, si la tension de fonctionnement est inférieure à la moitié de la tension nominale, le facteur K_V n'est plus inclus dans le modèle d'estimation de la durée de vie proposé car la tension n'aura plus d'effet sur le vieillissement. Le facteur de tension peut être exprimé comme suit [83] :

$$K_V = \left(\frac{V_0}{V_x} \right)^n \quad (2.25)$$

Une relation peut exister entre K_V de l'équation (2.25) et $g(c_i)$ de l'équation (2.6). En effet suivant les équations (2.22), (2.23) et (2.24), on peut déduire que plus la tension est élevée plus il y a de phénomènes d'auto-cicatrisation donc de quantités de réactifs mis en jeux.

$$g(c_i) = \prod_i c_i^{n_i} \approx \left(\frac{Q_x}{Q_0} \right)^n \approx \left(\frac{V_x}{V_0} \right)^n \approx \frac{1}{K_V} \quad (2.26)$$

Symboles	Significations
Q_0	Charge électrique maximale du condensateur, quantité d'électrons en Coulomb (C)
Q_x	Charge électrique actuel du condensateur, quantité d'électrons en Coulomb (C)

L'exposant n peut varier entre 1 et 6 selon la Figure 2.4 d'après [96].

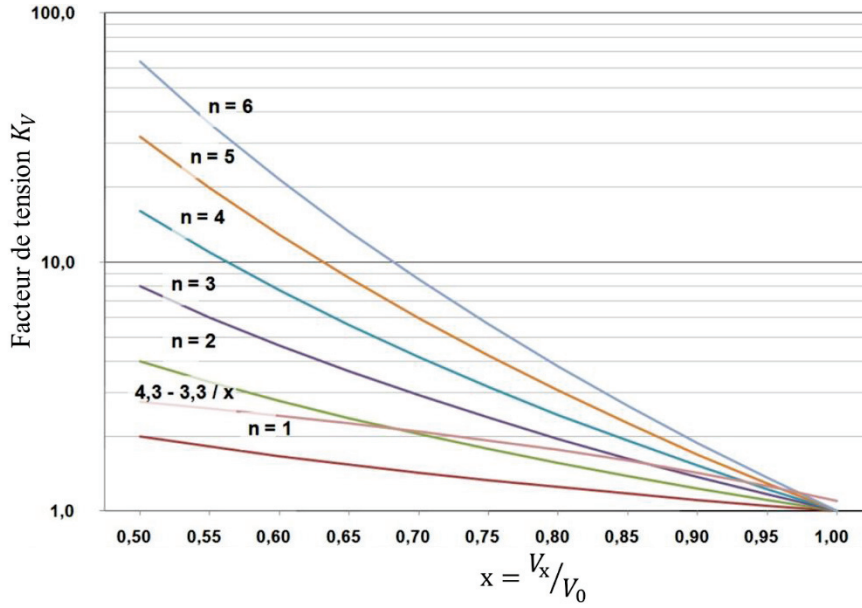


Figure 2.4 Facteur multiplicateur de tension K_V suivant différents fabricants et pour différents exposants n [96]

Pour la plupart des fournisseurs, l'exposant n est fixé suivant les conditions suivantes [56], [83]

:

$$\begin{aligned} 0.5 \leq \frac{V_0}{V_x} \leq 0.8 &\rightarrow n = 3 \\ 0.8 < \frac{V_0}{V_x} \leq 1 &\rightarrow n = 5 \end{aligned} \quad (2.27)$$

Remarque : pour les condensateurs électrolytiques de petite taille, la durée de vie est gouvernée majoritairement par la température (consommation de l'électrolyte) donc le facteur de tension K_V est estimé à 1.

2.2.5. Modèle le plus exact d'estimation de la durée de vie des condensateurs électrolytiques

L'équation complète du modèle d'estimation de la durée de vie des condensateurs électrolytiques est basée sur les facteurs décrits précédemment. La formule finale peut être exprimée comme suit :

$$L_x = L_0 \cdot K_{TI} \cdot K_V = L_0 \cdot e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x + R_{th} \cdot ESR_x \cdot I_{RMSx}^2} - \frac{1}{T_0 + R_{th} \cdot ESR_0 \cdot I_{RMS0}^2} \right)} \left(\frac{V_0}{V_x} \right)^n \quad (2.28)$$

Dans cette équation, outre la constante de Boltzmann k , on retrouve T_x , I_{RMSx} , V_x , ESR_x et ESR_0 qui sont des paramètres qui seront identifiés en ligne. Les paramètres T_0 , I_{RMS0} , V_0 , E_a , n et R_{th} sont donnés dans les documents constructeurs (« datasheet » et « technical notes »). En se basant sur plusieurs de ces documents [12], [68], [74], [96], [97], les trois derniers termes ont des valeurs comprises dans les intervalles précisés ci-dessous :

$$\begin{aligned} E_a &= [0.3eV ; 0.95eV] \\ n &= [1 ; 6] \\ R_{th} &= [0.5^\circ C/W ; 9^\circ C/W] \end{aligned} \quad (2.29)$$

Remarque : notons que ce modèle de durée de vie peut être dérivé du modèle d'Eyring qui généralise la loi d'Arrhenius afin d'intégrer de multiples contraintes dans le calcul du taux de dégradation [98]. Le modèle avec la prise en compte de la température et de deux contraintes supplémentaires prend la forme générale :

$$L_x = A \cdot T_x^\alpha e^{\left[\frac{E_a}{kT_x} + \left(B + \frac{C}{T_x} \right) S_{1x} + \left(D + \frac{E}{T_x} \right) S_{2x} \right]} \quad (2.30)$$

Symboles	Significations
A	Constante liée au processus spécifique modélisé
T	Température absolue (K)
α, B, C, D, E	Constantes d'accélération et d'interaction
S_1, S_2	Les contraintes (stress) ; fonctions du courant et de la tension dans notre cas d'étude

Les contraintes supplémentaires S_1 et S_2 , sont les deux variables influençant la durée de vie, correspondant à la tension de polarisation et au courant d'ondulation. Les constantes α, C, E expriment une interdépendance entre la température T et les différentes contraintes. Pour rendre ces différentes contraintes indépendantes les unes des autres, il suffit de mettre ces coefficients à 0.

Dans notre application, on peut admettre qu'il n'y a pas de corrélation directe entre la température ambiante et la contrainte de tension, donc $\alpha = 0, E = 0$. En revanche, il existe une interdépendance entre la température du composant et le courant interne $C \neq 0$ et $B = 0$. Le modèle d'estimation de la durée de vie dérivé de (2.30) peut donc s'exprimer par :

$$\frac{L_x}{L_0} = \frac{A \cdot e^{\left[\frac{E_a}{kT_x} + \frac{C}{T_x} S_{1x} + D \cdot S_{2x} \right]}}{A \cdot e^{\left[\frac{E_a}{kT_0} + \frac{C}{T_0} S_{10} + D \cdot S_{20} \right]}} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right) + \left(\frac{C}{T_x} S_{1x} - \frac{C}{T_0} S_{10} \right) + D(S_{2x} - S_{20})} \quad (2.31)$$

Pour rapprocher l'équation (2.31) de la formule finale (2.28) décrivant le processus de vieillissement dans notre application, les paramètres $B, S_{1x}, S_{10}, D, S_{2x}, S_{20}$ peuvent être identifiés par les équations (2.32) ce qui engendre les identifications indiquées dans le *Tableau 2.2 Constantes et stress identifiés dans l'équation d'Eyring*

$$e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right) + \left(\frac{C}{T_x} S_{1x} - \frac{C}{T_0} S_{10} \right)} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x + R_{th} \cdot ESR_x \cdot I_{RMSx}^2} - \frac{1}{T_0 + R_{th} \cdot ESR_0 \cdot I_{RMS0}^2} \right)} \quad (2.32) a$$

$$e^{D(S_{2x}-S_{2o})} = \left(\frac{V_0}{V_x}\right)^n \quad (2.32) \text{b}$$

Symboles	Paramètres
C	$\frac{E_a}{k}$
S_{1x}	$\frac{-\Delta T_x}{T_x + \Delta T_x} = \frac{-\mathcal{R}_{th} \cdot ESR \cdot I_{RMSx}^2}{T_x + \mathcal{R}_{th} \cdot ESR \cdot I_{RMSx}^2}$
S_{1o}	$\frac{-\Delta T_0}{T_0 + \Delta T_0} = \frac{-\mathcal{R}_{th} \cdot ESR \cdot I_{RMS0}^2}{T_0 + \mathcal{R}_{th} \cdot ESR \cdot I_{RMS0}^2}$
D	$-n$
S_{2x}	$\ln(V_x)$
S_{2o}	$\ln(V_0)$

Tableau 2.2 Constantes et stress identifiés dans l'équation d'Eyring

En remplaçant les termes identifiés dans l'équation (2.30), nous obtenons alors :

$$L_x = A. e^{\left[\frac{E_a}{k} \frac{1}{T_x} - \frac{E_a}{kT_x} \frac{\Delta T_x}{T_x + \Delta T_x} - n \ln(V) \right]} \quad (2.33)$$

2.3. Présentation des essais expérimentaux de vieillissement

2.3.1. Présentation des condensateurs en essai

Les condensateurs utilisés pour notre étude sont de type aluminium à électrolyte liquide. Leurs valeurs nominales principales sont de 390µF/500V pour une gamme de température d'utilisation standard de - 25°C à 85°C. Ce type de condensateurs est principalement utilisé pour le filtrage dans les convertisseurs statiques.

Les composants en essai sont issus de deux fabricants et présentent des caractéristiques électriques et géométriques semblables. Ils sont utilisés dans le même produit de Schneider Electric (UPS Symmetra : famille d'alimentation sans interruption « Uninterruptible Power Supply »).

Différents essais de vieillissement ont été réalisés afin de déterminer ou valider au mieux les lois de durée de vie utilisées.

Les différents condensateurs issus de divers fabricants sont notés A et B.

Les caractéristiques géométriques et électriques principales, fournies par les constructeurs, sont récapitulées dans le *Tableau 2.3*.

Caractéristiques	Fabricants A et B
Forme	Cylindrique
Dimensions	Diamètre : 35 mm Hauteur : 50 mm
Capacité ($\pm 20\%$)	390 μF
Plage de température de fonctionnement (θ)	-25 / 85 °C (θ_0)
Tension nominale (V_0)	500 V
Courant efficace admissible (I_{RMS0} à 120 Hz)	2.3 A
Max courant de fuite I_L (V_0 , 5min, 20°C)	1.5 mA
Max ESR (120Hz, 20°C)	320m Ω
Max impédance Z (20kHz, 20°C)	250 m Ω
Load Life (θ_0, V_0, I_{RMS0})	5000h $\left(\begin{array}{l} \Delta C \leq \pm 20\% \text{ à } 120\text{Hz} \\ \Delta ESR \leq 200\% \text{ à } 120\text{Hz} \\ I_L \leq \text{mx courant fuite spécifié} \end{array} \right)$
Shelf Life (θ_0)	2000h $\left(\begin{array}{l} \Delta C \leq \pm 20\% \text{ à } 120\text{Hz} \\ \Delta ESR \leq 200\% \text{ à } 120\text{Hz} \\ I_L \leq \text{mx courant fuite spécifié} \end{array} \right)$

Tableau 2.3 Caractéristiques géométriques et électriques des condensateurs en essai

2.3.2. Caractérisations systématiques des condensateurs en essai

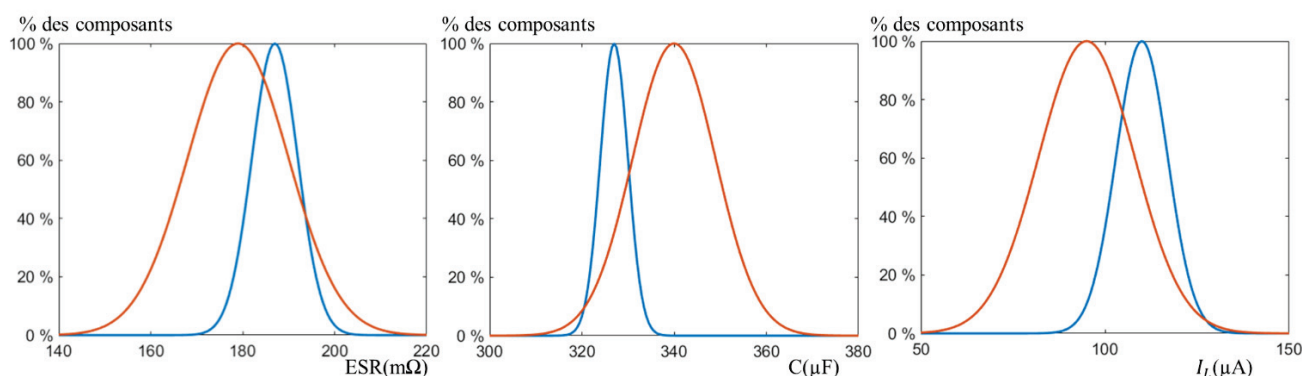
Les condensateurs ont été caractérisés à des intervalles de temps plus ou moins constants tout au long des essais de vieillissement accélérés.

La caractérisation électrique des condensateurs a été faite selon deux méthodes distinctes : en fréquence et en continu. Les mesures fréquentielles permettent d'acquérir les paramètres ESR et de la capacité série C en fonction de la fréquence. Les mesures en continu permettent d'acquérir la valeur du courant de fuite I_L mesuré 5 minutes après la charge du condensateur à travers une résistance de 1k Ω [59].

Le *Tableau 2.4* et la *Figure 2.5* ci-dessous représentent les valeurs moyennes des principaux paramètres électriques mesurés de 50 condensateurs neufs ainsi que les écarts-types de ces valeurs pour chaque fabricant à une température de 20°C.

Caractéristiques	Fabricant A	Fabricant B
ESR à 120 Hz ($m\Omega$)	187	179
Ecart-type de ESR ($m\Omega$)	± 5	± 11
C à 120 Hz (μF)	327	340
Ecart-type de C (μF)	± 3	± 9
I_L à 5min (μA)	110	95
Ecart-type de I_L (μA)	± 7	± 13

Tableau 2.4 Valeurs moyennes initiales des paramètres électriques avec leurs écarts-types

Figure 2.5 Distribution de ESR et C à 120Hz et I_L à 5min pour les composants sains du fabricant A (courbe bleue) et du fabricant B (courbe rouge)

Les condensateurs du fabricant B présentent des valeurs moyennes d'ESR, de C et de I_L meilleures mais des écarts-types plus importants que pour les composants du fabricant A. Les écarts-types permettent d'évaluer la maîtrise de la fabrication des différents constructeurs. Pour la capacité, les différences sont principalement dues à la qualité de la gravure de l'anode qui influence, dans de fortes proportions, sa valeur. Les variations de l'ESR sont surtout dues à la qualité de l'électrolyte et de la connectique. Les dispersions entre C et ESR ne sont donc pas liées entre elles car elles ne sont pas liées au même phénomène. En considérant les tolérances des fabricants sur la capacité de $\pm 20\%$, tous les composants satisfont à la valeur nominale de capacité et les valeurs de l'ESR et de I_L sont dans tous les cas inférieures aux données maximales constructeur. Nous analysons par la suite ces dispersions en fonction des défaillances constatées sur les différents composants.

Nous avons étudié l'évolution de la masse des condensateurs en fonction du vieillissement. La masse initiale des composants en essai différait selon le fabricant (Tableau 2.5). Les condensateurs du fabricant A ont plus d'électrolyte et/ou une solution électrolytique plus dense et/ou plus de bandes de connexion et/ou des électrodes plus épaisses.

Fabricant	Masse (g)
A	71.9 ± 0.7 g
B	66 ± 2 g

Tableau 2.5 Masse des condensateurs de chaque fabricant

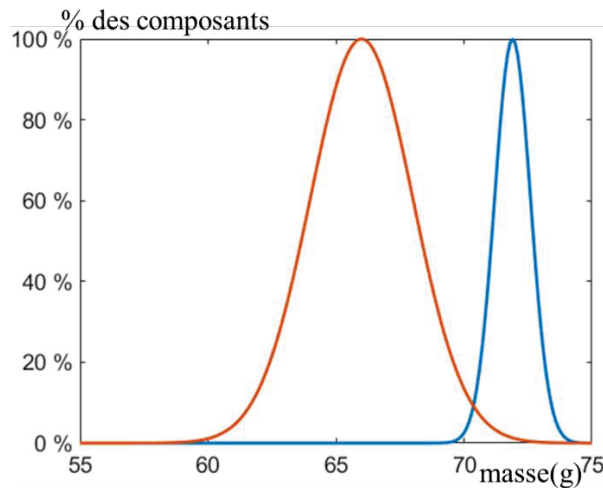


Figure 2.6 Distribution de masse pour les composants sains du fabricant A (courbe bleue) et du fabricant B (courbe rouge)

Remarque : Quelques condensateurs du fabricant B étaient munis d'un thermocouple inséré au cœur du bobinage. Ces condensateurs nous ont permis de mesurer la température cœur des condensateurs et de déduire l'auto-échauffement qui est créé par la circulation du courant. Ces composants ont été exclus de la caractérisation massique car ils avaient un poids supplémentaire lié au thermocouple et à l'époxy utilisé pour permettre une étanchéité du composant.

2.3.2.1. Mesures en fréquence

Les mesures fréquentielles ont été effectuées avec un impédancemètre Agilent 4294A permettant l'acquisition du module de l'impédance et de la phase des condensateurs. La plage des fréquences de mesure est de 40Hz à 110MHz avec une tension de polarisation (U) de 20V continu et d'oscillation maximale (ΔU) de 10V efficace. Les valeurs de capacité, d'inductance ou de résistance déduite des mesures du module d'impédance et de phase sont fournies selon un schéma équivalent série ou parallèle à deux éléments. Selon que la fréquence de mesure est inférieure ou supérieure à la fréquence de résonance f_r du composant en essai, on utilise un schéma composé d'une résistance avec un condensateur ou d'une résistance avec une inductance. Dans notre cas, comme on s'intéresse aux valeurs de la capacité et de la résistance série au-dessous de la fréquence de résonance (Chapitre 1, équation (1.5) et Figure 1.15), on adopte la configuration « Rs-Cs » de l'impédancemètre avec $ESR = R_s$ et $C = C_s$:

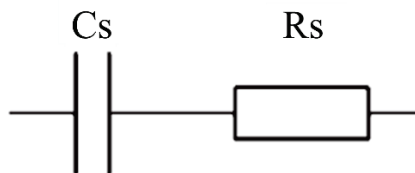


Figure 2.7 Configuration retenue pour l'impédancemètre pour nos mesures

Lors de la caractérisation, nous avons remarqué que la tension de polarisation (U) appliquée aux bornes du composant a une influence minime sur les mesures de C_s et R_s . Donc les caractérisations ont

été effectuées de la même manière que celles réalisées par les fabricants ; en imposant une tension de polarisation de 1V et une tension d'oscillation d'amplitude de 0.5V.

2.3.2.2. Mesures en continu

Les mesures du courant de fuite I_L s'effectuent via le mégohmmètre M1500P. Un mégohmmètre est un ohmmètre spécifique destiné aux mesures de résistance d'isolement électrique (très grandes valeurs de résistance). Il génère une tension continue importante (de quelques centaines de volts à plusieurs kV). L'appareil possède généralement une limitation de courant à quelques mA. Le circuit d'un tel dispositif est indiqué sur la Figure 1.8.

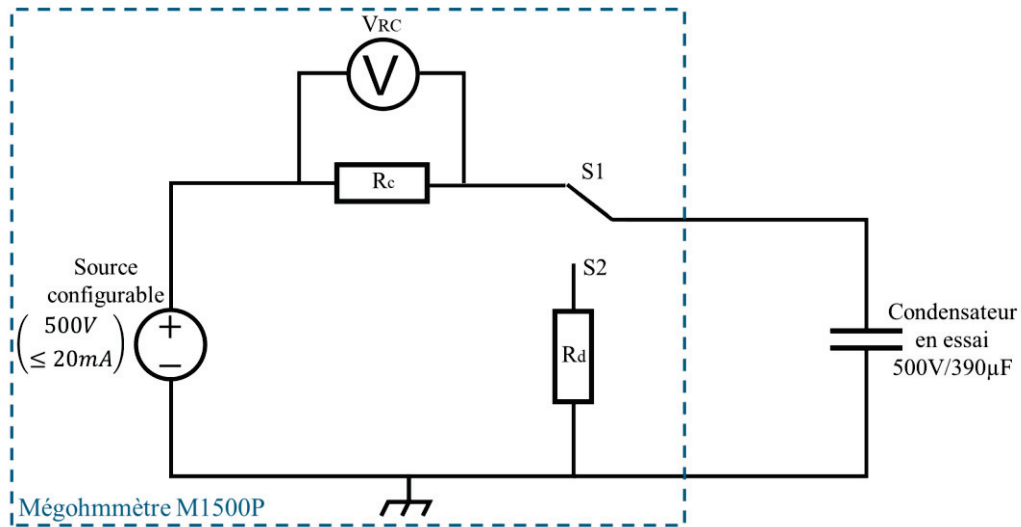


Figure 2.8 Circuit du mégohmmètre capable de mesurer le courant de fuite des condensateurs

Le courant de fuite I_L est obtenu par le calcul du courant dans R_c , 5 min après le début de la charge du condensateur à sa tension nominale V_0 :

$$I_L = \frac{V_{RC}}{R_c} \quad (2.34)$$

Le bus GPIB du mégohmmètre a été utilisée pour contrôler en permanence l'acquisition du courant de fuite I_L , avec un PC. Un programme de commande et d'acquisition, grâce auquel sont fixés les paramètres de charge et de décharge ainsi que la fréquence d'acquisition et le chemin de sauvegarde du fichier de mesures, a été réalisé.

Contrairement aux mesures en fréquence pour déterminer ESR et C, ici, la tension de polarisation (U) appliquée aux bornes du composant a une influence importante sur la valeur de I_L .

Le courant de fuite peut s'écrire sous la forme suivante [99] :

$$I_L = \frac{U}{R} + I_{L0} e^{((U-V_0)c)} - I_{L0} e^{(-V_0 c)} \quad (2.35)$$

Symboles	Significations
R	Résistance du diélectrique (pouvant être considérée comme constante pour les faibles tensions (inférieures à la moitié de la tension nominale $V_0/2$) (Ω))
I_{L0}	Courant de fuite à V_0 (A)
c	Coefficient dépendant du composant (V^{-1})
U	Tension de polarisation du mégohmmètre
V_0	Tension nominale du composant (condensateur dans notre cas)

Le courant de fuite augmente fortement lorsque des valeurs de tension de polarisation proches de la tension nominale du composant sont atteintes (forme exponentielle de l'équation (2.35)). Il peut y avoir claquage du diélectrique si une tension supérieure à la tension nominale est appliquée pendant une période dépendante de celle-ci.

2.4. Effets de la température sur les valeurs de l'ESR et de C lors d'une caractérisation

Les condensateurs électrolytiques à l'aluminium sont très sensibles aux variations de température. La résistance équivalente série varie de façon très importante avec la température. Les propriétés de l'électrolyte, constituant en grande partie cette résistance, en sont la cause. En effet, l'ESR est constituée de trois parties :

1. la première est celle de l'électrolyte et des papiers imprégnés d'électrolyte qui diminue fortement avec la température, c'est le principal terme de l'ESR ;
2. la seconde est celle de la couche d'oxyde d'alumine qui augmente légèrement avec la température et diminue avec la fréquence ;
3. la dernière est la résistance des bandes de connexion et des feuilles d'aluminium qui augmente légèrement avec la température [26].

Aux basses températures un phénomène d'épaississement de l'électrolyte [99], [100], induit une mobilité des ions moins importante et conduit à une augmentation de l'ESR.

La *Figure 2.9* représente le banc expérimental de caractérisation des condensateurs en fonction de la température.



Figure 2.9 Banc expérimental pour la caractérisation des condensateurs en fonction de la température

Nous représentons sur la *Figure 2.10* la variation de l'ESR et de C pour une fréquence de 120Hz, en fonction de la température pour un condensateur du fabricant A. La variation de l'ESR peut s'exprimer par une loi exponentielle de la forme :

$$\frac{ESR_{\theta_k}}{ESR_{\theta_{20^\circ C}}} = \beta_{esr1} + \beta_{esr2} e^{\frac{-\theta_k}{\beta_{esr3}}} \quad (2.36)$$

Il existe aussi une faible mais réelle variation de la capacité pour les températures positives. La variation de C peut s'exprimer par une loi exponentielle de la forme :

$$\frac{C_{\theta_k}}{C_{\theta_{20^\circ C}}} = \beta_{c1} + \beta_{c2} \cdot \theta_k \quad (2.37)$$

Symboles	Significations
θ_k	Température du composant en °C
$\theta_{20^\circ C}$	Température de référence en °C (ici 20°C)
ESR_{θ_k}	ESR à la température θ_k
$ESR_{\theta_{20^\circ C}}$	ESR à la température de référence $\theta_{20^\circ C}$
C_{θ_k}	C à la température θ_k
$C_{\theta_{20^\circ C}}$	C à la température de référence $\theta_{20^\circ C}$
$\beta_{esr1}, \dots, \beta_{esr3}$	Coefficients de ESR par rapport à la température dépendants du composant
$\beta_{c1}, \dots, \beta_{c2}$	Coefficients de C par rapport à la température dépendants du composant

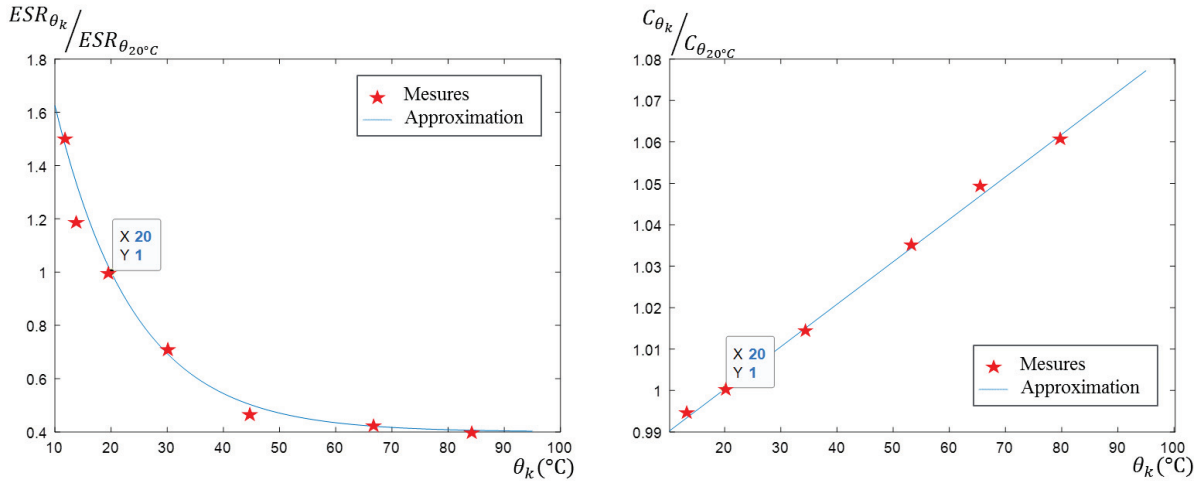


Figure 2.10 Variation de l'ESR et de C à 120Hz pour différentes températures

Les paramètres $\beta_{esr1}, \dots, \beta_{c2}$ peuvent être déterminés par la méthode des moindres carrés non linéaires de Levenberg-Marquardt [101]–[103]. On obtient pour cet exemple :

$$\beta_{esr1} = 0,4$$

$$\beta_{esr2} = 2,5$$

$$\beta_{esr3} = 14,02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\beta_{c1} = 0,975$$

$$\beta_{c2} = 0,00125 \text{ } / ^\circ\text{C}$$

2.5. Reconditionnement des condensateurs et effet de la mise sous tension des condensateurs stockés

Les condensateurs reçus pour nos essais de vieillissement sont des condensateurs neufs, mais leur historique (durée de stockage, conditions de stockage et de transport...) est inconnu. Pour être sûr que les condensateurs neufs reçus sont proches de leur état de sortie d'usine, les constructeurs préconisent un reconditionnement des condensateurs correspondant à un traitement par tension pour formatage.

En effet, après un certain temps (2 ans ou plus) [55], [56], [68] durant lequel un condensateur électrolytique est resté hors tension, il doit être reconditionné. Ce reconditionnement consiste à lui appliquer à ses bornes la tension nominale V_0 pour une durée de quelques heures. Grâce au maintien de la tension, la couche d'oxyde d'aluminium se reforme et le condensateur retrouve ses performances initiales. Les points faibles de la couche d'oxyde d'aluminium sont alors éliminés ce qui fait augmenter de nouveau sa capacité et diminuer sa résistance équivalente série.

Nos condensateurs de 390 μ F/500V ont été caractérisés à leur état neuf avant le reconditionnement puis mis sous tension pendant 20h à 500V et 25°C. Ensuite, ils ont été soumis à une deuxième caractérisation dans les mêmes conditions que la première. Les résultats obtenus sont présentés sur la *Figure 2.11*. Ils illustrent les variations de la résistance ESR et de la capacité C en fonction de la fréquence, à 25°C. Les courbes montrent qu'après la mise sous tension, la résistance ESR diminue, tandis que la capacité C augmente, et ceci pour tous les condensateurs ayant subi cet essai.

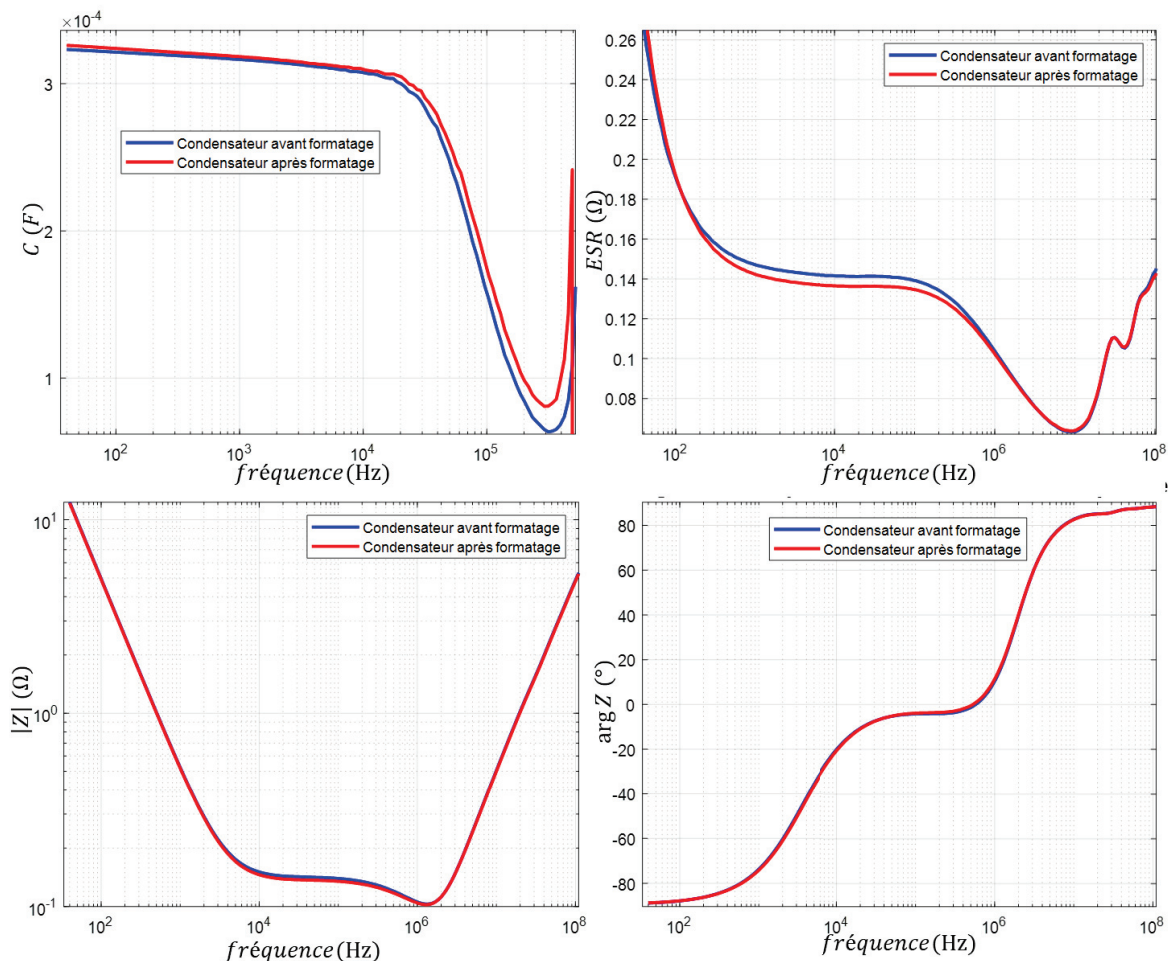


Figure 2.11 Intérêt du reconditionnement sur l'amélioration des caractéristiques électriques

Afin d'établir des lois de vieillissement correctes, il est donc important avant de lancer tout essai de vieillissement de placer les condensateurs sous tension pendant quelques heures pour obtenir des caractérisations fiables.

2.6. Présentation des essais de vieillissement

Pour évaluer la durée de vie des composants et identifier les mécanismes de défaillance, des essais de vieillissements accélérés sont utilisés. Notre étude s'est basée principalement sur les deux types d'essais de vieillissement détaillés ci-dessous.

2.6.1. Vieillissements standards par « floating »

Les composants sont placés dans une enceinte climatique à tension nominale et température maximale d'utilisation (cf. Endurance §2.1.2). Cela permet d'analyser le comportement des paramètres des condensateurs en fonction du temps et de déterminer les facteurs d'accélération de la tension d'une part et de la température d'autre part (Figure 2.12).

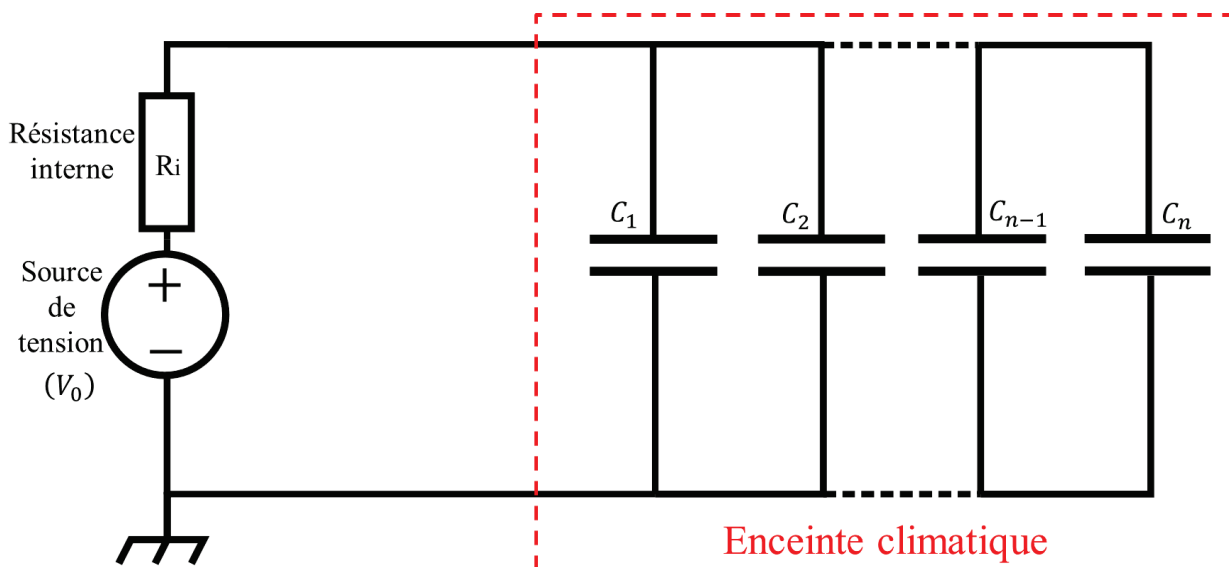


Figure 2.12 Banc de vieillissement standard par floating

2.6.2. Vieillissements par ondulation de courant

Lors de leur fonctionnement réel, les condensateurs sont généralement soumis à des gradients de température en raison des contraintes électriques appliquées. Étant donné que les essais de vieillissement standards ne reflètent pas ces conditions réelles de vieillissement, nous avons réalisé un second type d'essais, dont le but est d'imposer des ondulations de courant avec une composante de tension continue. De cette façon, il est possible de reproduire le vieillissement des condensateurs de filtrage et ainsi de faire une analyse comparative avec les essais de vieillissement par « floating ».

Ce nouvel essai ajoute aux contraintes des essais précédemment cités (§2.6.1) une ondulation de courant (cf. Useful life §2.1.2). Cela permet de faire subir au condensateur des contraintes similaires à celles rencontrées lors de l'utilisation de celui-ci dans une application d'électronique de puissance.

Ce type d'essai est réalisé grâce à l'utilisation de l'équipement « Chroma 11800 » capable de générer une ondulation de courant (donc de tension) superposée à une tension continue comme illustré sur la *Figure 2.13*.

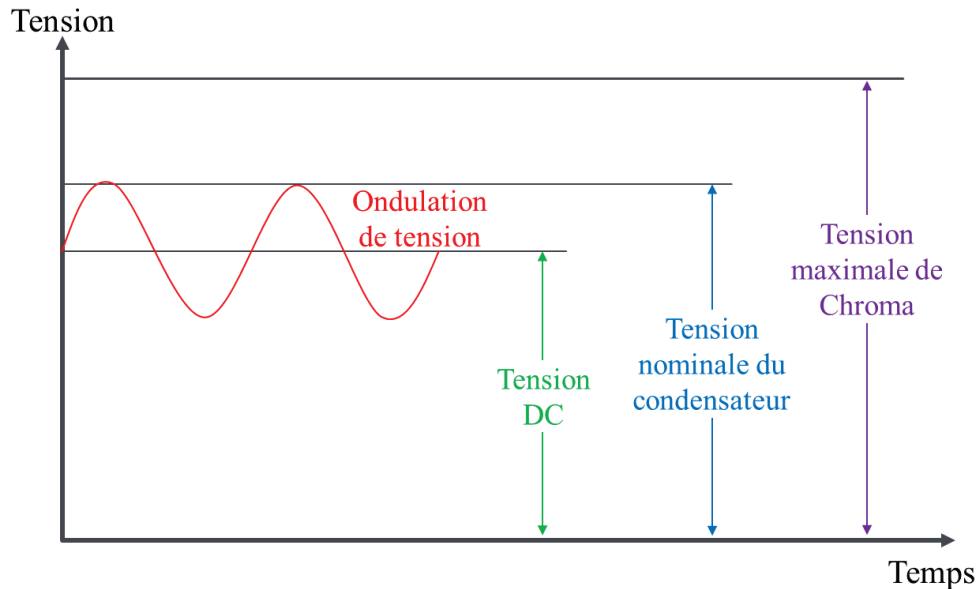


Figure 2.13 Forme d'onde de la tension appliquée par l'équipement Chroma

2.6.3. Les différents essais de vieillissement réalisés

Les différents essais ont été réalisés sur 64 condensateurs au lieu de 50 (25 condensateurs par fabricant) prévus initialement car plusieurs composants du fabricant B ont subi des défauts catalectiques et ont donc dû être remplacé par des nouveaux (et parfois à plusieurs reprises). Huit différents essais ont été effectués. Ils sont résumés dans le Tableau 2.6 :

Type d'essai	Nomenclature de l'essai	Température	Tension	Courant efficace	Nombre de condensateurs testés	Durée (heures)	Nombre de caractérisations
Floating	F (25 ; 0)	25°C	0 V	0 A	1 (fab. A) 1 (fab. B)	~11 000	20
	F (85 ; 0)	85°C	0 V	0 A	3 (fab. A) 3 (fab. B)	~11 000	20
	F (85 ; 500)	85°C	500 V	0 A	3 (fab. A) 7 (fab. B)	~11 000	20
	F (75 ; 500)	75°C	500 V	0 A	3 (fab. A) 3 (fab. B)	~11 000	20
	F (95 ; 500)	95°C	500 V	0 A	3 (fab. A) 4 (fab. B)	~10 000	19
	F (85 ; 400)	85°C	400V	0 A	3 (fab. A) 3 (fab. B)	~7 200	11
	F (95 ; 400)	95°C	400V	0 A	3 (fab. A) 2 (fab. B)	~7 200	11
Ondulation de courant	O (85 ; 500)	85°C	500 V	2,3 A (Fréq : 120 Hz)	6 (fab. A) 16 (fab. B)	~10 500	20

Tableau 2.6 Les différents essais de vieillissement réalisés

La nomenclature des essais suivante a été adoptée :

- La première lettre désigne le type d'essai, il est noté F pour un essai en « floating » et O pour un essai avec une ondulation de courant (la fréquence et la valeur de l'ondulation sont données dans les spécifications « constructeur » des condensateurs).
- Le premier nombre à l'intérieur de la parenthèse désigne la température appliquée dans l'essai (en °C).
- Le deuxième nombre à l'intérieur de la parenthèse désigne la tension continue ou composante continue appliquée dans l'essai (en V).

Par exemple, F (85 ; 500) désigne un essai standard « floating » avec une température de 85°C et une tension appliquée de 500V.

Des essais ont été réalisés à quatre températures différentes {25°C, 75°C, 85°C et 95°C}, trois niveaux de tension différents {0V, 400V, 500V} et deux valeurs de courant différentes {0A et 2.3 A}. Nous pouvons ainsi étudier l'effet de chaque contrainte et étudier, si l'ondulation du courant peut être assimilée à un simple échauffement. Une ondulation de 2.3 A élève la température interne des condensateurs de 10°C. Pour cela, l'essai F (95 ; 500) a été mis en place pour comparer le vieillissement à celui O (85 ; 500) qui, théoriquement, doit avoir le même effet si la contrainte de courant est équivalente à un simple échauffement.

3. Analyse des défaillances et du vieillissement des condensateurs

3.1. Introduction

Deux principaux types de défaillances sont distinguées :

- Les défaillances progressives induisant une dégradation graduelle des paramètres électriques du composant.
 - Les défaillances catalectiques ou catastrophiques qui sont soudaines et totales, liées à un défaut ne permettant plus au composant d'effectuer la fonction requise.
- Les résultats sont différenciés selon ces deux modes de défaillance.

3.2. Défaillances par dérive

Les principaux indicateurs permettant de définir l'état de santé d'un condensateur électrolytique à l'aluminium sont les valeurs de sa capacité C , de sa résistance équivalente série ESR et de son courant de fuite I_L . L'ESR est le paramètre qui se dégrade le plus rapidement lors d'un vieillissement standard [5], [38]–[41]. Il constitue donc un indicateur de vieillissement privilégié pour ces composants.

Sur la Figure 3.1 sont représentées quelques caractérisations fréquentielles effectuées avec l'impédancemètre Agilent 4294A. La figure est composée de quatre sous-figures représentant respectivement l'ESR, la capacité série C , le module de l'impédance et la phase d'un condensateur du fabricant A ayant subi l'essai F (95 ; 500). Cette figure montre l'évolution fréquentielle des paramètres à quatre stades de vieillissement du condensateur : lorsque le condensateur était neuf, à deux états intermédiaires de vieillissement et au dernier état lors de l'arrêt final de l'essai.

Nous remarquons qu'ESR augmente avec le vieillissement pour toute la gamme de fréquences. La valeur de la capacité en série C diminue légèrement avec le temps de vieillissement pour les valeurs inférieures à la fréquence de résonance du composant. D'après l'équation (1.5) du chapitre 1, la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la racine carrée de la capacité. Avec la diminution de la valeur de cette dernière, on observe le déplacement de la fréquence de résonance vers des plus hautes fréquences.

Afin d'évaluer le vieillissement des condensateurs, il est possible d'utiliser, comme indicateur robuste du vieillissement du composant, les valeurs de l'ESR pour une fréquence entre 40Hz et 4kHz par exemple, et les valeurs de C pour une fréquence entre 500Hz et 4kHz. Mais afin de respecter les références fréquentielles fixées dans le « datasheet » des condensateurs A et B (Tableau 2.3), nous utilisons par la suite les valeurs de ESR et C à 120Hz comme valeurs normalisées de mesure.

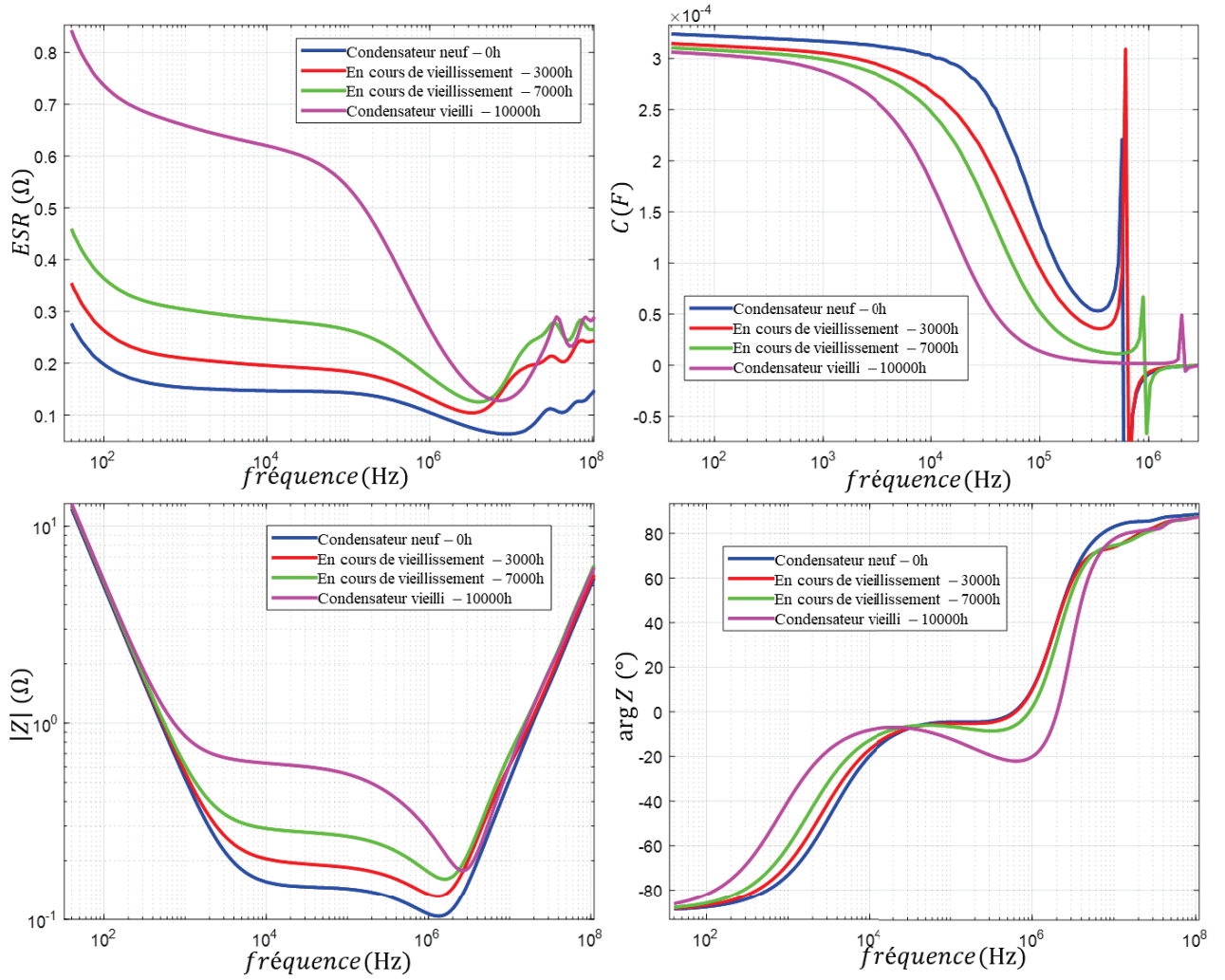


Figure 3.1 Caractérisations fréquentielles d'un condensateur au cours de son vieillissement

3.2.1. Variation de l'ESR et de C

3.2.1.1. Évaluation des erreurs de mesure

Avant d'afficher les résultats, rappelons que les condensateurs en essai ont été caractérisés à l'aide de l'impédancemètre Agilent 4294A à 25 °C. Outre la température, la précision de cet appareil dépend de la valeur de l'impédance à une fréquence donnée. L'équation (3.1) donne la précision relative en pourcentage E (%) de cet appareil de mesure pour une impédance Z_x mesurée [107] :

$$E (\%) = E'_P + \left(\frac{Z'_S}{|Z_x|} + Y'_0 |Z_x| \right) . 100 \quad (3.1)$$

Les significations des différents paramètres sont indiquées ci-dessous.

En remplaçant les conditions de caractérisation respectives dans l'équation (3.1), les précisions de mesure sur le module Z_x , ainsi que sur les parties réelle R et imaginaire X de l'impédance sont calculées en tenant compte des expressions ci-dessous :

$$\left| \underline{Z}_x \right|_{\text{précision}} (\%) = \pm E \quad (3.2)$$

$$R_{\text{précision}} (\%) = \begin{cases} \pm E \cdot Q_x & \text{si } Q_x \geq 10 \\ \pm E \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{Q_x^2}} \cdot Q_x & \text{si } 0.1 < Q_x < 10 \\ \pm E & \text{si } Q_x \leq 0.1 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$X_{\text{précision}} (\%) = \begin{cases} \pm E & \text{si } Q_x \geq 10 \\ \pm E \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{Q_x^2}} & \text{si } Q_x < 10 \end{cases} \quad (3.4)$$

Symboles	Significations
$E (\%)$	Précision relative en pourcentage de l'appareil de mesure
E'_P, Z'_S, Y'_0	Termes en fonction de la fréquence, de l'impédance, du niveau de signal ainsi que du mode et du temps de mesure
Z_x	Impédance mesurée
Q_x	Facteur de qualité mesuré, représentant le rapport entre la partie réelle R et la partie imaginaire X de l'impédance Z_x mesurée

Les données de mesures sont obtenues en stimulant nos composants à différentes fréquences par des signaux sinusoïdaux d'amplitude 0.5 V, autour d'une tension de polarisation de 1 V. On mesure donc un spectre d'impédance complexe qui est représenté par son module et sa phase ou par ses parties réelles et imaginaires (respectivement diagrammes de Bode ou de Nyquist).

Le concepteur de l'appareil donne pour les valeurs de tension choisies un abaque d'erreur relative indiqué sur la Figure 3.2. :

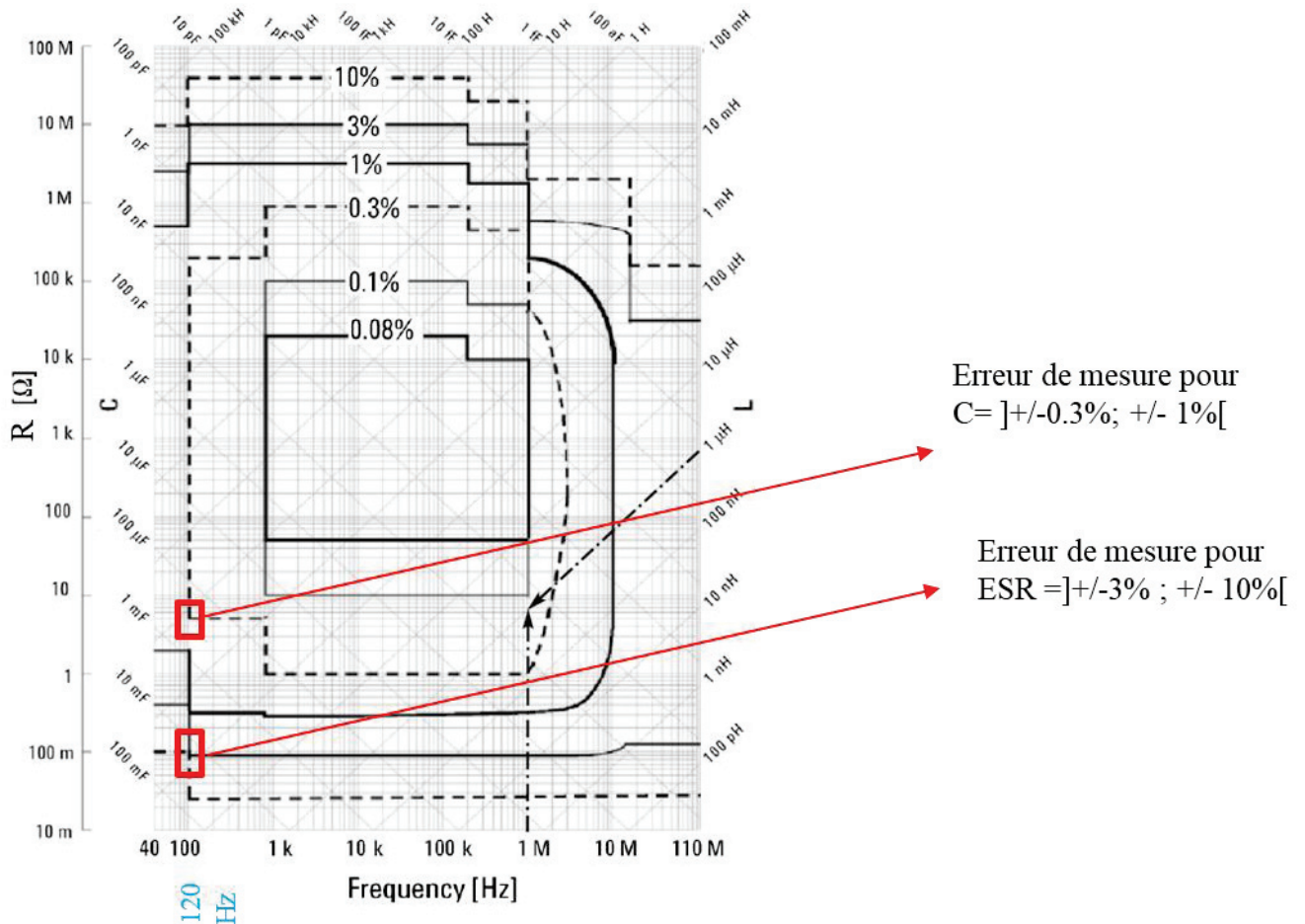


Figure 3.2 Abaque de précision sur la mesure en fonction de la valeur de l'impédance et de la fréquence de mesure

Pour évaluer l'erreur signalée par le constructeur, plusieurs essais ont été mis en place sur plusieurs jours non consécutifs. Nous avons remarqué que la plus grande partie de l'erreur était systématique. En éliminant l'erreur systématique, l'erreur résiduelle sur l'ESR restait inférieure à $\pm 2\%$ et celle sur C restait inférieure à $\pm 0.2\%$. Ces résultats nous ont incité à ajouter un essai témoin F (25 ; 0) qui a pour but d'estimer l'erreur systématique de l'appareil. Les condensateurs de l'essai F (25 ; 0) vieillissent de manière négligeable au moins durant les 2 ou 3 premières années après leur reconditionnement (cf. chapitre 2 - §2.5) donc toutes variations de l'ESR et de C trouvées lors des mesures sur ces étalons ont été attribuées à l'erreur systématique de l'appareil (Figure 3.3).

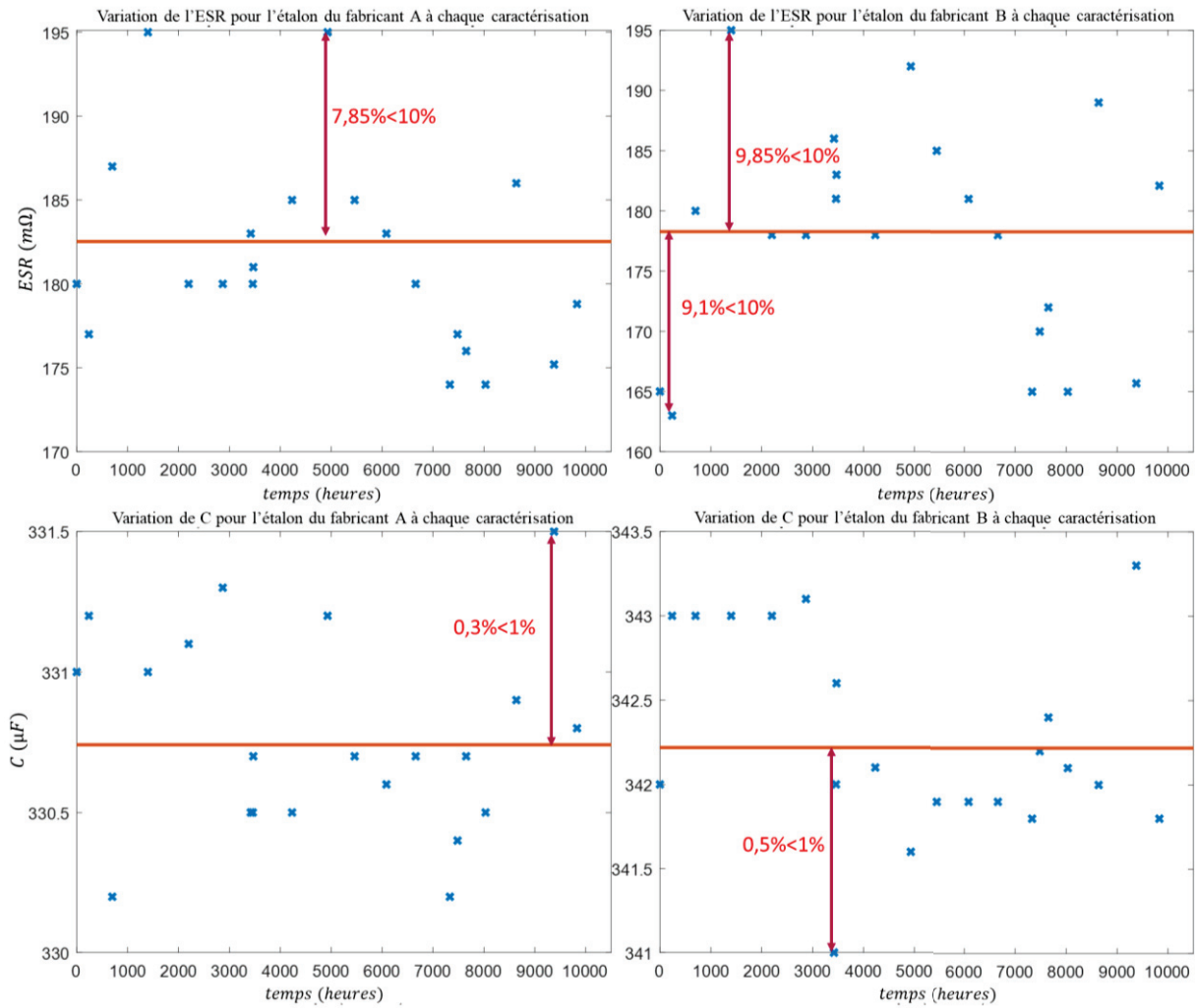


Figure 3.3 Différentes mesures faites à 120Hz des étalons à chaque caractérisation de l'ensemble des condensateurs en essai

Grâce à ces différentes mesures, une valeur moyenne a pu être déduite par indicateur et par fabricant et il a été constaté que l'erreur systématique de l'appareil reste inférieure à 10 % pour l'ESR et inférieure à 1% pour la capacité C. Afin d'éliminer l'erreur systématique apparaissant lors de chaque campagne de mesure, la formule d'extrapolation (2.5) a été utilisée :

$$ESR_{ajustée\ i}^{cond\ j} = ESR_{mesuré\ i}^{cond\ j} \cdot \frac{ESR_{moyenne}^{étalon}}{ESR_{mesurée\ i}^{étalon}} \quad (3.5)$$

Symboles	Significations
$ESR_{ajustée\ i}^{cond\ j}$	Valeur ajustée de l'ESR (à 120Hz) du condensateur j lors de la caractérisation i
$ESR_{mesuré\ i}^{cond\ j}$	Valeur mesurée de l'ESR (à 120Hz) du condensateur j lors de la caractérisation i
$ESR_{moyenne}^{étalon}$	Valeur moyenne de l'ESR (à 120Hz) du condensateur étalon de toutes les caractérisations
$ESR_{mesurée\ i}^{étalon}$	Valeur mesurée de l'ESR (à 120Hz) lors de la caractérisation i du condensateur étalon A ou B

De même les valeurs de la capacité ont été corrigées grâce à l'équation (2.6) :

$$C_{ajustée\ i}^{cond\ j} = C_{mesuré\ i}^{cond\ j} \cdot \frac{C_{moyenne}^{étalon}}{C_{mesurée\ i}^{étalon}} \quad (3.6)$$

3.2.1.2. Variation de l'ESR

Les variations normalisées de l'ESR par rapport à la valeur initiale de l'ESR à 120 Hz pour chaque essai sont représentées sur les figures suivantes (Figure 3.4, Figure 3.5, Figure 3.6, Figure 3.7, Figure 3.8, Figure 3.9, Figure 3.10) L'extension T utilisée dans la numérotation des condensateurs dans les légendes représente les condensateurs munis d'un thermocouple interne. Les extensions R et RR désignent un condensateur remplacé une ou deux fois. Lorsqu'un condensateur est défaillant, sa valeur est retirée des moyennes calculées. Ceci induit de légères discontinuités sur les courbes. Un condensateur défaillant est repéré quand sa valeur d'ESR tend vers l'infini. Les courbes d'évolution de l'ESR sont analysées dans le §3.1.1.3.

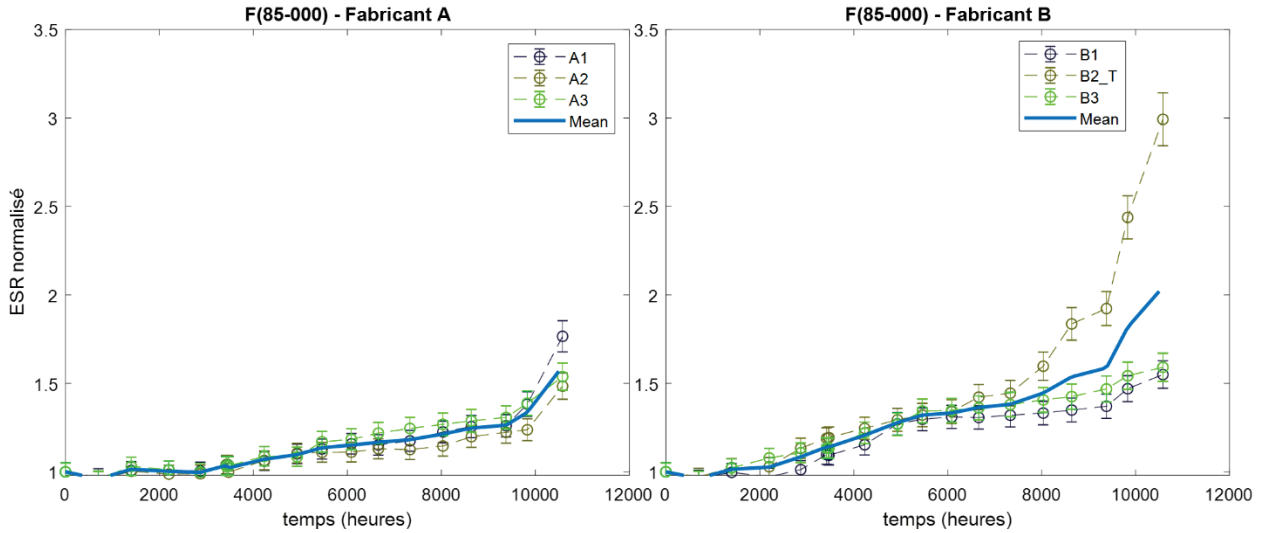


Figure 3.4 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement sans tension « shelf life » F(85 ; 0)

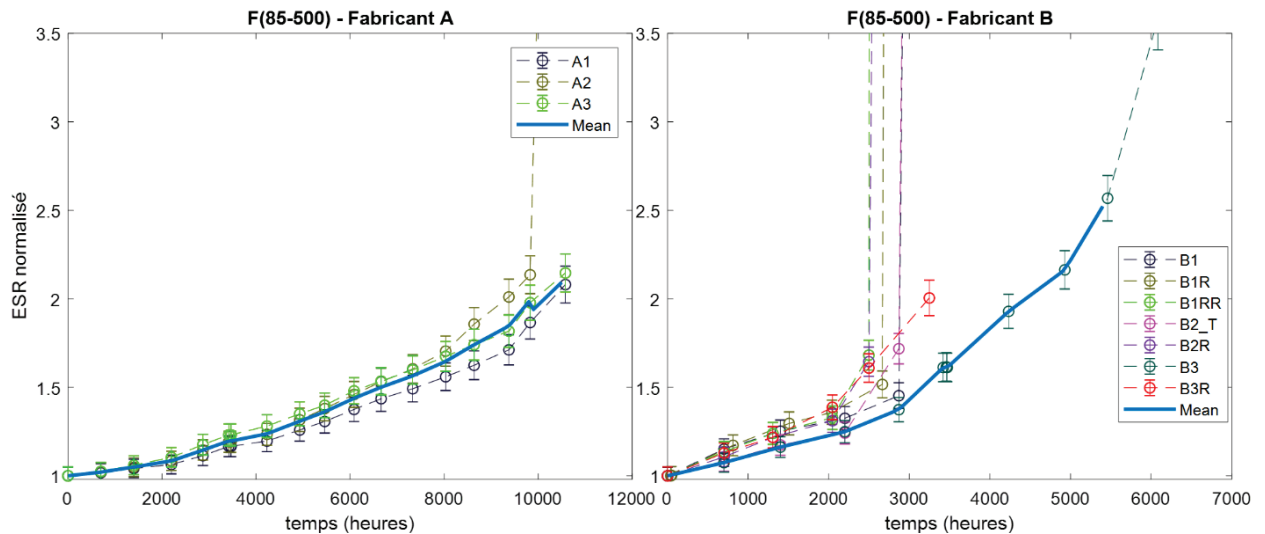


Figure 3.5 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement F(85 ; 500)

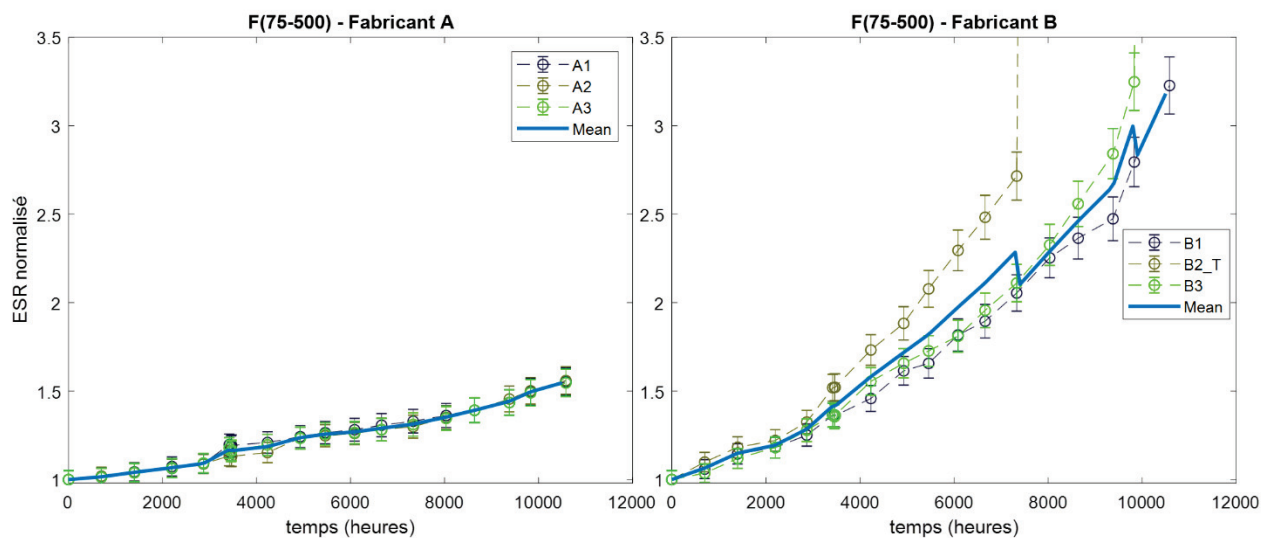


Figure 3.6 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement à plus faible température F(75 ; 500)

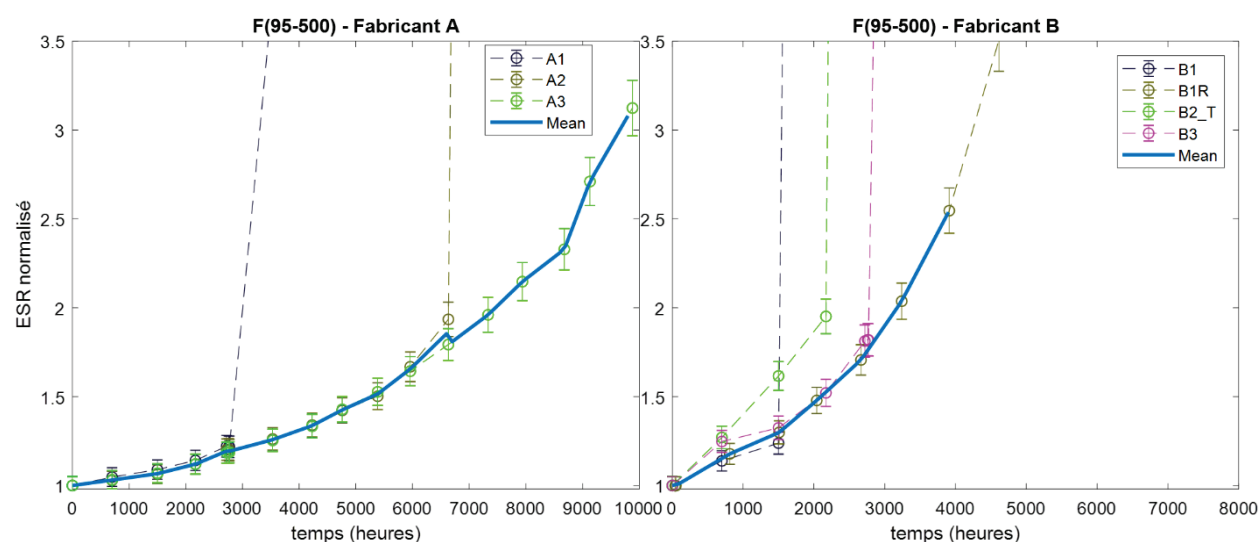


Figure 3.7 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement à forte température F(95 ; 500)

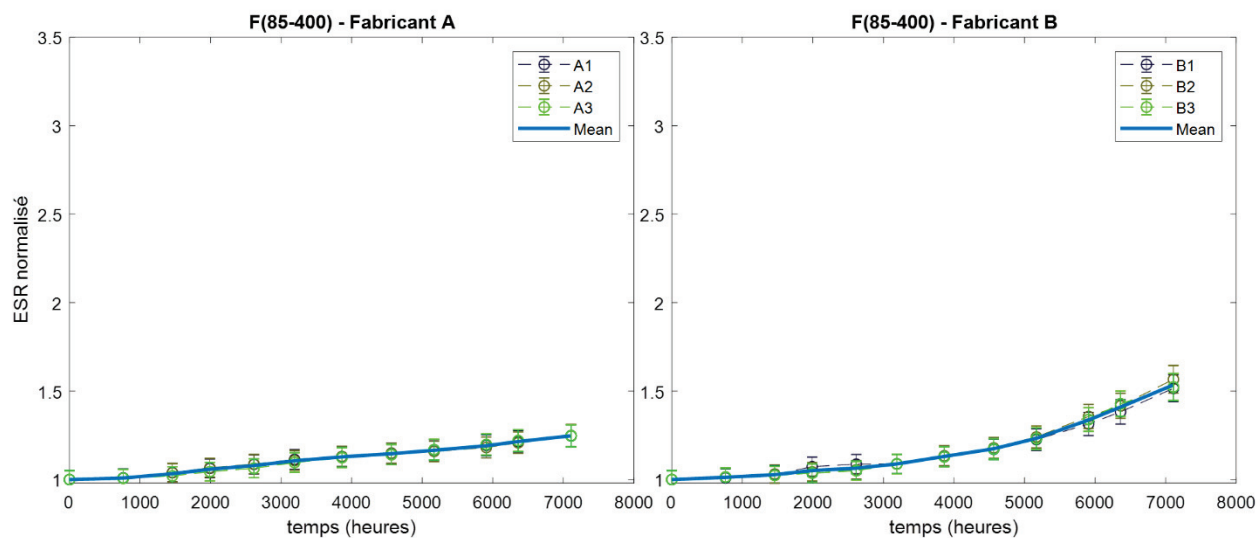


Figure 3.8 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement à tension « réduite » F(85 ; 400)

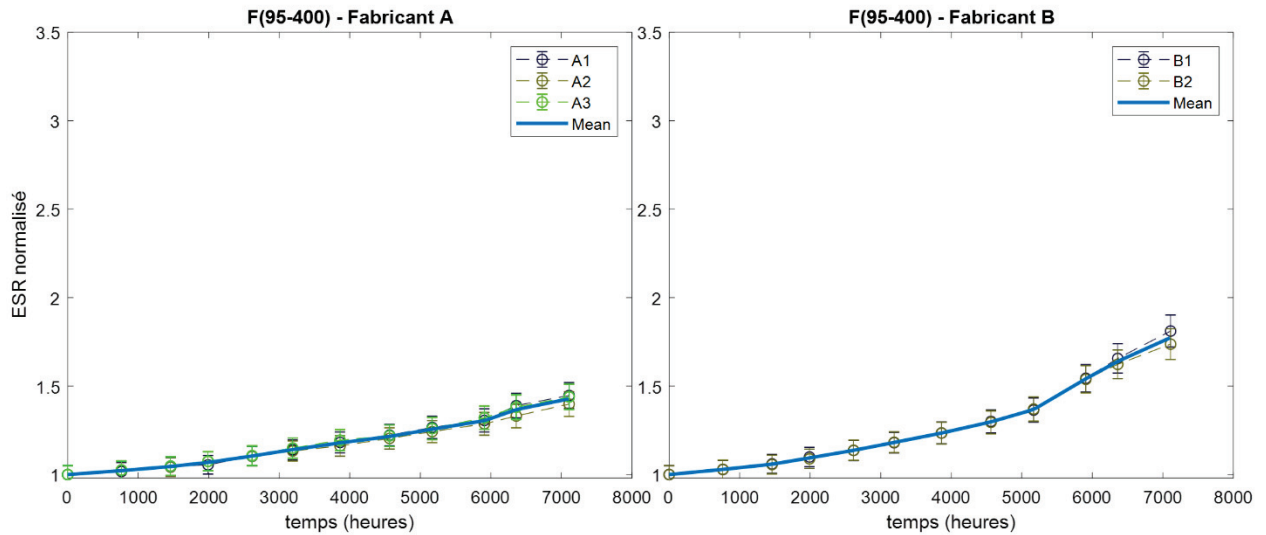


Figure 3.9 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement à forte température et tension « réduite » F(95 ; 400)

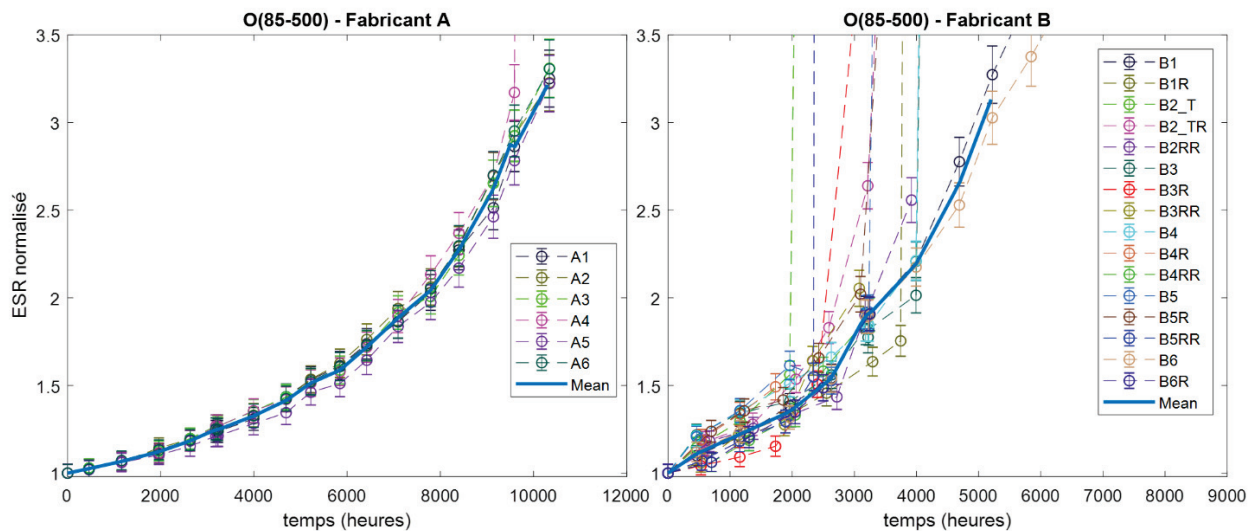


Figure 3.10 Les différentes mesures de l'ESR à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement avec oscillation O(85 ; 500)

3.2.1.3. Modèle de vieillissement de l'ESR

La résistance équivalente série dépend principalement de la résistivité de l'électrolyte dans les condensateurs électrolytiques à l'aluminium. L'augmentation de cette résistance en fonction du temps dépend du type d'électrolyte, du boîtier du composant et plus particulièrement de son étanchéité ainsi que de la température de vieillissement. Un modèle linéaire de l'évolution en fonction du temps de vieillissement de l'ESR en $1/ESR$ a été développé par Rhoades et Smith [79]. Nous proposons dans cette partie de comparer celui-ci à des modèles suivant une loi exponentielle développé par F. Perisse [26]. Ces différents modèles ont été proposés pour divers composants de caractéristiques électriques et géométriques différentes.

Un modèle linéaire en $1/ESR$ que nous appelons modèle 0 a été pensé par Cathey et Joyner [108] puis proposé par Rhoades et Smith [79]. Il permet d'obtenir une prédiction de l'évolution de l'ESR en fonction du temps et de la température de vieillissement. La relation proposée est la suivante :

$$\frac{1}{ESR(t)} = \frac{1}{ESR(0)} \left[1 - A_0 t e^{-\frac{4700}{T}} \right] \quad (3.7)$$

Symboles	Significations
t	Temps de vieillissement
$ESR(t)$	La valeur de l'ESR à t
$ESR(0)$	La valeur de l'ESR initiale (à $t = 0$) à une température donnée (cf. §2.4 du chapitre 2)
A_0	Coefficients dépendant du composant à déterminer par des essais de vieillissement accéléré
T	Température de vieillissement en Kelvin

La valeur réelle de l'ESR augmente toujours avec le temps de vieillissement. La fonction donnant la valeur de $ESR(t)$ déduite de ce modèle en $1/ESR$ est discontinue et non définie lorsque la quantité $A_0 t e^{-\frac{4700}{T}}$ est égale à 1. Ce modèle limite donc le domaine d'étude en temps de vieillissement ce qui peut être une contrainte.

F. Perisse [26] propose trois modèles en exponentielle. Pour une température de mesure donnée T et un temps de vieillissement t effectué à la température T , il écrit les lois de vieillissement de la forme suivantes :

Modèle 1 :
$$ESR_1(t) = (ESR(0) + A_1)e^{C_1 t} \quad (3.8)$$

Modèle 2 :
$$ESR_2(t) = ESR(0) (A_2 + B_2 e^{C_2 t}) \quad (3.9)$$

Modèle 3 :
$$ESR_3(t) = ESR(0) (A_3 + B_3 t e^{C_2 t}) \quad (3.10)$$

Symboles	Significations
$A_i; B_i; C_i$	Coefficients dépendant du composant à déterminer par des tests de vieillissement accéléré

Dans ses travaux de thèse, F. Perisse [26] effectue des comparaisons entre ces 4 modèles pour divers composants de valeurs nominales et caractéristiques géométriques variées et trouve que le modèle exponentiel s'avère plus précis et particulièrement le modèle 2 dans la plupart des cas.

Afin de mettre en évidence les résultats des tests de vieillissement que nous avons réalisés avec les différents modèles proposés ci-dessus, des comparaisons ont été effectuées et ont abouti à la même conclusion que [26]. Un modèle exponentiel simple s'inspirant du modèle 2 est précis et suffisant. Il sera utilisé dans notre cas comme « Modèle ESR » avec les notations de l'équation (3.11) :

Modèle ESR :
$$ESR(t) = \alpha_{esr1} + \alpha_{esr2} e^{\alpha_{esr3} t} \quad (3.11)$$

Symboles	Significations
$\alpha_{esr1}; \alpha_{esr2}; \alpha_{esr3}$	Coefficients d'évolution temporelle de ESR dépendant du composant à déterminer en ligne (cahier de charge §1.4.2 - chapitre 1)

3.2.1.4. Variation de la capacité C

Les variations normalisées de C à 120 Hz pour chaque essai sont représentées par les figures suivantes (Figure 3.11, Figure 3.12, Figure 3.13, Figure 3.14, Figure 3.15, Figure 3.16, Figure 3.17). Lorsqu'un condensateur est défaillant, sa valeur est retirée des moyennes calculées. Ceci induit de légères discontinuités sur les courbes. Un condensateur défaillant est repéré quand sa valeur de C tend vers zéro. Les courbes d'évolution de C sont analysées dans le §3.1.1.5.

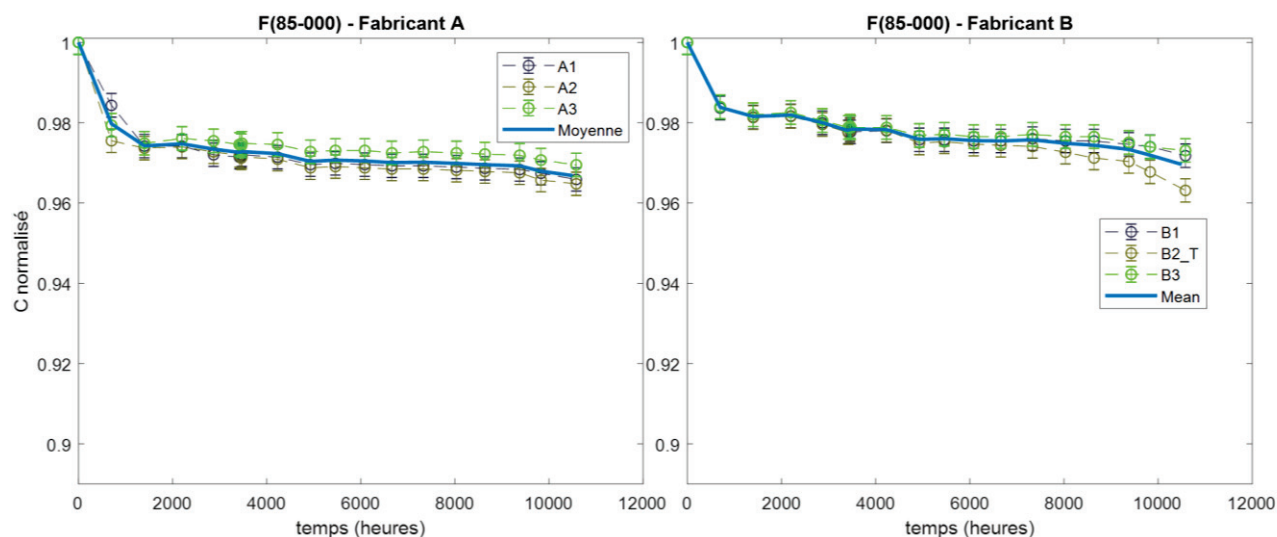


Figure 3.11 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement « shelf life » $F(85 ; 0)$

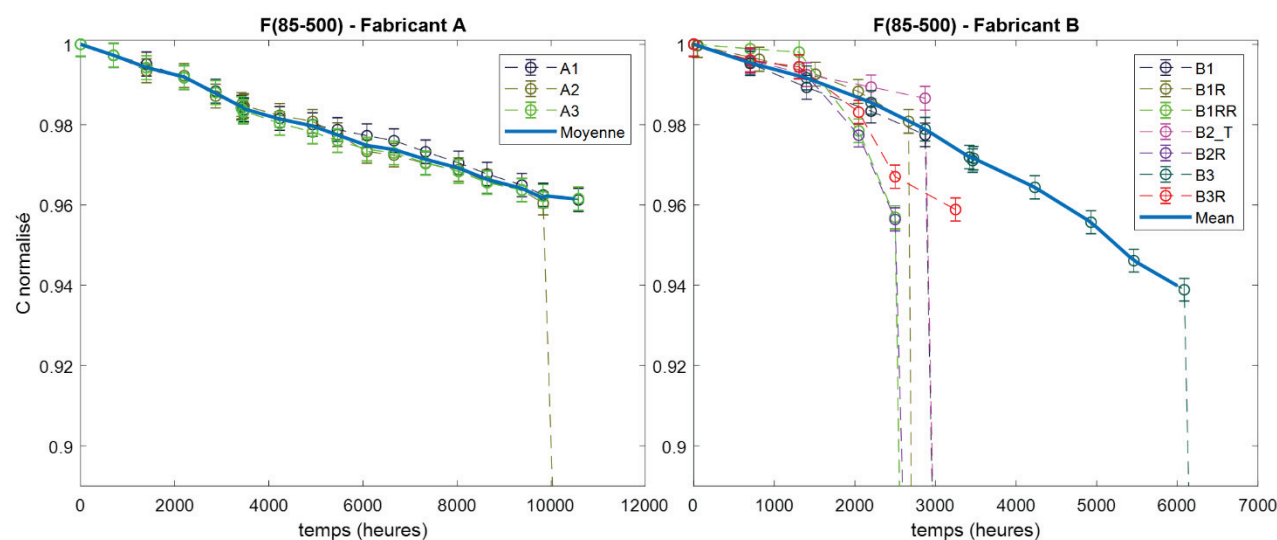


Figure 3.12 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement accéléré $F(85 ; 500)$

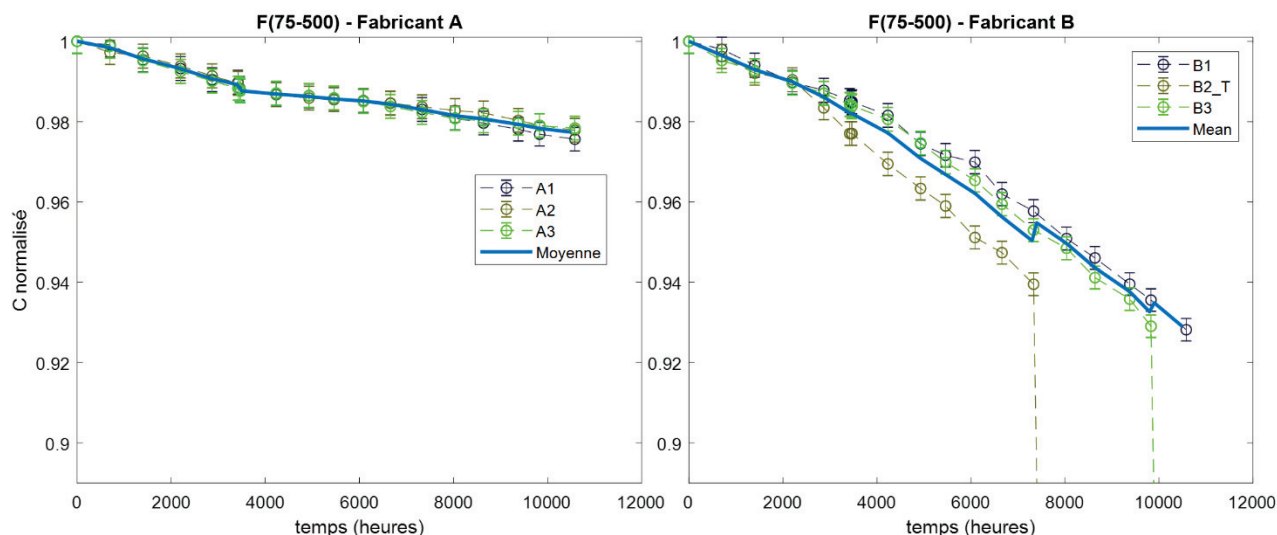


Figure 3.13 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement accéléré $F(75 ; 500)$

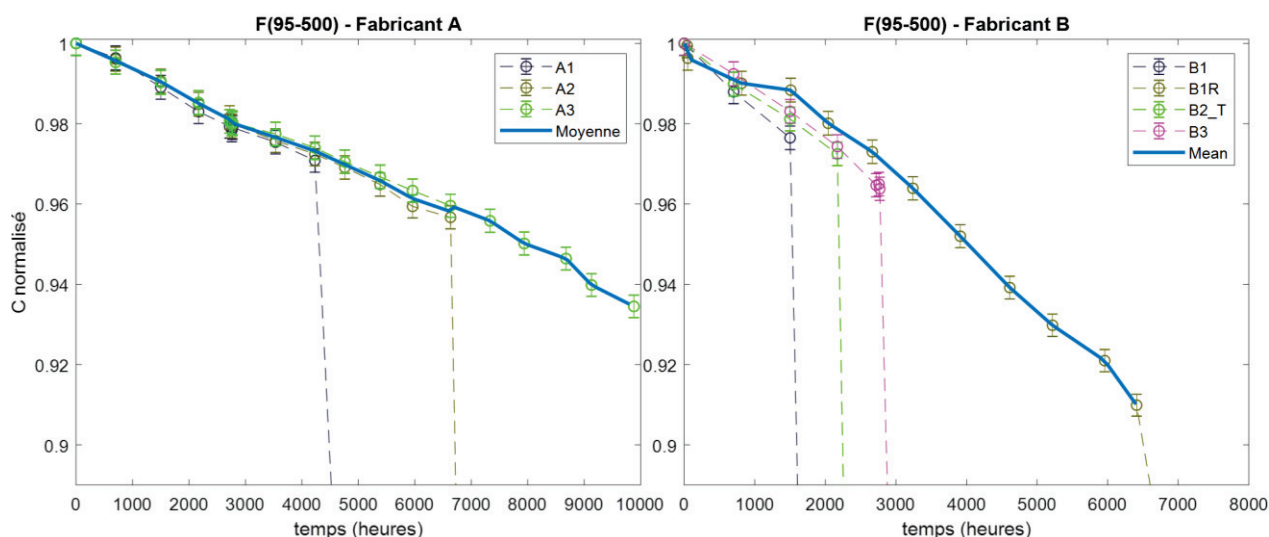


Figure 3.14 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement accéléré $F(95 ; 500)$

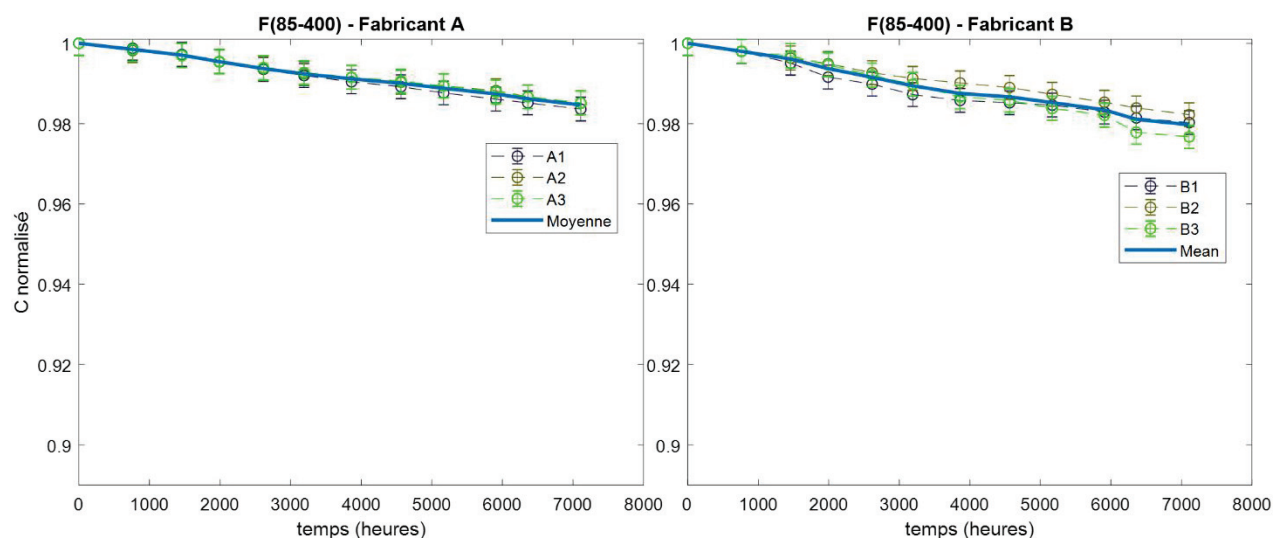


Figure 3.15 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement d'endurance à tension réduite $F(85 ; 400)$

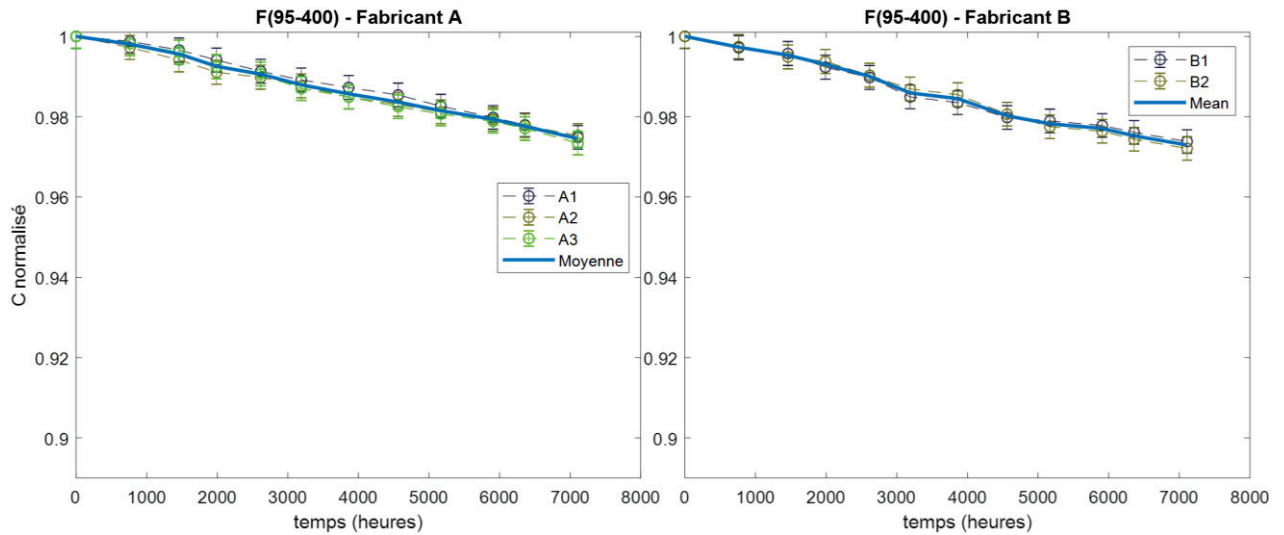


Figure 3.16 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai d'endurance lourde à tension réduite F(95 ; 400)

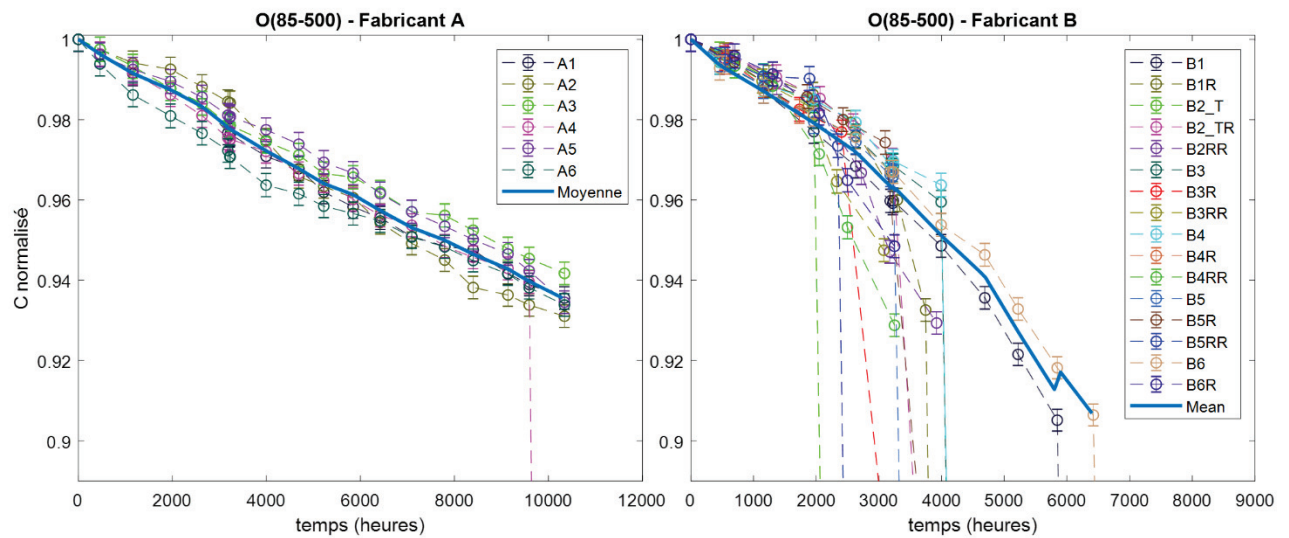


Figure 3.17 Les différentes mesures de C à 120Hz des condensateurs du fabricant A et B tout au long de l'essai de vieillissement de durée de vie utile O(85 ; 500)

3.2.1.5. Modèle de vieillissement de la capacité C

La capacité dépend principalement de l'état du diélectrique dans les condensateurs électrolytiques à l'aluminium. Outre la température de vieillissement, la diminution de la capacité en fonction du temps dépend de la qualité de la gravure, de la surface réelle du diélectrique et plus particulièrement de la capacité de l'électrolyte à auto-régénérer le diélectrique perdu. Un modèle linéaire de l'évolution de la capacité C en fonction du temps de vieillissement « Modèle C » (cf. équation (3.12)) représente bien les évolutions expérimentales de la capacité représentées :

Modèle C :
$$C(t) = \alpha_{c1} + \alpha_{c2} t \quad (3.12)$$

Symboles	Paramètres
$\alpha_{c1}; \alpha_{c2}$	Coefficients d'évolution temporelle de C dépendant du composant à déterminer en ligne (cahier de charge §1.4.2 - chapitre 1)

3.2.2. Variation du courant de fuite

L'évolution du courant de fuite dans le temps est difficilement exploitable comme indicateur de l'état de vieillissement d'un condensateur. En effet, nous avons pu constater que les composants avaient toujours une valeur I_L plus ou moins constante tout au long du vieillissement jusqu'au moment où le condensateur présente des défauts cataclysmiques. C'est à ces instants que le courant de fuite augmente fortement et soudainement. Comme la variation de I_L n'est observée qu'après une déviation très marquée des autres indicateurs, seules les évolutions de l'ESR et de C seront retenues pour estimer en ligne la durée de vie des condensateurs.

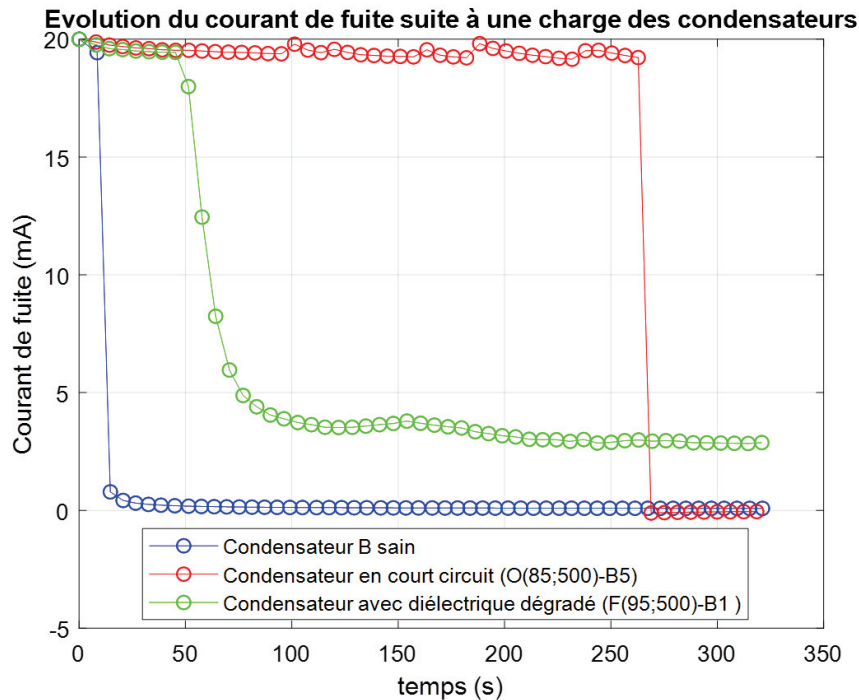


Figure 3.18 Évolution du courant de fuite de 0 à 320 sec (5min+20sec) pour trois condensateurs du fabricant B sous états de santé différents

La Figure 3.18 montre l'évolution moyenne du courant de fuite en fonction du temps suite à une charge. Le condensateur sain se charge rapidement (500V en 10 sec) et représente un courant de fuite aux alentours de 0.8mA à 5 min. Le condensateur ayant un diélectrique dégradé prend plus de temps pour se charger (500V en 50 sec) puis son courant de fuite se stabilise à 3.5mA au bout de 5 minutes car l'électrolyte n'arrive plus à auto-régénérer tous les défauts d'isolation du diélectrique. Le condensateur présentant un court-circuit n'arrivait même pas à se charger (200V maximum avant de claquer et recommencer sa charge). La manipulation de ce dernier condensateur a été arrêtée après 260 sec.

3.2.3. Variation de la masse

L'augmentation de la résistance équivalente série est principalement liée à l'évaporation de l'électrolyte [12]. Afin de la corrélérer à l'augmentation de l'ESR, des mesures de la masse ont été effectuées pour les composants sans thermocouple, à chaque caractérisation. Pour tous les composants ayant subi un vieillissement par dérive, la variation de masse n'excède pas les 3 grammes soit 4%. Afin de confirmer que la variation de l'ESR est liée à l'évaporation de l'électrolyte, sur la Figure 3.19, est

représentée la masse des composants des fabricants A et B en fonction des valeurs des ESR normalisées correspondantes lors d'un vieillissement O (85 ; 500).

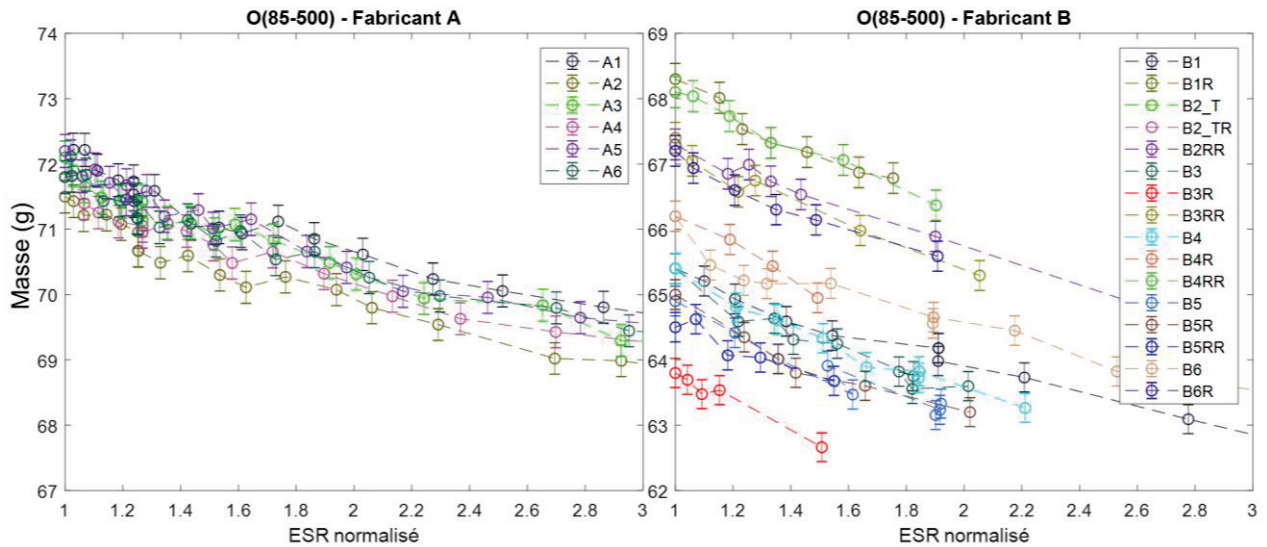


Figure 3.19 Évolution de la masse des condensateurs des fabricants A et B en fonction des ESR normalisées lors du vieillissement O(85 ; 500)

La Figure 3.19 montre bien une relation linéaire entre la quantité d'électrolyte et la variation de l'ESR. Elle met donc en évidence l'influence de la quantité d'électrolyte sur l'ESR.

La quantité d'électrolyte n'est pas le seul facteur décisif sur le vieillissement. La qualité de l'électrolyte et l'étanchéité du boîtier sont aussi à prendre en compte. Ces dernières influencent aussi la vitesse d'évaporation de l'électrolyte. Nous remarquons sur la Figure 2.19 une dispersion plus importante des masses des condensateurs du fabricant B par rapport à ceux du fabricant A. Celle-ci est un indicateur sur le processus de fabrication. L'analyse de la qualité de fabrication sera menée ultérieurement.

3.2.4. Identification des paramètres de la loi de vieillissement

Les analyses sur les défauts par dérive ont été réalisées sur les composants du fabricant A seulement, car plus de la moitié des condensateurs du fabricant B ont présenté des défauts catalectiques. Une analyse post-mortem sera détaillée sur ces derniers dans la suite du manuscrit.

Pour mener notre analyse, la moyenne des valeurs obtenues est calculée, pour chaque indicateur, avec des échantillons du même lot de fabrication, du même essai et lors du même jour de caractérisation. Chaque jour, un point de caractérisation et par essai est ainsi obtenu pour les composants du fabricant A. Puis l'algorithme de Levenberg-Marquardt permet l'extraction des paramètres α_{esr1} , α_{esr2} , α_{esr3} du modèle d'évolution de l'ESR (3.11) et α_{c1} , α_{c2} du modèle de C (3.12).

3.2.4.1. Effets liés à l'ondulation de courant

Avec l'expression de durée de vie basé sur le facteur K_{TI} (chapitre 2 – équation 2.14)(2.13), nous supposons que le courant agissant sur le condensateur peut être assimilé à un échauffement supplémentaire du condensateur.

Pour valider cette hypothèse, les résultats de l'essai F (95 ; 500), caractérisé par un vieillissement en « floating » à 95°C et 500V, sont comparés à ceux de l'essai O (85 ; 500), caractérisé par un vieillissement à 85°C et 500V incluant une ondulation de courant de 2.3A, dont le courant ondulatoire engendre un échauffement de 10°C. L'échauffement de 10°C a pu être observé grâce à la présence de thermocouple au cœur de quelques condensateurs. La Figure 2.20 montre les évolutions de l'ESR et de C lors des vieillissements accélérés F (95 ; 500) et O (85 ; 500). Cette comparaison montre bien que les évolutions des indicateurs lors de l'essai F (95 ; 500) sont très bien corrélées avec celles lors de l'essai O (85 ; 500). Ces deux essais valident donc complètement l'hypothèse faite. Il est donc légitime de représenter l'effet principal du courant sur le vieillissement par un échauffement supplémentaire.

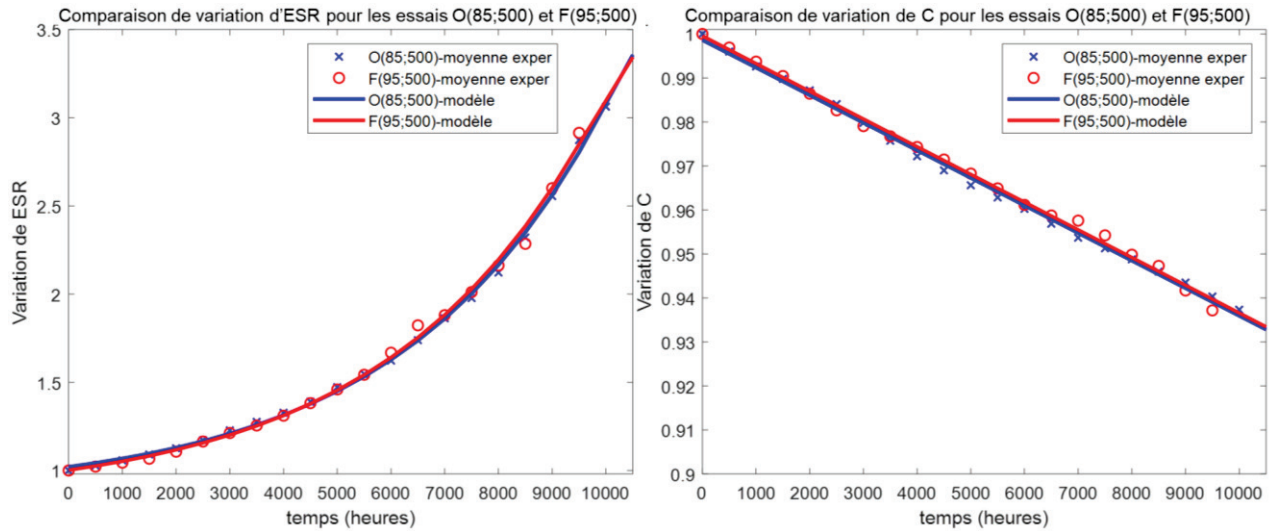


Figure 3.20 Variations de l'ESR et de C avec le temps de vieillissement lors des essais O (85 ; 500) et F (95 ; 500)

3.2.4.2. Identification de l'énergie d'activation et de l'exposant n

Rappelons l'équation d'estimation de la durée de vie (chapitre 2 – équation 2.28) des condensateurs électrolytiques :

$$L_x = L_0 \cdot K_{TI} \cdot K_V = L_0 \cdot e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x + R_{th} \cdot ESR_x \cdot I_{RMSx}^2} - \frac{1}{T_0 + R_{th} \cdot ESR_0 \cdot I_{RMS0}^2} \right)} \left(\frac{V_0}{V_x} \right)^n \quad (2.28)$$

Comme pour la résistance thermique R_{th} , l'énergie d'activation E_a et l'exposant n peuvent être fournis par le fabricant. Cependant, nous avons cherché, grâce aux essais de vieillissement accéléré, à déterminer la valeur de E_a et n dans l'équation 2.28.

Pour trouver le premier terme, il faut choisir les essais pour lesquelles la température est la seule contrainte qui varie, c'est-à-dire les essais F (75 ; 500), F (85 ; 500) et F (95 ; 500), où la tension et le courant restent constants (500V, 0A) (Figure 3.21). Le terme K_V reste alors constant et égal à 1. L'équation (2.12) du chapitre 2 permet d'écrire :

$$L_x = L_0 \cdot K_{TI} \cdot 1 = L_0 \cdot e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{cx}} - \frac{1}{T_{c0}} \right)}$$

$$\ln L_x = \ln L_0 + \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x + \Delta T_x} - \frac{1}{T_0 + \Delta T_0} \right)$$

$$\Delta T_0 = \Delta T_x = 0 \text{ car } I_{RMS0} = I_{RMSx} = 0$$

$$\ln L_x = \ln L_0 + \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right)$$

$$\frac{E_a}{k} = \frac{\ln L_x - \ln L_0}{\left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (3.13)$$

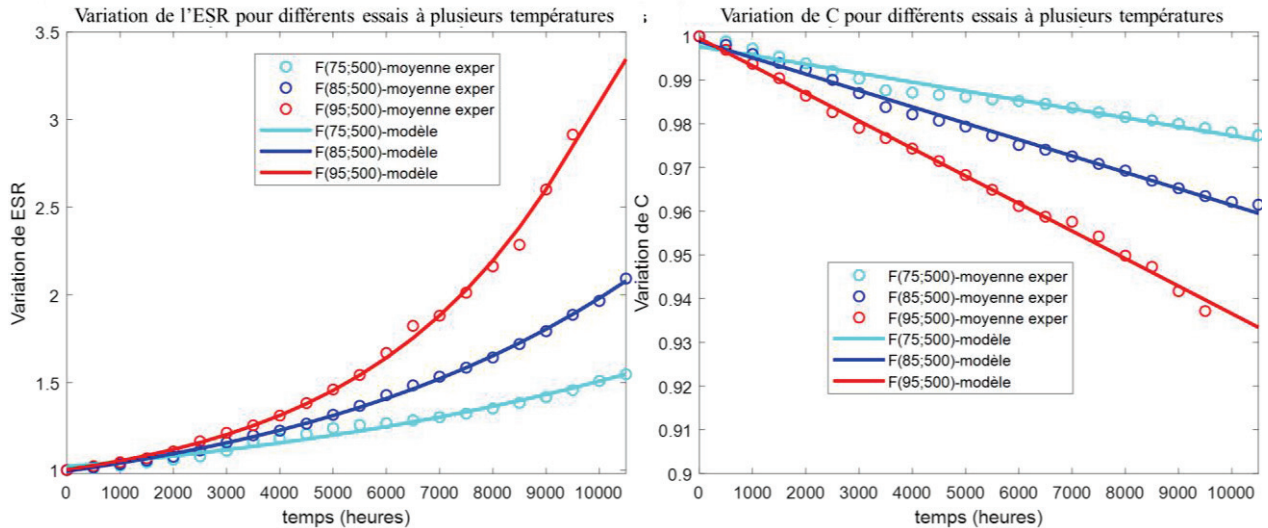


Figure 3.21 Évolution temporelle des moyennes normalisées de l'ESR et de C à 120Hz pour différents essais de vieillissement à 500V

Pour valider la valeur de l'énergie d'activation obtenue à 500V, les essais F (85 ; 400) et F (95 ; 400) (Figure 3.22) peuvent être aussi utilisés. Comme elle est indépendante de la tension, la valeur devrait être la même que pour les trois essais précédents.

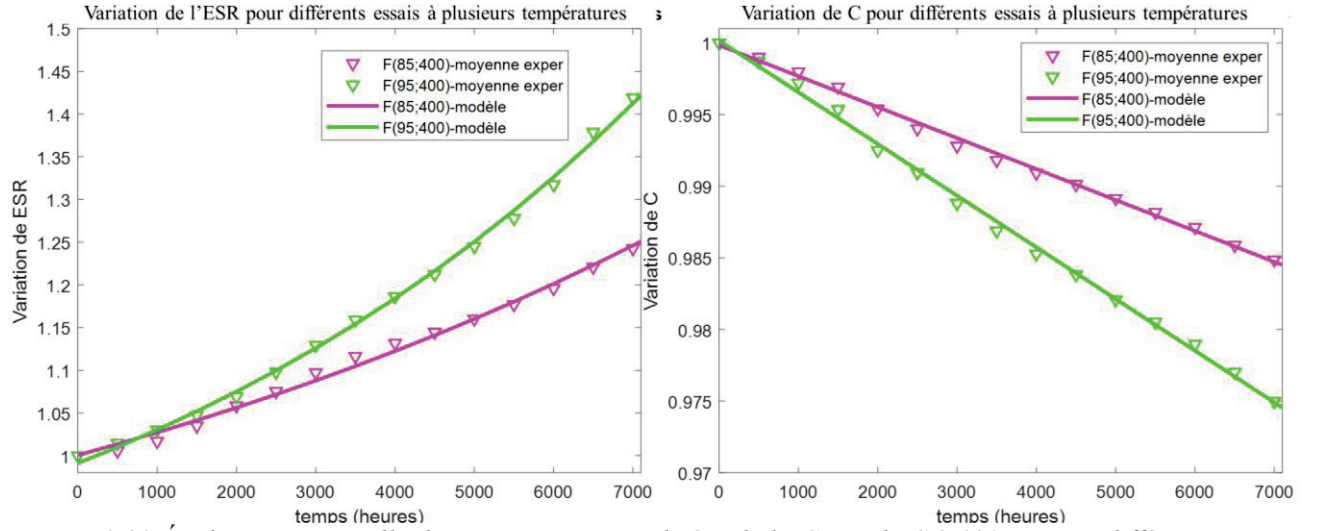


Figure 3.22 Évolution temporelle des moyennes normalisées de l'ESR et de C à 120Hz pour différents essais de vieillissement à 400V

Pour trouver le second terme n relatif à l'exposant de l'équation (2.28) ci-dessus, il est nécessaire de choisir les essais pour lesquels la tension est la seule contrainte variée (F (85 ; 500) et F (85 ; 400) ou F (95 ; 500) et F (95 ; 400)), et où la température et le courant restent donc constants (85°C, 0A) ou (95°C, 0A) (Figure 3.23). Le terme K_{TI} reste donc égal à une constante « a » L'équation (2.25) du chapitre 2 donne alors :

$$L_x = L_0 \cdot a \cdot K_V = L_0 \cdot a \cdot \left(\frac{V_0}{V_x} \right)^n$$

$$\frac{L_x}{L_0} \sim \left(\frac{V_0}{V_x} \right)^n$$

$$n = \frac{\ln \frac{L_x}{L_0}}{\ln \frac{V_0}{V_x}}$$

$$n = - \frac{\ln L_x - \ln L_0}{\ln V_x - \ln V_0} \quad (3.14)$$

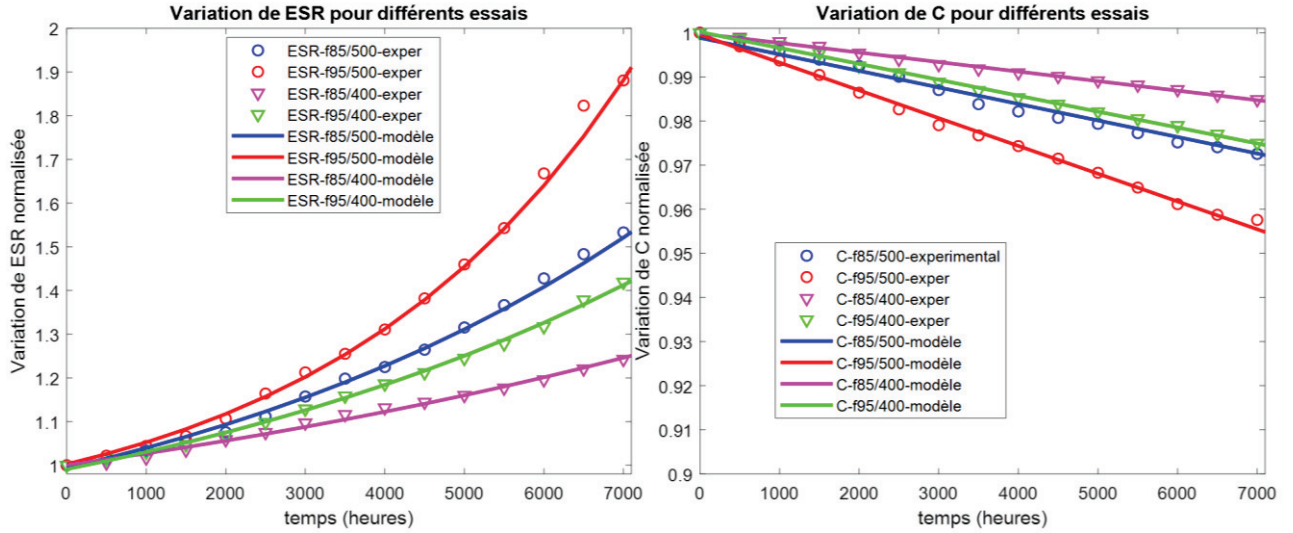


Figure 3.23 Évolution temporelle des moyennes normalisées de l'ESR et de C à 120Hz pour différents essais de vieillissement

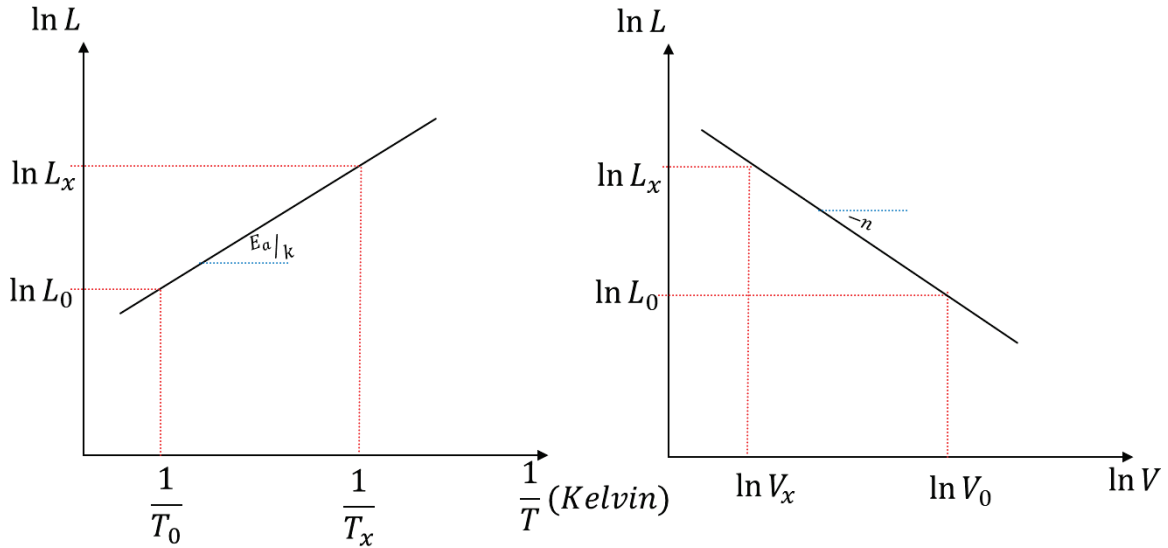


Figure 3.24 Méthodes de calcul de l'énergie d'activation E_a et de l'exposant n

D'après les équations (3.13) et (3.14), les courbes de la Figure 3.24 peuvent être tracées. L'énergie d'activation peut alors être déduite de la pente de la droite de $\ln L$ en fonction de l'inverse de la température $\frac{1}{T}$, et l'exposant n de la pente de la droite de $\ln L$ en fonction de $\ln V$ (Figure 3.24). Cependant, il est dans ce cas nécessaire d'attendre la fin de vie (ou un critère de fin de vie) L_x et L_0 pour pouvoir déduire l'énergie d'activation E_a et l'exposant n . Aussi nous avons été conduits à introduire une autre méthode pour calculer E_a et n .

D'après les équations (3.11) et (3.12), les évolutions temporelles des indicateurs d'ESR et de C peuvent être représentées en considérant deux vieillissements avec des contraintes différentes (Figure 3.25). Considérons des contraintes de vieillissement F (X ; Y) plus contraignantes pour le condensateur que celles F (X' ; Y') :

$$F(X;Y) > F(X';Y') \quad (3.15)$$

De l'équation (3.11), on peut tirer l'équation et les rapports de proportionnalité suivants :

$$\begin{aligned} ESR(L) &= \alpha_{esr1} + \alpha_{esr2} e^{\alpha_3 L} \\ \Delta \dot{ESR} &\sim e^L \\ L &\sim \ln(\dot{ESR}) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Symboles	Significations
$\Delta \dot{ESR}$	Variation normalisée de $(ESR-ESR_0)/ESR_0$
$\dot{ESR}$	Variation normalisée de ESR/ESR_0

De la même façon, de l'équation (3.12) on peut exprimer les rapports de proportionnalité suivants :

$$\begin{aligned} C(L) &= \alpha_{c1} + \alpha_{c2} L \\ \Delta \dot{C} &\sim L \\ L &\sim \dot{C} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Symboles	Significations
$\Delta \dot{C}$	Variation normalisée de $(C - C_0)/C_0$

En se référant au graphe $ESR(L)$ de la Figure 2.25, de la courbe $F(X;Y)$, nous pouvons trouver le point $(L_0, \text{lié à } ESR_0)$, correspondant par exemple au doublement de l'ESR. De ce point, nous pouvons extrapoler grâce à la courbe $F(X';Y')$, la valeur de ESR_x pour la durée L_0 et la valeur de L_x nécessaire pour atteindre ESR_0 .

Il a été montré :

- qu'à un instant de vieillissement L_0 , la variation de ESR pour $F(X';Y')$ sera moins importante que pour $F(X;Y)$ ($ESR_x < ESR_0$),
- et pour atteindre une variation ESR_0 , il faudra plus de temps pour des contraintes $F(X';Y')$ que pour des contraintes $F(X;Y)$ ($L_x > L_0$).

Ce même raisonnement peut être utilisé pour C_0 , C_x , L_0 et L_x .

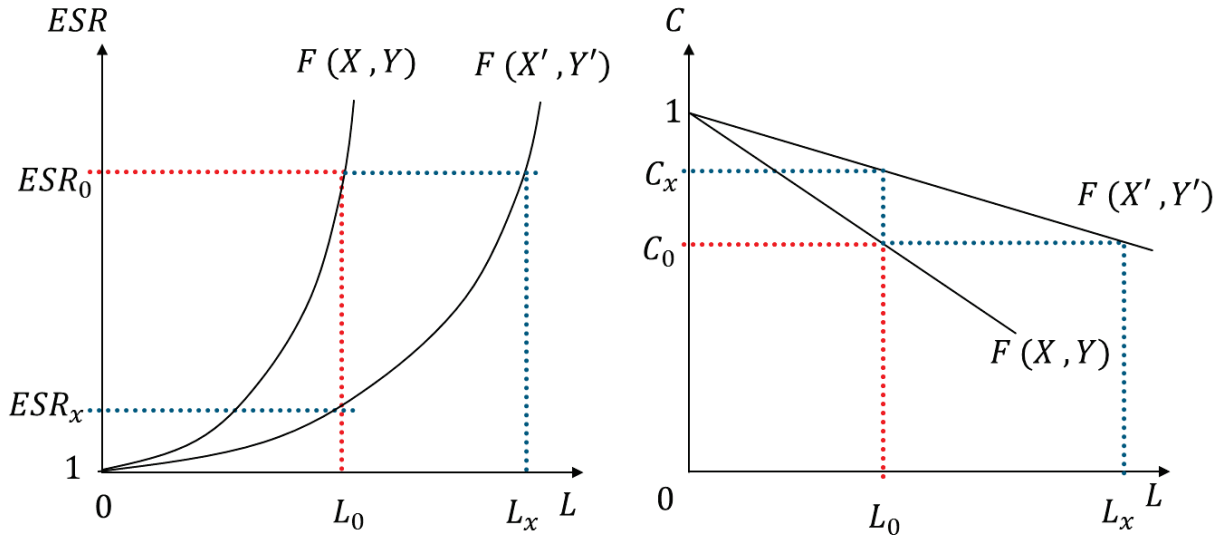


Figure 3.25 Évolution normalisée des indicateurs ESR et C pour deux vieillissements différents

Des équations (3.16) et (3.17), on peut tracer les nouvelles courbes de variation $\ln ESR$ et ΔC (Figure 3.26) :

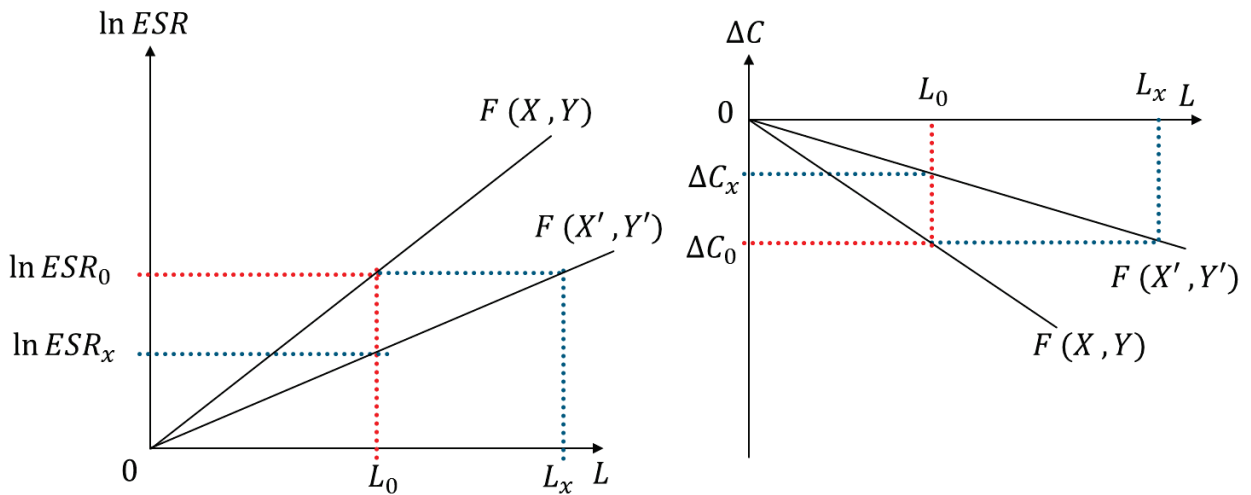


Figure 3.26 Évolution normalisée des variations $\ln (ESR)$ et ΔC lors de deux vieillissements différents

D'après les règles des transformations géométriques planes en mathématiques [109], ces transformations sont qualifiées d'agrandissement lorsque deux croquis S et S' sont semblables et le rapport de similitude r de S' à S est supérieur à 1 (Figure 3.27).

Un agrandissement peut aussi s'exprimer comme le résultat de la composée d'une homothétie dont la valeur absolue du rapport r est strictement supérieure à 1, et d'une isométrie (Figure 3.27). Les translations et les rotations sont des isométries directes.

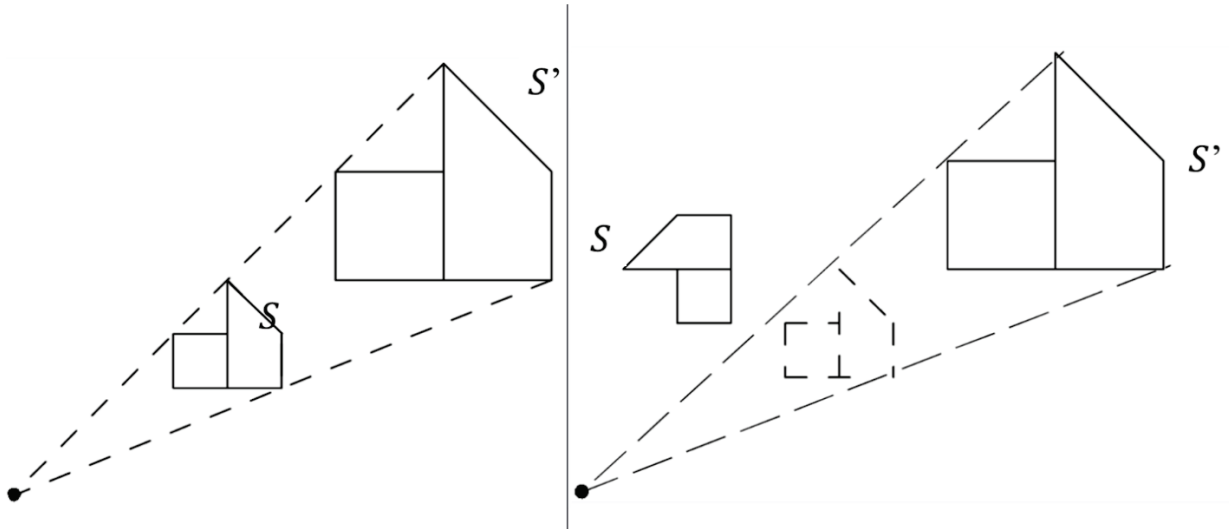


Figure 3.27 Homothétie (à gauche) et isométrie (rotation) suivie d'une homothétie (à droite)

Dans notre cas d'étude, les variations de l'ESR suivant les vieillissements présentent une homothétie et les variations de C présentent une isométrie suivie d'une homothétie. Les croquis S et S' sélectionnés sur la Figure 3.28 illustrent bien les homothéties.

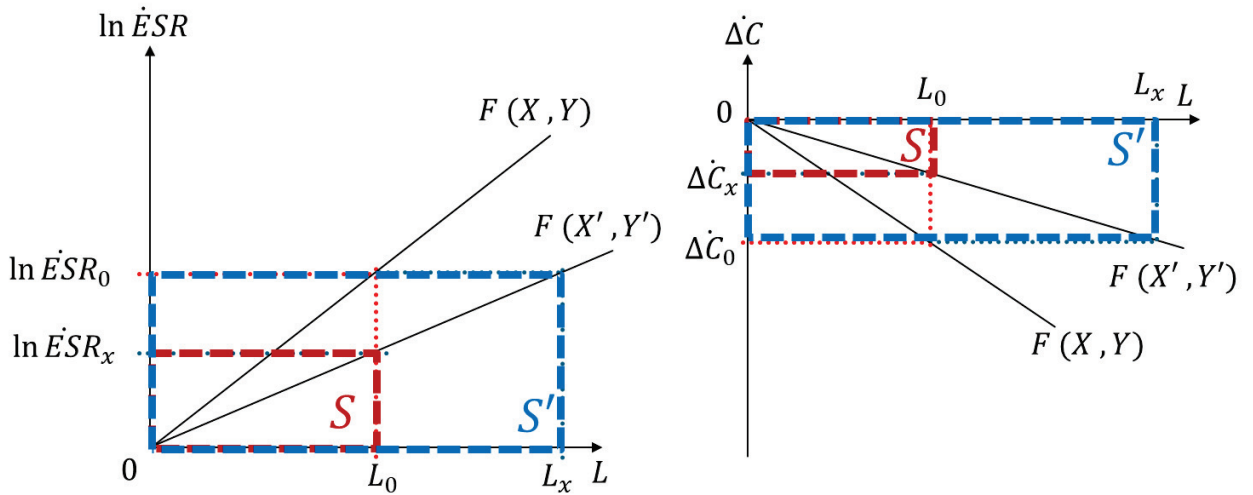


Figure 3.28 Deux rectangles S et S' liés par homothétie

Grâce au rapport de similitude, les formules des transformées géométriques planes permettent d'élaborer les égalités suivantes :

$$\frac{\ln \dot{ESR}_0}{\ln \dot{ESR}_x} = \frac{L_x}{L_0} = r_1 \quad (3.18)$$

$$\frac{\Delta \dot{C}_0}{\Delta \dot{C}_x} = \frac{L_x}{L_0} = r_2 \quad (3.19)$$

Revenons donc à l'équation (3.13) qui permet le calcul de E_a :

$$E_a = k \frac{\ln \frac{L_x}{L_0}}{\left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (3.20)$$

En remplaçant le terme $\frac{L_x}{L_0}$ par ceux trouvés aux équations (3.18) et (3.18), l'équation précédente devient :

Energie d'activation par rapport à ESR

$$E_{a/ESR} = k \frac{\ln (\ln ESR_0) - \ln (\ln ESR_x)}{\left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (3.21)$$

Energie d'activation par rapport à C

$$E_{a/C} = k \frac{\ln \Delta C_0 - \ln \Delta C_x}{\left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (3.22)$$

Quant à l'équation (3.14) qui permet le calcul de n :

$$n = - \frac{\ln \frac{L_x}{L_0}}{\ln V_x - \ln V_0} \quad (3.23)$$

Si le terme $\frac{L_x}{L_0}$ est remplacé par ceux trouvés aux équations (3.18) et (3.18), l'équation précédente donne :

L'exposant n par rapport à ESR

$$n_{/ESR} = \frac{\ln (\ln ESR_0) - \ln (\ln ESR_x)}{\ln V_0 - \ln V_x} \quad (3.24)$$

L'exposant n par rapport à C

$$n_{/C} = \frac{\ln \Delta C_0 - \ln \Delta C_x}{\ln V_0 - \ln V_x} \quad (3.25)$$

En balayant les durées L_0 et L_x , et par suite leurs correspondances $\ln ESR_0$, $\ln ESR_x$ et ΔC_0 , ΔC_x , sur toute la durée des vieillissements, l'énergie d'activation et l'exposant n à chaque instant peut être déduite. Plus la fenêtre de temps considérée est importante, plus les valeurs de E_a (Figure 3.29 et Figure 3.31) et n (Figure 3.30) convergent et deviennent stables.

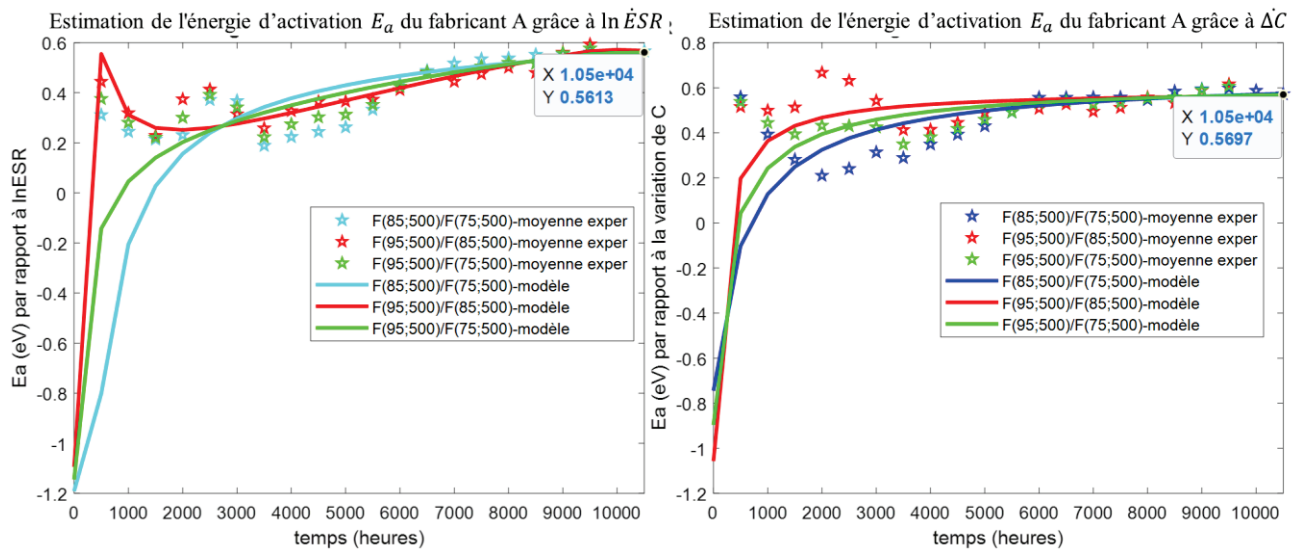


Figure 3.29 Estimation de l'énergie d'activation à 500V par rapport à la variation de l'ESR (à gauche) et de C (à droite)

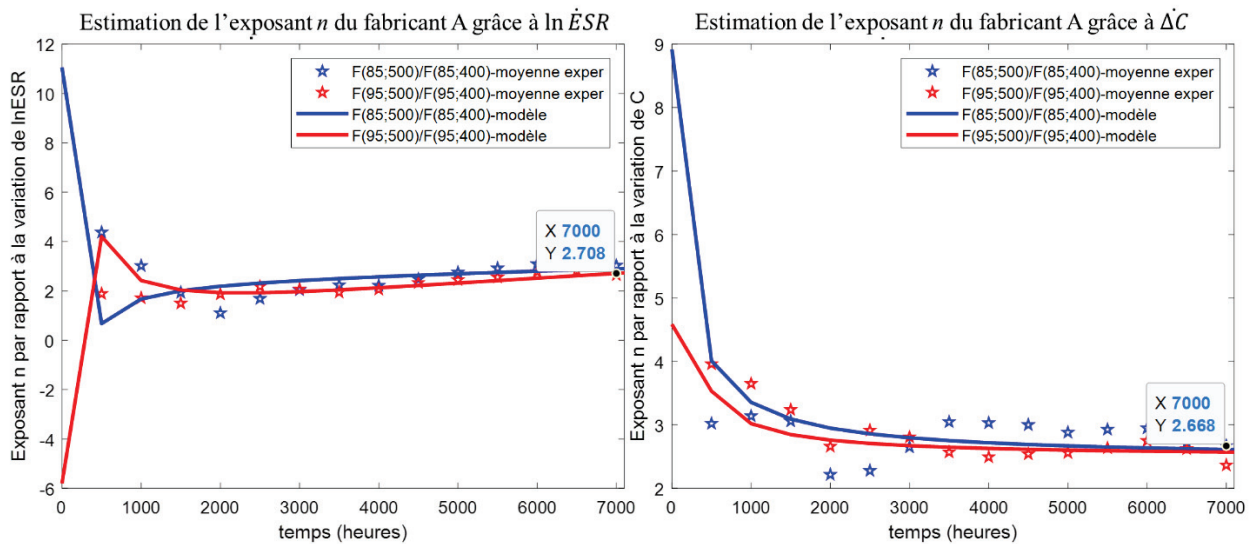


Figure 3.30 Estimation de l'exposant n à 85°C et 95°C par rapport à la variation de l'ESR (à gauche) et de C (à droite)

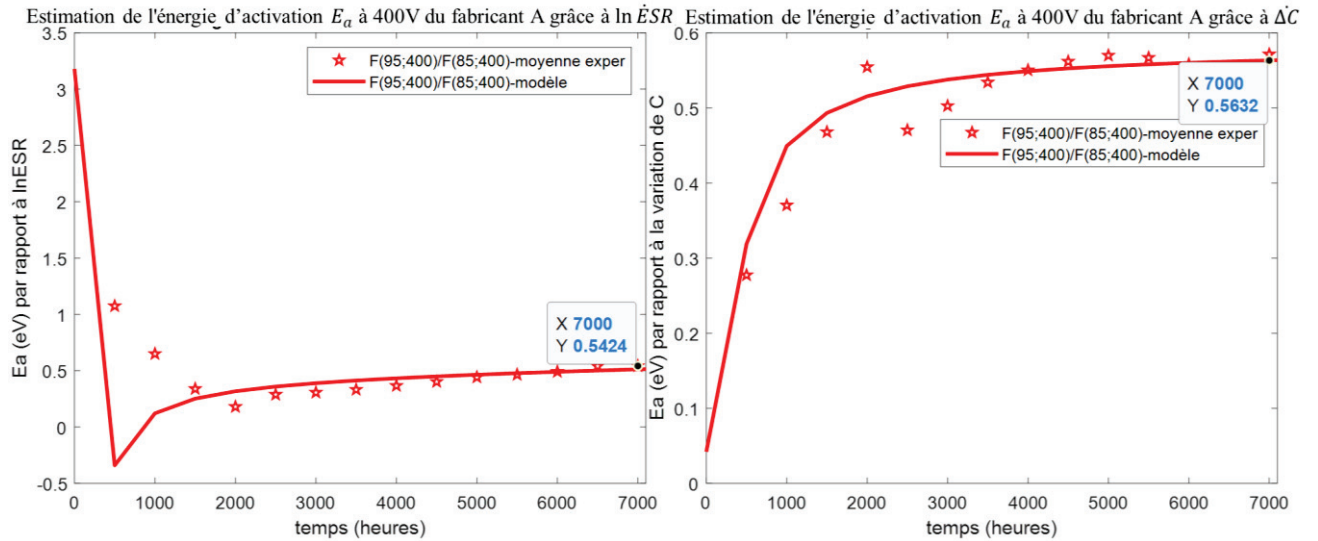


Figure 3.31 Estimation de l'énergie d'activation à 400V par rapport à la variation de l'ESR (à gauche) et de C (à droite)

Après environ 3000h de vieillissements distincts, les valeurs de E_a (quelle que soit la tension) et n (quelle que soit la température) commencent à se stabiliser. Ces calculs ont permis de déterminer les valeurs des constantes suivantes :

Energie d'activation pour l'ESR à 500V	$E_{a/ESR\ 500V} = \sim[0,55; 0,57]eV$
Energie d'activation pour l'ESR à 400V	$E_{a/ESR\ 400V} = \sim[0,54; 0,55]eV$
Energie d'activation pour C à 500V	$E_{a/C\ 500V} = \sim[0,56; 0,57]eV$
Energie d'activation pour C à 400V	$E_{a/C\ 400V} = \sim[0,56; 0,57]eV$
L'exposant n pour ESR à 85°C	$n_{/ESR\ 85^{\circ}C} = \sim[2,65 ; 2,8]$
L'exposant n pour ESR à 95°C	$n_{/ESR\ 95^{\circ}C} = \sim[2,6 ; 2,7]$
L'exposant n pour C à 85°C	$n_{/C\ 85^{\circ}C} = \sim[2,7 ; 2,8]$
L'exposant n pour C à 95°C	$n_{/C\ 95^{\circ}C} = \sim[2,5 ; 2,7]$

Tableau 3.1 Résultats expérimentaux pour E_a et n

On peut donc bien vérifier que :

$$E_{a/ESR\ 500V} \approx E_{a/ESR\ 400V} \approx E_{a/C\ 500V} \approx E_{a/C\ 500V}$$

et que :

$$n_{/ESR\ 85^{\circ}C} \approx n_{/ESR\ 95^{\circ}C} \approx n_{/C\ 85^{\circ}C} \approx n_{/C\ 95^{\circ}C}$$

Comme indiqué par l'équation (2.29) du chapitre 2, les valeurs de E_a et n sont bien dans leurs intervalles théoriques propres aux condensateurs électrolytiques.

$$E_{a/ESR} \approx E_{a/C} \in [0.3eV ; 0.95eV]$$

$$n_{/ESR} \approx n_{/C} \in [1 ; 6]$$

3.3. Défaillances catalectiques

3.3.1. Condensateurs défaillants et analyse post mortem

20 composants du fabricant B sur 39, comparés à 2 des 25 du fabricant A, ont présenté des défaillances catalectiques. 12 condensateurs (10 du fabricant B et 2 du fabricant A) ont été analysés par le laboratoire « Electronic & Materials Expertise » de Schneider Electric (SE) et 2 condensateurs défaillants ont été renvoyés au fabricant B pour que ce dernier explique la non-conformité de ses condensateurs vis-à-vis du « datasheet » (cf. Tableau 2.3 du chapitre 2). Les condensateurs sélectionnés sont précisés dans le Tableau 3.2 ci-dessous.

N. B : Rappelons que les extensions T, R ou RR utilisées dans la numérotation des condensateurs représentent respectivement un condensateur muni de thermocouple interne, un condensateur remplacé une fois ou deux fois suite à une défaillance.

Essai	Numéro du condensateur défectueux	Fabricant	Durée de vie avant défaillance (h)	État final	Analyse de défaut faite par :
F (85 ; 500)	2-1	B	3420	Circuit ouvert	SE
	2-2T	B	3400	Circuit ouvert	Fabricant B
	2-3	B	4232	Circuit ouvert	SE
	2-1R	B	3240	Circuit ouvert	Pas d'action
O (85 ; 500)	4-2 T	B	2620	Circuit ouvert	SE
	4-5	B	3740	$20 \times ESR_{init}$; $0,5 \times C_{init}$	SE
	4-3	B	4115	I_L très élevé	SE
	4-4	B	4171	Circuit ouvert	SE
	4-1	B	5210	Circuit ouvert	SE
	4-2TR	B	3615	Circuit ouvert	Pas d'action
	4-6	B	6430	Circuit ouvert	SE
	4-5R	B	3254	I_L très élevé	Pas d'action
	4-3R	B	3403	I_L très élevé	SE
	4-1R	B	3430	Circuit ouvert	Pas d'action
F (95 ; 500)	5-1	B	2170	$60 \times ESR_{init}$; $0,7 \times C_{init}$	SE
	5-2T	B	2150	Circuit ouvert	Pas d'action
	5-3	B	2830	$9 \times ESR_{init}$; $0,5 \times C_{init}$	Fabricant B
	5-1	A	4720	$60 \times ESR_{init}$; $0,7 \times C_{init}$	SE
	5-2	A	6720	$60 \times ESR_{init}$; $0,7 \times C_{init}$	SE
F (75 ; 500)	2-2T	B	4500	$20 \times ESR_{init}$; $0,5 \times C_{init}$	Pas d'action
	2-3	B	7020	$60 \times ESR_{init}$; $0,7 \times C_{init}$	Pas d'action

Tableau 3.2 Durée de vie des condensateurs jusqu'à la défaillance, état final et équipe qui a pris en charge l'analyse post-mortem

Le laboratoire « Electronic & Materials Expertise (EME) » de Schneider Electric a utilisé les équipements détaillés dans le Tableau 3.3 pour réaliser l'analyse post-mortem.

Non de l'expérience	Investigation	Références des équipements
Examen macroscopique	Inspection visuelle	Macroscopie (Canon Powershot Camera) Stéréoscope (ZEISS DV12 binocular)
Observations par microscopie électronique à balayage (SEM)	Observation de fort grossissement en surface et de contraste chimique	FEI Quanta 600
Analyse par spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS)	Détection d'éléments chimiques en surface	EDAX SDD Octane
Radiographie aux rayons X	Analyse aux rayons X 2D : méthode d'imagerie permettant d'obtenir l'image radiographique d'un plan de coupe d'une pièce	YXLON Cheetah

Tableau 3.3 Différents types d'exams post-mortem réalisés

3.3.2. Inspections visuelles et observations

Les 13 condensateurs défectueux ont été observés visuellement. Les points suivants ont été constatés :

- Les condensateurs B2-1 (Figure 3.32), B2-3 (Figure 3.33), B4-1 (Figure 3.34), B4-3 (Figure 3.36), B4-4(Figure 3.37), B4-5(Figure 3.38), B4-6 (Figure 3.39), B4-3R (Figure 3.40) présentent un ballonnement de la face supérieure avec déformation de l'opercule noir sauf pour le B2-1. À noter que le condensateur B4-2 T n'a pas cet opercule car un thermocouple pour les mesures de température cœur passe par la face supérieure.
- Les condensateurs du fabricant A n'ayant pas d'évent de sécurité (A5-1 ; A5-2) (Figure 3.43), le joint en caoutchouc du côté des connexions de A5-1 a été déformé.
- Tous les condensateurs, excepté les B2-1 et B4-4R, présentent des corrosions sur l'une des bandes de connexion (côté anode).
- Tous les condensateurs, excepté le B4-4R, présentent des résidus externes de fuite d'électrolyte.
- Les condensateurs B2-1, B2-3, B4-5, B4-3R, A5-2T ne présentent pas de ternissement du boîtier.
- Les condensateurs B4-1, B4-3, B4-4 présentent un ternissement modéré du boîtier.
- Les condensateurs B4-2T, B4-6, B 4-4R, B5-1 (Figure 3.41), A5-1 présentent un ternissement des bornes.

Le Tableau 3.4 résume les différents défauts observés sur les 13 condensateurs :

Fabricant + Numéro du condensateur défaillant	Boîtier gonflé, opercule noir déformé	Ternissement du boîtier ou fuite électrolytique	Inclinaison du bobinot	Présence d'électrolyte à l'intérieur du boîtier	Claquage du diélectrique	Corrosion des bandes
B2-1	Boîtier gonflé / Pas de déformation de l'opercule noir	OUI	OUI	OUI	OUI	NON
B2-3	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
B4-1	OUI	OUI (modéré)	NON	Résidus secs	NON	OUI
B4-2T	Pas d'opercule noir (car présence de thermocouple)	OUI	NON	NON	NON	OUI
B4-3	OUI	OUI (modéré)	NON	Résidus secs	NON	OUI
B4-4	OUI	OUI (modéré)	OUI	Résidus secs	NON	OUI
B4-5	OUI	OUI	OUI (modéré)	Résidus secs et brûlés	OUI	OUI
B4-6	OUI	OUI (modéré)	OUI	Résidus secs	OUI	OUI
B4-3R	OUI	OUI	OUI (modéré)	NON	NON	OUI
B4-4R	NON	NON	OUI (modéré)	OUI	NON	NON
B5-1	OUI	OUI	OUI	NON	NON	OUI
A5-1	Aucun événement d'ouverture (gonflement du joint de la face inférieure)	OUI (du dessous)	NON	NON	NON	OUI
A5-2	Aucun événement d'ouverture	NON	OUI (modéré)	NON	NON	OUI

Tableau 3.4 Résultats généraux observés sur les 13 condensateurs analysés

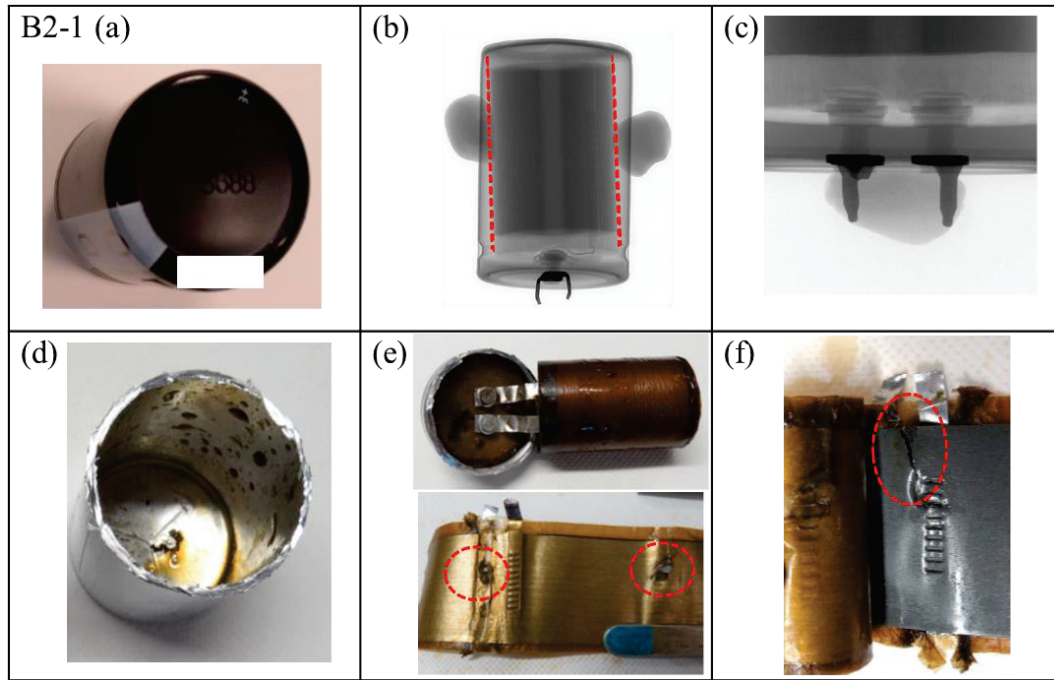


Figure 3.32 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B2-1

Pour le condensateur B2-1 (Figure 3.32), un trou à travers plusieurs couches d'électrode (e) ainsi qu'une fissure de l'électrode d'aluminium proche d'une bande de connexion (f) apparaissent clairement. Ce phénomène se manifeste dans le cas d'un claquage diélectrique entre plusieurs couches à l'intérieur du bobineau.

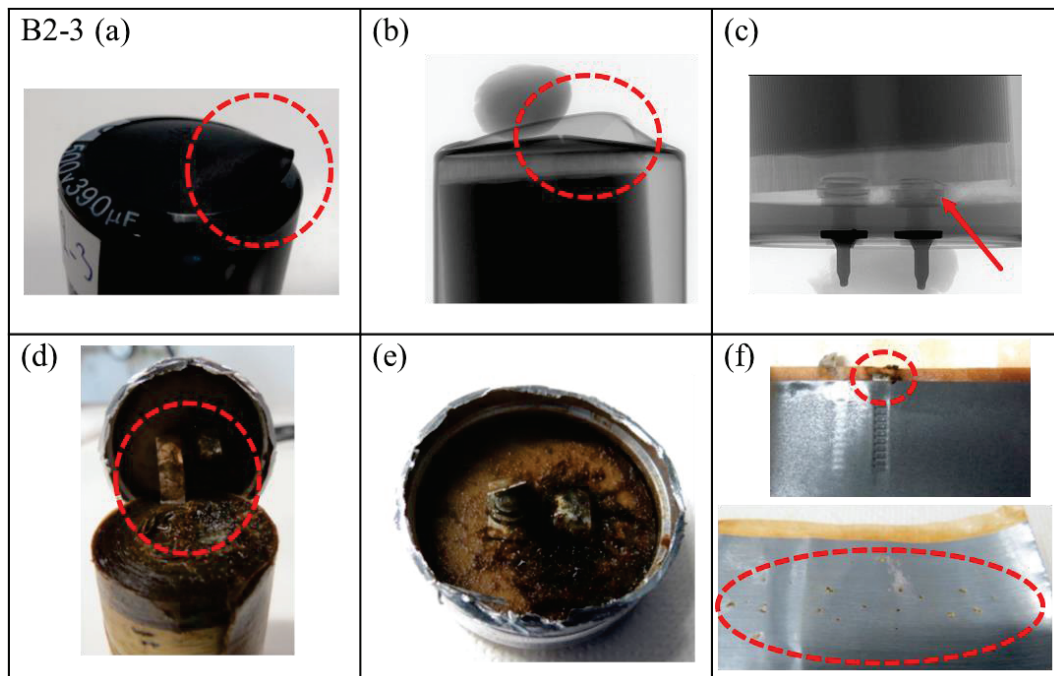


Figure 3.33 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B2-3

Pour le condensateur B2-3 (Figure 3.33), plusieurs petits trous (f) sur l'anode révèlent des claquages du diélectrique localisés ainsi qu'une corrosion de la bande de connexion d'anode (d)(f). Cette corrosion a causé la rupture totale de la bande, d'où le mode de défaillance en circuit ouvert.

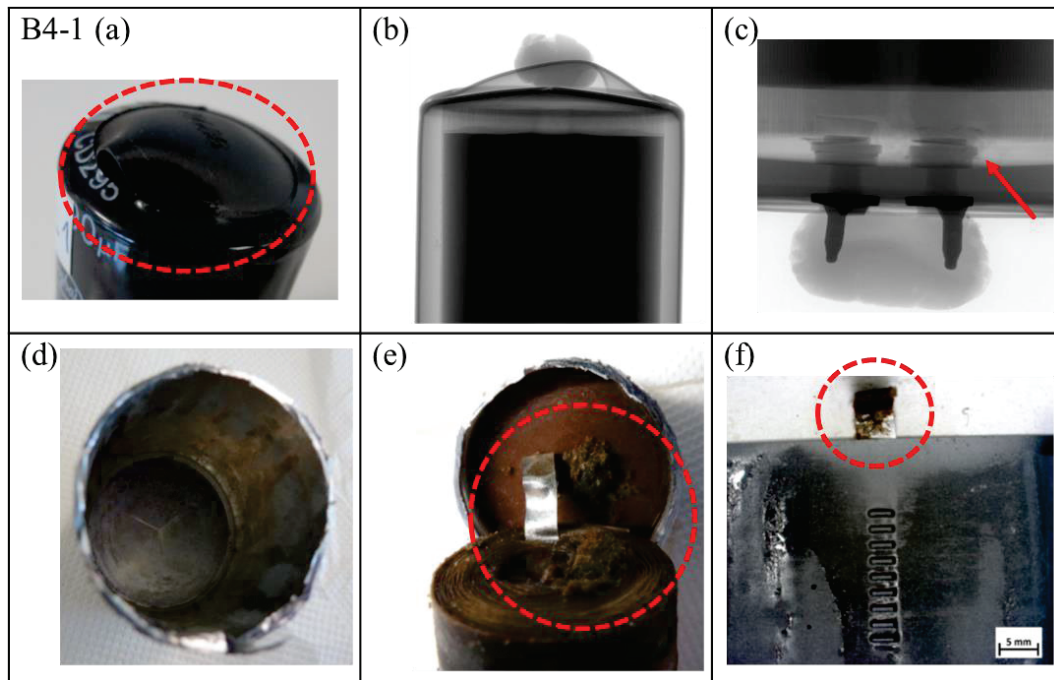


Figure 3.34 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-1

Pour le condensateur B4-1, la Figure 3.34 montre des résidus secs d'électrolyte à l'intérieur du boîtier (d) ainsi qu'une corrosion assez importante de la bande de connexion d'anode (c)(f). Cette corrosion a causé la rupture totale de la bande (e), d'où le mode de défaillance en circuit ouvert.

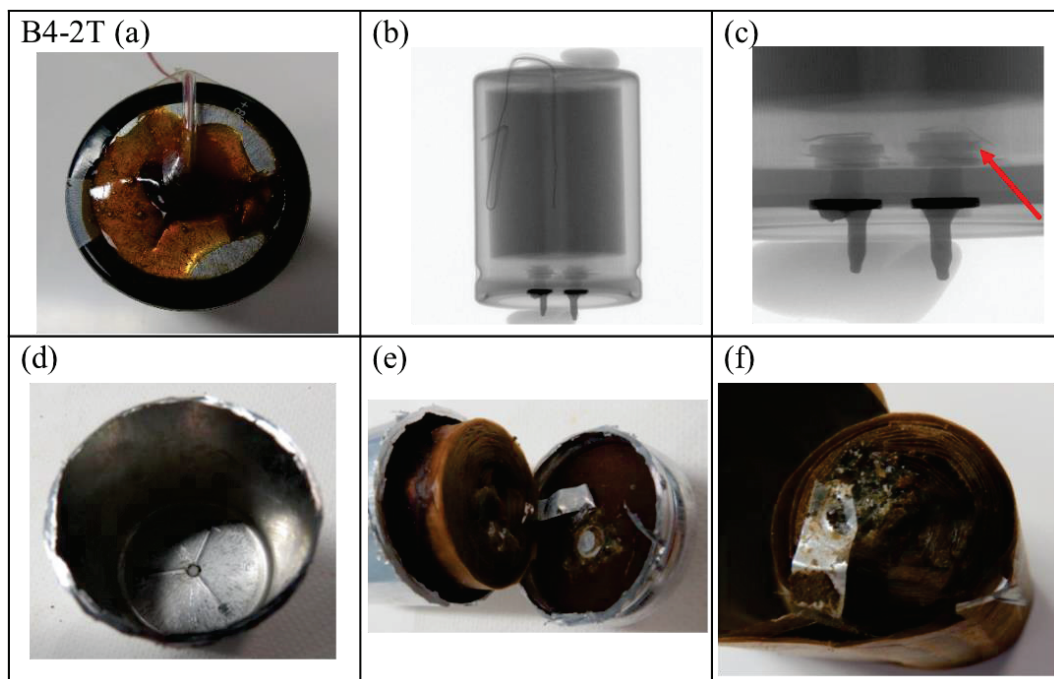


Figure 3.35 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-2T

Pour le condensateur B4-2T (Figure 3.35), la présence du trou sur la face supérieure du condensateur pour faire passer le thermocouple (a) a favorisé l'assèchement du bobinot (b) (l'époxy pour l'étanchéité n'étant pas assez efficace). Une corrosion importante de la bande de connexion d'anode apparaît aussi (c)(f). Cette corrosion a causé la rupture totale de la bande (e), d'où le mode de défaillance en circuit ouvert.

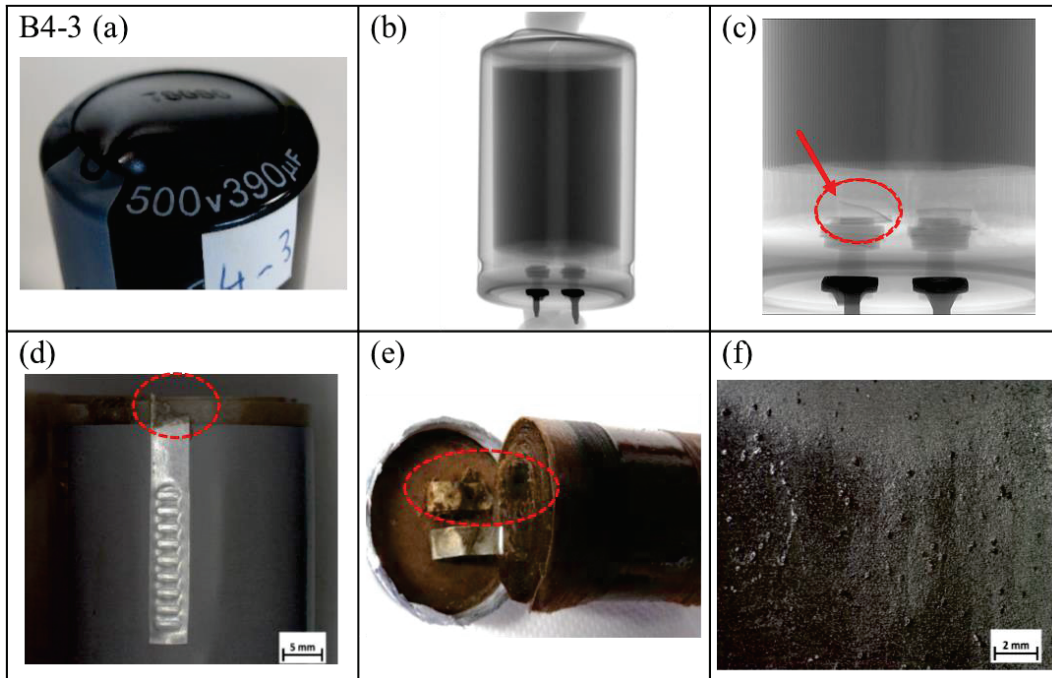


Figure 3.36 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-3

Pour le condensateur B4-3 (Figure 3.36), une corrosion de la bande de connexion d'anode est visible (c)(e). Nous voyons aussi une texture suspectieuse de l'anode (f) pouvant être à l'origine de la hausse du courant de fuite due à la dégradation du diélectrique.

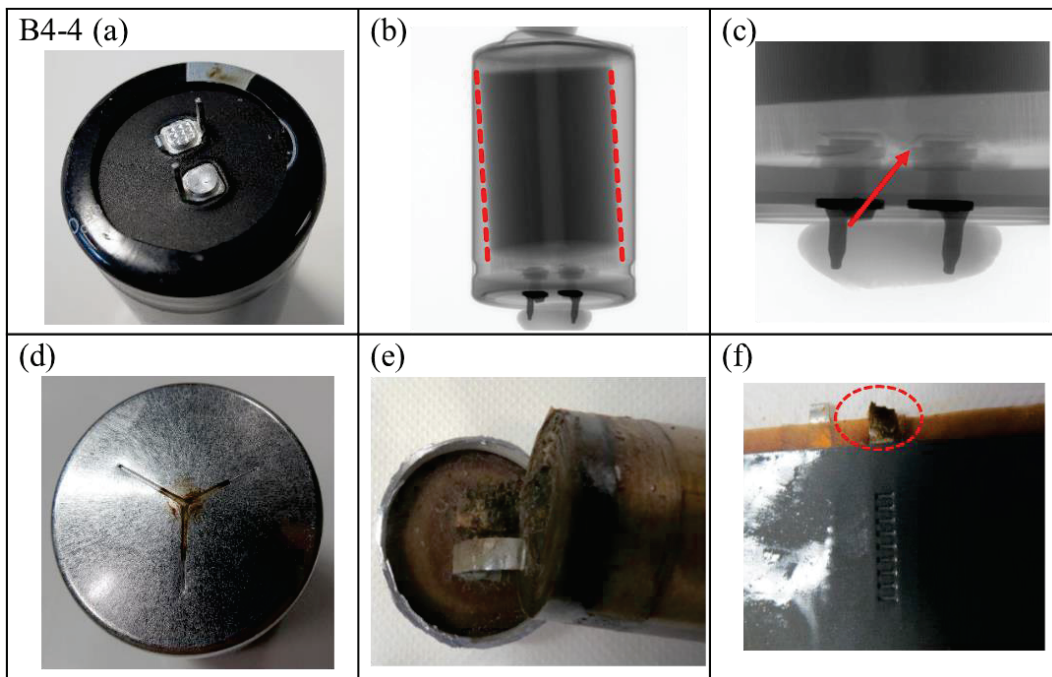


Figure 3.37 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-4

Pour le condensateur B4-4 (Figure 3.37), un bobinot asséché ainsi qu'une corrosion assez importante de la bande de connexion d'anode apparaît (e)(f). Cette corrosion a causé la rupture totale de la bande(c)(e), d'où le mode de défaillance en circuit ouvert.

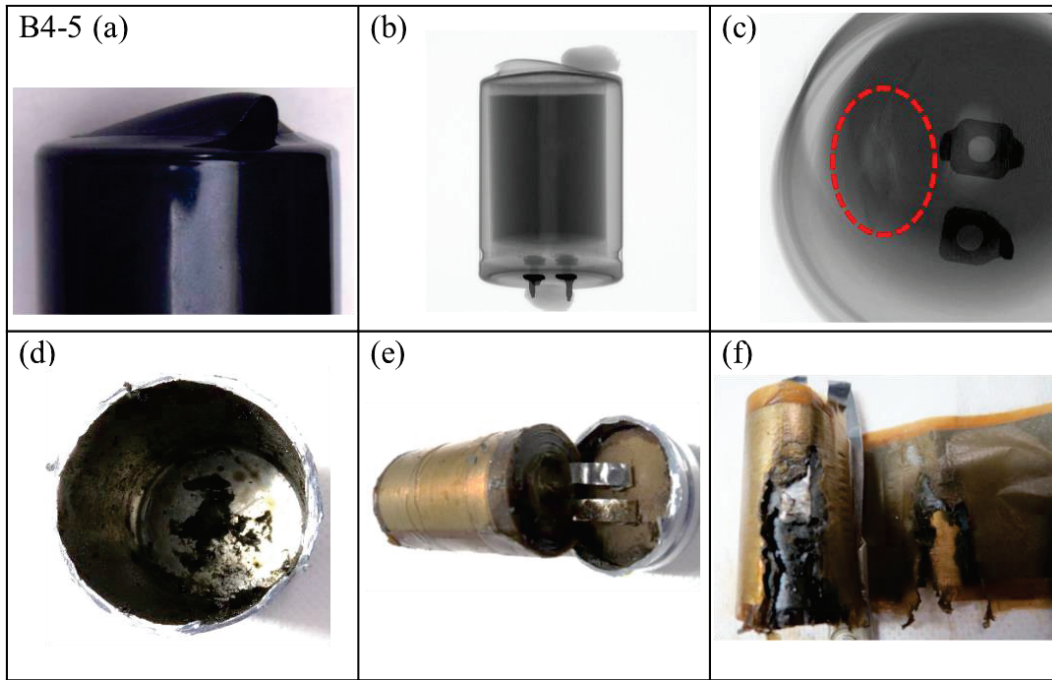


Figure 3.38 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-5

Pour le condensateur B4-5 (Figure 3.38), nous remarquons des résidus secs d'électrolyte à l'intérieur du boîtier (d) ainsi que la présence de plusieurs couches consumées (f) visible aussi sous rayons X (c). Cela peut s'expliquer par l'occurrence d'un court-circuit entre couches. Un début de corrosion de la bande de connexion d'anode est aussi visible (e).

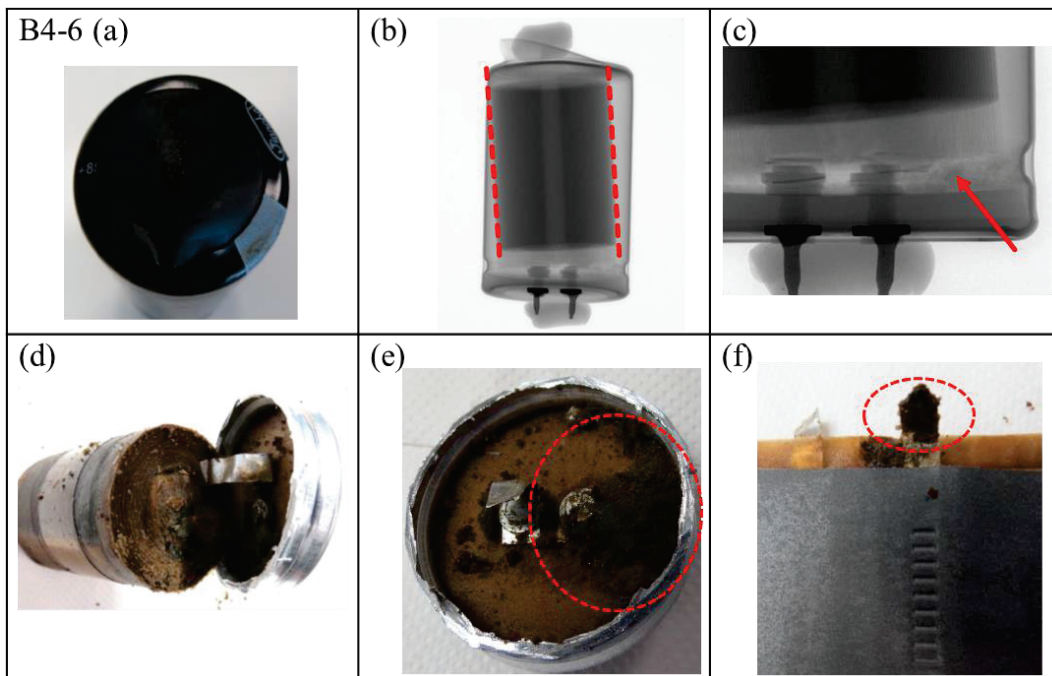


Figure 3.39 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-6

Pour le condensateur B4-6, la Figure 3.39 montre l'inclinaison du bobinot par rapport au boîtier (b) ainsi qu'une corrosion assez importante de la bande de connexion d'anode (e)(f). Cette corrosion a causé la rupture totale de la bande (d), d'où le mode de défaillance en circuit ouvert.

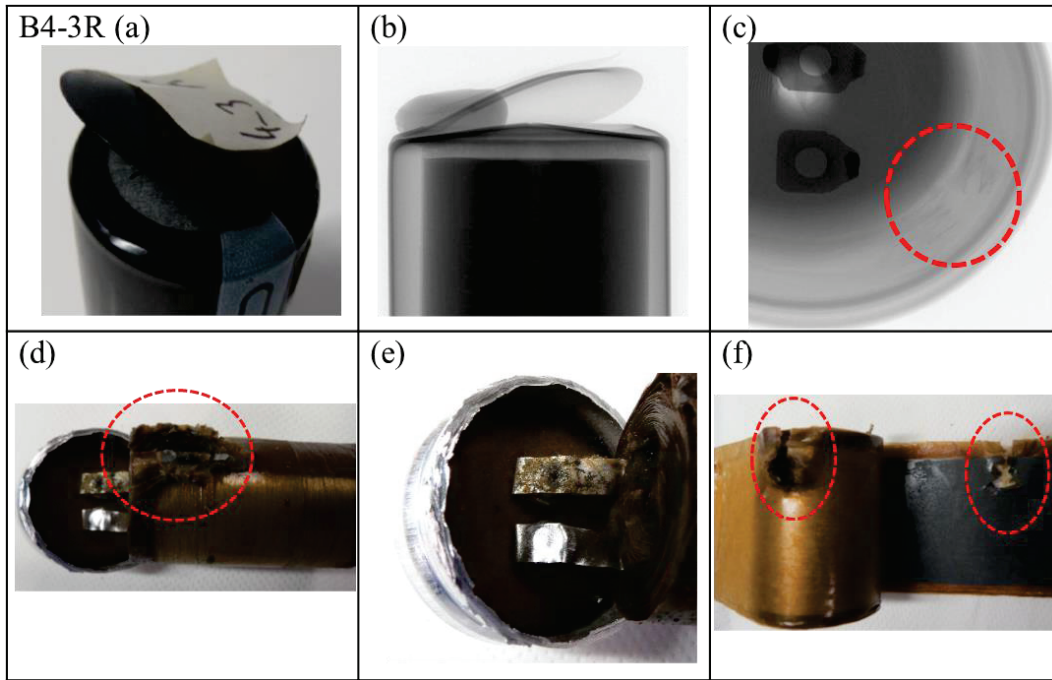


Figure 3.40 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B4-3R

Pour le condensateur B4-3R (Figure 3.40), le boîtier a gonflé (a)(b) et plusieurs couches consumées (d)(f) sont aussi visibles sous rayons X (c). Cela peut s'expliquer par l'occurrence d'un court-circuit entre couches. Il y a aussi un début de corrosion de la bande de connexion d'anode (e).

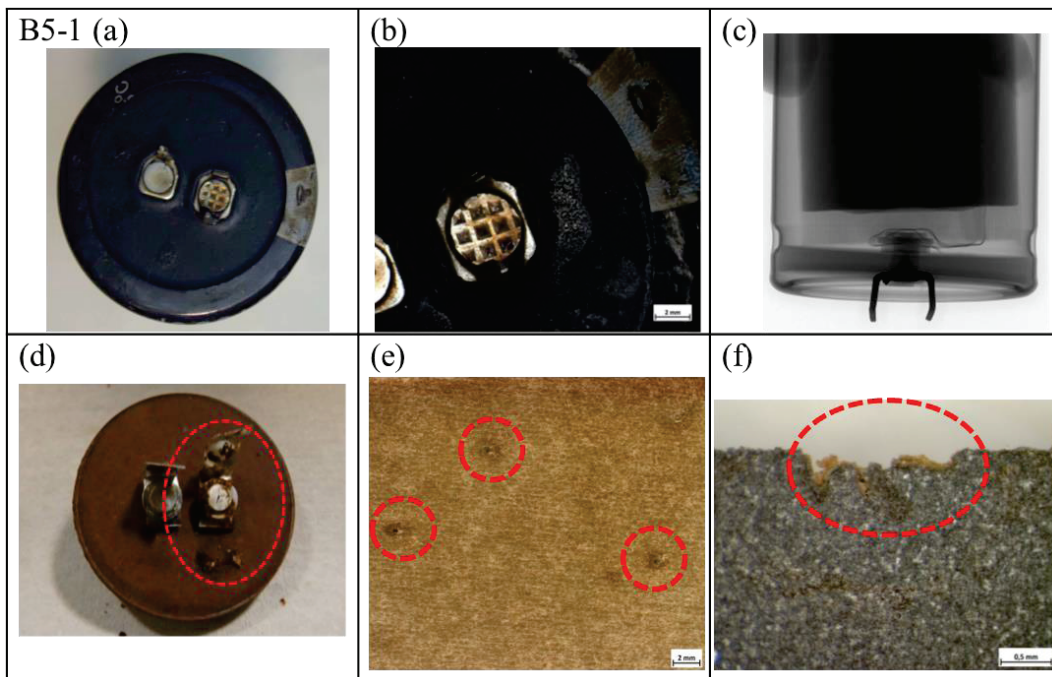


Figure 3.41 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur B5-1

Pour le condensateur B5-1 (Figure 3.41), plusieurs petits trous sur le séparateur (e) apparaissent, révélant des claquages diélectriques localisés ainsi qu'une corrosion de la bande de connexion d'anode (d) et des surfaces du film d'anode ont été consumées (f).

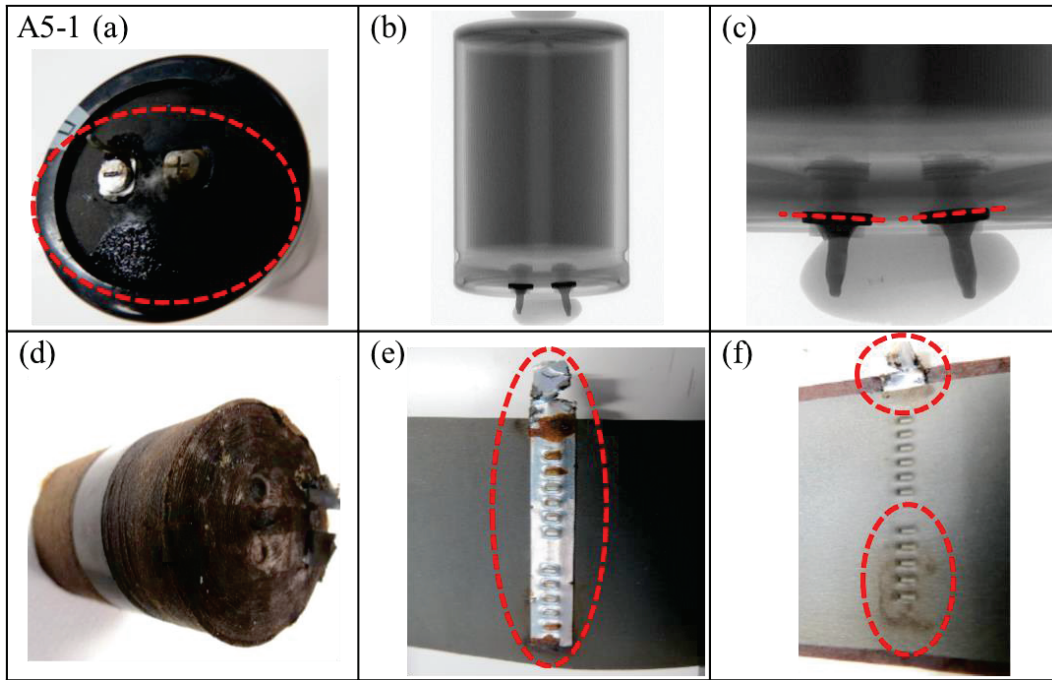


Figure 3.42 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur A5-1

Pour le condensateur A5-1 (Figure 3.42), une fuite de l'électrolyte est visible du côté de la face inférieure du condensateur (a). Le joint de cette face présente un léger gonflement visible sous rayons X (c). Il s'est aussi produit une corrosion de la bande de connexion d'anode (e)(f). Cette corrosion a causé la rupture totale de la bande (d), d'où le mode de défaillance en circuit ouvert.

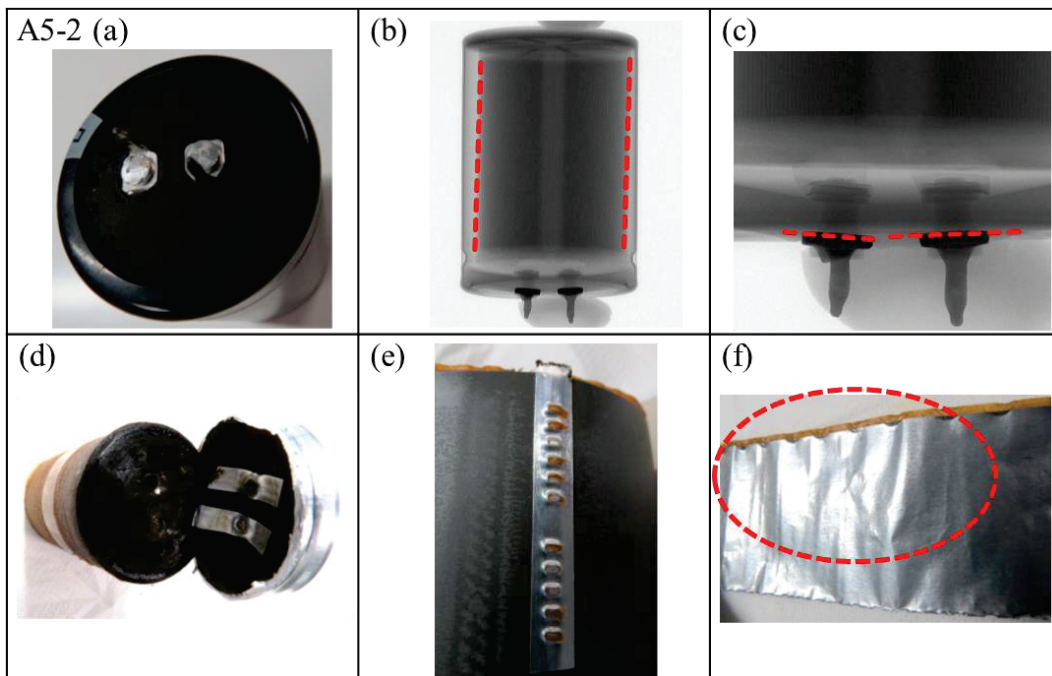


Figure 3.43 Observations macroscopiques, microscopiques et radiographies aux rayons X du condensateur A5-2

Pour le condensateur A5-2 (Figure 3.43), la face inférieure du condensateur présente un léger gonflement visible sous rayons X (c) (joint déformé). Il apparaît aussi des ondulations d'une électrode en fin de l'enroulement (f).

3.3.3. Types de défaillances observés

Quatre principaux types de défaillances catalectiques ont été identifiées lors des essais de vieillissement accéléré :

- Corrosion de l'anode

Plusieurs composants du fabricant B ont présenté cette corrosion ce qui a conduit à un mode de défaillance en circuit ouvert, suite à la cassure d'une bande de connexion.

- Fuite d'électrolyte

34 composants du fabricant B sur 39 ont eu une fuite d'électrolyte plus ou moins importante par la soupape de sécurité après des temps de vieillissement inférieurs au temps préconisé par les « datasheets » (5000 heures).

- Ouverture de la soupape de sécurité du boîtier

La plupart de composants du fabricant B mis en vieillissement, ont présenté rapidement ce type de défaut avec une fuite d'électrolyte par l'ouverture créée sur le couvercle.

- Court-circuit interne

Les boîtiers de plusieurs composants du fabricant B ont subi des ouvertures soudaines après un temps de vieillissement donné dans l'enceinte climatique à la suite d'un court-circuit entre les deux armatures, le plus souvent, à l'extrémité inférieure du bobinot. Ce type de défaut a provoqué, dans plusieurs cas, une déformation du boîtier.

3.3.4. Cause des défaillances

3.3.4.1. Défauts dus à la connectique - Corrosion de l'anode

Les ions halogénures peuvent être à l'origine de ce mécanisme de défaillance. Ils attaquent les bandes de connexion d'aluminium [110], [111]. Ceux-ci peuvent avoir été produits par la dégradation d'un solvant halogène mis en contact avec les bornes du composant lors d'un nettoyage ou lors du processus de fabrication. Deux types de défauts peuvent avoir lieu à la suite de cette défaillance : le plus courant est une mise en circuit ouvert du composant, nuisible au fonctionnement mais non à la sécurité du système. Le second défaut est un court-circuit par contact entre anode et cathode, à la suite d'une cassure d'une bande de connexion, préjudiciable pour la sécurité du système. L'analyse par spectrométrie à dispersion d'énergie EDS des résidus d'électrolyte présents dans les boîtiers et autour des zones de corrosion n'a pas permis d'identifier les halogènes présents.

3.3.4.2. Défauts dus à la fuite d'électrolyte

Ces défaillances sont attribuées à l'évaporation de l'électrolyte qui dépend non seulement de la qualité de l'électrolyte mais aussi des caractéristiques mécaniques des composants et de leur fabrication [112]. L'évaporation de l'électrolyte crée une surpression à l'intérieur du composant. Plus l'essai de vieillissement avance, plus la surpression devient importante et doit normalement, après un certain seuil, être évacuée par la soupape de sécurité prévue à cet effet sur le dessus du boîtier du condensateur, comme cela a été le cas pour les condensateurs du fabricant B. Pour les composants A, comme il n'y a pas de soupape de sécurité, la surpression a causé une détérioration du joint inférieur qui permet la fermeture du boîtier des composants.

3.3.4.3. Défauts dus au diélectrique

Le courant de fuite dans les condensateurs dépend des caractéristiques du diélectrique. La densité du courant de fuite doit donc être homogène sur toute la surface des électrodes afin d'obtenir un courant de fuite le plus faible possible. Lors de l'essai O (85 ; 500), nous observons une augmentation des courants de fuite des différents composants au cours du vieillissement. Ce phénomène est dû à une dégradation du diélectrique (c'est-à-dire de la couche d'oxyde d'aluminium).

3.3.4.4. Défauts dus au court-circuit

Pour certains échantillons de condensateurs du fabricant B, nous avons constaté des parties d'électrode consumée et des trous révélant de claquages diélectriques localisés souvent proche de l'endroit où les bandes de connexion ont été soudées aux armatures. Cette défaillance peut être due à la présence des ions halogénures mais aussi un fort courant d'ondulation peut probablement induire un échauffement local important tendant à faire fondre les points de soudure [113].

3.3.5. Une fabrication mal maîtrisée

Le fabricant B a analysé deux de ses échantillons ayant subi des défauts catastrophiques. D'après son explication, ceux-ci sont dus à une trop longue exposition du bobinot à l'humidité dans l'air entre les processus d'assemblage et de scellement du boîtier. Cette humidité emprisonnée peut conduire à la détérioration du film d'oxyde sur l'électrode pendant l'essai de vieillissement accéléré et peut induire une augmentation du courant de fuite, une augmentation de la température et une réduction de l'électrolyte.

En vérifiant la provenance du lot reçu, le fabricant B a affirmé que l'intervalle de temps entre l'assemblage et le processus de scellement du boîtier pour ce lot était de 8 heures. Les condensateurs étaient alors exposés à l'air libre et ont pu absorber l'humidité de l'air. La teneur en eau de ces condensateurs a quasiment doublé après les 8 heures selon le graphe envoyé par le fabricant B (Figure 3.44).

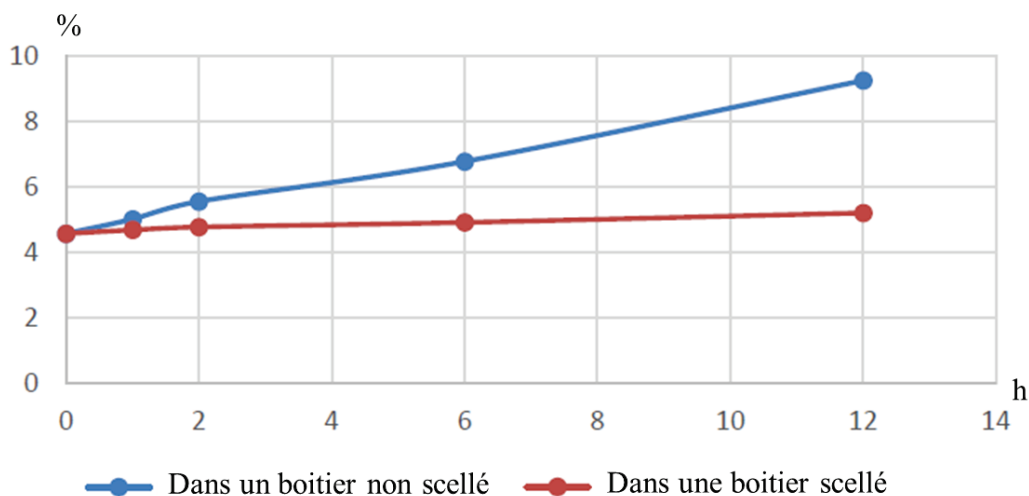


Figure 3.44 Teneur en eau du condensateur après assemblage (réf : fabricant B)

Mesures prises pour corriger ces problèmes de fabrication :

L'action corrective proposée par le fabricant B consiste à contrôler le délai entre l'assemblage et le processus de scellement du boîtier afin que celui-ci ne dépasse pas une heure. À défaut, la conservation des condensateurs non scellés sera réalisée dans une boîte hermétique pour éviter que les éléments absorbent l'humidité de l'air.



Figure 3.45 Condensateurs non scellés à l'air libre (à gauche) dans une boîte hermétique (à droite) (réf : fabricant B)

Le fabricant B a aussi proposé d'ajouter un examen pour évaluer la teneur en eau sur ses composants lors des prochaines inspections à la sortie de la chaîne de fabrication.

3.4. Conclusion des analyses

L'analyse des défaillances par dérive nous a permis, non seulement, de valider les modèles d'évolution des indicateurs de vieillissement mais aussi d'identifier les paramètres de la loi de vieillissement.

L'analyse des pièces défectueuses suite aux essais de vieillissement accéléré révèle les mêmes mécanismes de défaillance que ceux cités dans la Figure 1.18 du chapitre 1 (électro-corrosion autour de la bande anodique, vaporisation de l'électrolyte, détérioration du film d'oxyde) conformément à ce qui est annoncé par certains fournisseurs [55], [56], [68]. Cependant, certains de ces phénomènes sont apparus avant la fin de vie garantie par le fabricant B. Sur certains condensateurs des claquages de diélectrique proches des zones de fixation des bandes de connexion et sur la zone externe de l'enroulement ont été mis en évidence.

4. Identification des indicateurs de vieillissement en ligne

4.1. Cas d'étude

L'électronique de puissance permet l'échange d'énergie entre au moins deux systèmes électriques. Pour cela, elle assure, d'une part, une fonction de modulation de l'énergie électrique en rendant compatibles les caractéristiques (fonction de la tension, du courant et de la fréquence) de ces deux systèmes et d'autre part, (en général) une fonction de contrôle de cet échange énergétique. Par conséquent, elle associe les aspects conversion et contrôle.

Elle trouve ses applications dans tous les domaines d'utilisation de l'électricité, et notamment dans la variation de vitesse des machines électriques.

4.1.1. Variateur de vitesse

Un variateur de vitesse triphasé est généralement constitué d'un redresseur suivi d'un onduleur triphasé (Figure 4.1). Les condensateurs dans la partie DC agissent comme un tampon d'énergie pour compenser la différence de puissance instantanée entre le redresseur et l'onduleur.

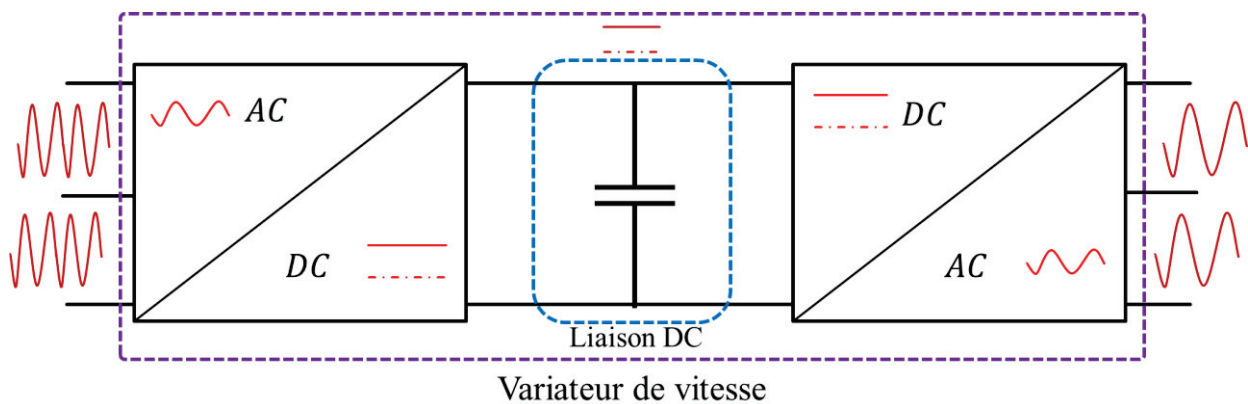


Figure 4.1 Configuration typique d'un système de variateur de vitesse

Ces condensateurs de la liaison DC constituent un risque majeur de dégradation de la fiabilité, car ils ont généralement une durée de vie plus courte et un taux de défaillance plus élevé que les dispositifs à semi-conducteurs et magnétiques [114]. Les références [22], [47], [115], [116] dédiées à la fiabilité des convertisseurs statiques d'énergie, décrivent que les condensateurs sont parmi les composants les plus fragiles et donc souvent responsables de la défaillance du convertisseur (Figure 4.2).

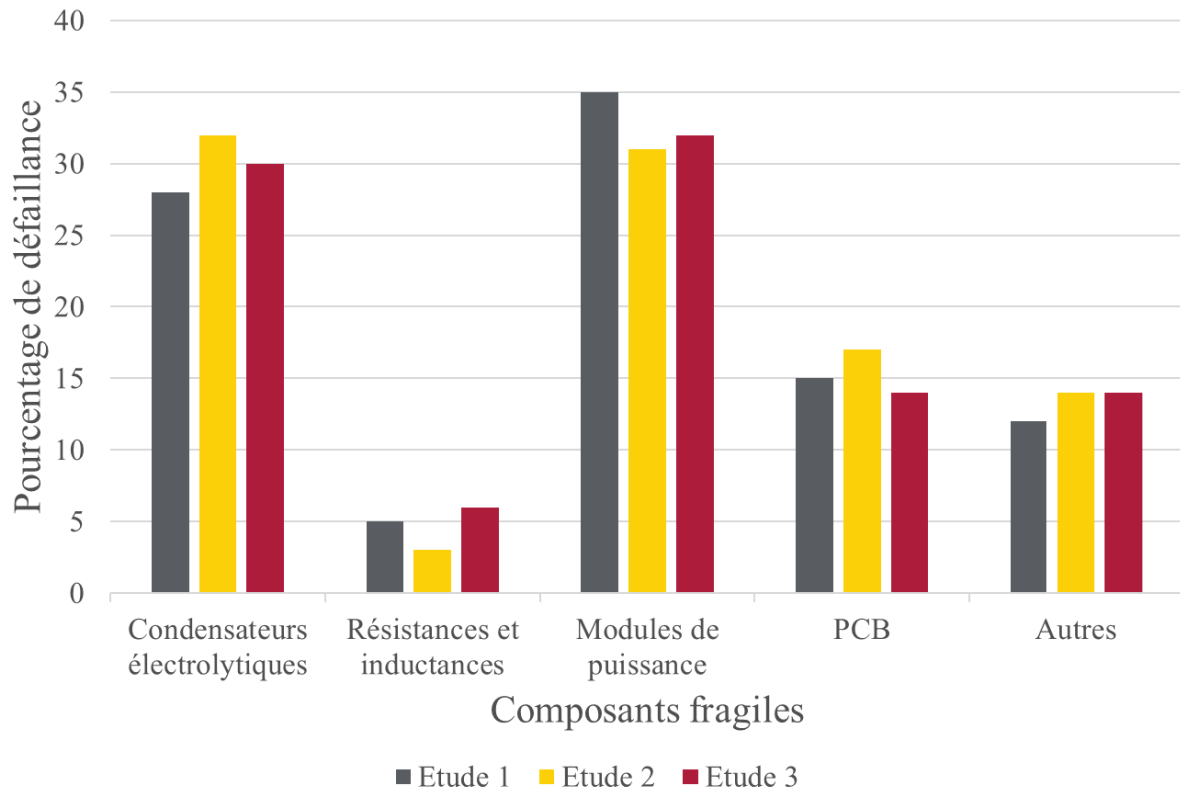


Figure 4.2 Distribution des défaillances suivant les composants dans les convertisseurs d'énergie

La surveillance de l'état de santé, souvent électrolytiques, joue donc un rôle important dans l'estimation de celui des convertisseurs statiques [4], [5], [7], [22], [104], [117]–[120]. Comme cela a été déjà mentionné, le vieillissement des condensateurs s'accompagne généralement d'une augmentation de la résistance série équivalente (ESR) et d'une diminution de sa capacité [16], [121], [122].

Les essais de vieillissement ont révélé que le suivi de la capacité et de l'ESR est nécessaire pour estimer la durée de vie des condensateurs électrolytiques en aluminium car l'ESR est lié principalement à la qualité de l'électrolyte et C dépend principalement de la qualité du diélectrique. La qualité de ces éléments dépend essentiellement de la fabrication et du savoir-faire des fabricants. L'essai de vieillissement des condensateurs réalisé dans [123] a confirmé qu'une tension de polarisation plus élevée entraînait une augmentation plus rapide de l'ESR, mais que ce n'était pas le cas pour la capacité. Ces résultats ont montré que la durée de vie estimée par l'ESR est différente de celle liée à la capacité. La surveillance de la capacité C et de l'ESR sont toutes deux nécessaires pour une meilleure estimation de durée de vie.

Dans le reste du chapitre, nous proposons une méthode d'identification de ESR et C de l'ensemble des condensateurs de la liaison DC (Figure 4.1) utilisé dans un variateur de vitesse. La méthode proposée extrait indépendamment la capacité C et l'ESR en temps réel sans déconnecter les condensateurs. Il ne requiert pas non plus de capteur de mesure supplémentaire, un traitement de signal nécessitant des ressources numériques importantes tel qu'un calcul de FFT sur une large bande de fréquences [8], [124] ou un algorithme de régression comme les machines à vecteurs de support, ayant recours à une phase d'apprentissage « offline » [125].

4.1.1.1. Architecture

Le variateur de vitesse triphasé choisi pour notre preuve de concept est un « Altivar ATV930D15N4AD » (Figure 4.3). Il est constitué d'un redresseur à pont de diode en amont et d'un onduleur à IGBT triphasé piloté par modulation de largeur d'impulsion (MLI) en aval (Figure 4.4). La génération de variateur utilisée pour notre prototype permet un freinage récupératif mais cette fonctionnalité n'est pas requise pour l'identification de ESR et C avec notre méthode.



Figure 4.3 Altivar ATV930D15N4AD

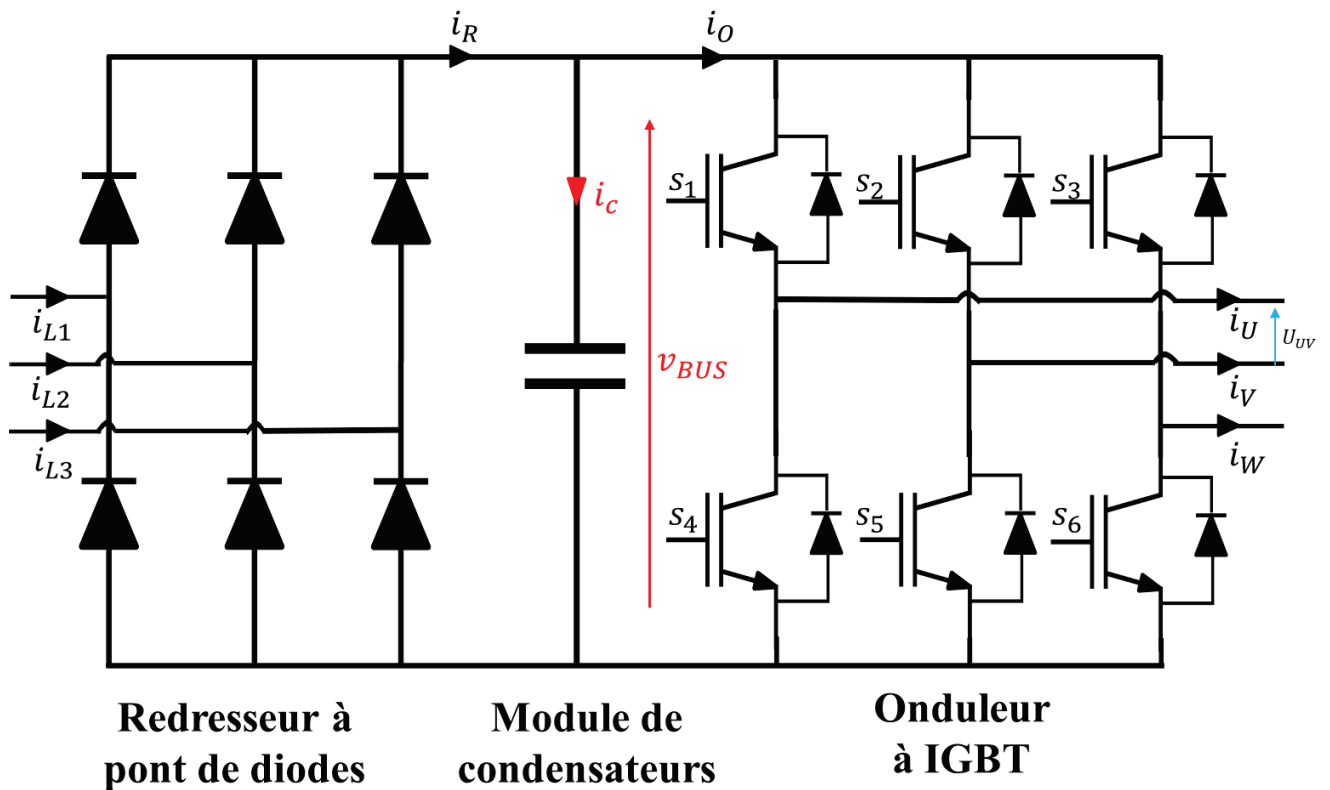


Figure 4.4 Variateur de vitesse triphasé

4.1.1.2. Capteurs présents et configuration du circuit

Le variateur de vitesse est équipé de 15 capteurs qui mesurent les grandeurs électriques et thermique suivantes :

14 capteurs de signaux électriques	3 courants d'entrée i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}
	3 courants de sortie i_U, i_V, i_W
	Tension du bus DC v_{BUS}
	Tension composée de sortie U_{UV}
1 capteur de température	6 signaux de commande $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$
	Température ambiante aux alentours des condensateurs T_{amb}

Tableau 4.1 Capteurs présents dans un variateur de vitesse Altivar

Les capteurs présents dans un variateur Altivar assurent le bon fonctionnement du système (régulation, commande asservi). Le capteur de température est présent pour la sécurité du système. Il permet de déclencher une coupure électrique en cas de surchauffe du système. Aucun capteur présent n'est utilisé pour estimer l'état de santé du système. Notons que le courant passant dans les condensateurs n'est pas mesuré par un capteur spécifique. Notre but est de pouvoir estimer la durée de vie des condensateurs sans ajout de capteur. Il est donc nécessaire de se limiter aux données disponibles mesurées par les capteurs présents, entre autres pour en déduire le courant i_C passant dans les condensateurs. Une fois obtenu i_C et v_{BUS} , les indicateurs de vieillissement ESR et C (Figure 4.5) peuvent être estimés.

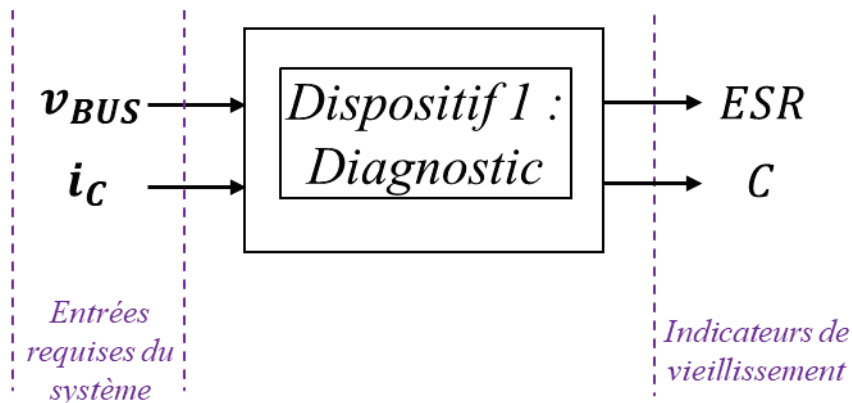


Figure 4.5 Dispositif d'identification des indicateurs de vieillissement

4.2. Calcul du courant absorbé par les condensateurs

4.2.1. Configuration du circuit

D'après la Figure 4.4, grâce à la loi des nœuds, il peut être écrit :

$$i_C = i_R - i_O \quad (4.1)$$

Symboles	Paramètres
i_C	Courant passant dans les condensateurs
i_R	Courant sortant du redresseur à pont de diodes
i_O	Courant entrant dans l'onduleur

Pour pouvoir calculer i_C à tout instant, il faudra dans un premier temps calculer les courants i_R et i_O instantanés.

4.2.2. Courant sortant du redresseur à pont diode

Le redresseur peut adopter les états suivants décrits sur la Figure 4.8.:

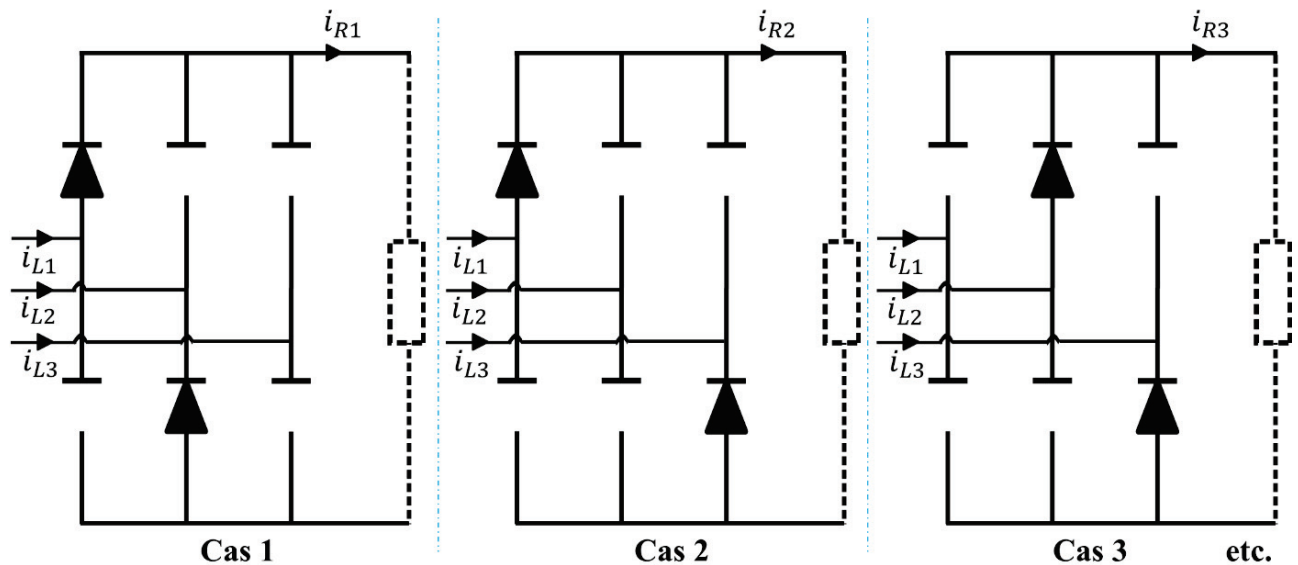


Figure 4.6 Quelques configurations possibles du redresseur pont de diodes

Dans le cas 1 on peut écrire :

$$\begin{aligned} i_{R1} &= i_{L1} \\ i_{R1} &= -i_{L2} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Dans le cas 2 on peut écrire :

$$\begin{aligned} i_{R2} &= i_{L1} \\ i_{R2} &= -i_{L3} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dans le cas 3 on peut écrire :

$$\begin{aligned} i_{R3} &= i_{L2} \\ i_{R3} &= -i_{L3} \end{aligned} \quad (4.4)$$

D'après nos conventions, le courant sortant du redresseur étant toujours positif, on peut écrire l'équivalence suivante :

Pour le cas 1 :

$$i_{R1} = \frac{1}{2} (|i_{L1}| + |i_{L2}|) \quad (4.5)$$

Pour le cas 2 :

$$i_{R2} = \frac{1}{2} (|i_{L1}| + |i_{L3}|) \quad (4.6)$$

Pour le cas 3 :

$$i_{R3} = \frac{1}{2} (|i_{L2}| + |i_{L3}|) \quad (4.7)$$

Par récursivité, à tout instant n, le courant redressé est donné à chaque instant par :

$$i_R = \frac{1}{2} (|i_{L1}| + |i_{L2}| + |i_{L3}|) \quad (4.8)$$

Nous pouvons démontrer la validité de l'équation (4.8) en l'appliquant sur les différentes étapes de la Figure 4.6) :

Pour le cas 1 :

$$\begin{aligned} i_R &= \frac{1}{2} (|i_{L1}| + |i_{L2}| + |i_{L3}|) \\ &= \frac{1}{2} (|i_{L1}| + |i_{L2}| + 0) \\ &= \frac{1}{2} (i_{L1} - i_{L2} + 0) \\ &= \frac{1}{2} (i_{R1} + i_{R1}) \\ &= i_{R1} \end{aligned} \quad (4.9)$$

D'après (4.2)

Pour le cas 2 :

$$\begin{aligned}
 i_R &= \frac{1}{2}(|i_{L1}| + |i_{L2}| + |i_{L3}|) \\
 &= \frac{1}{2}(|i_{L1}| + 0 + |i_{L3}|) \\
 &= \frac{1}{2}(i_{L1} - i_{L3} + 0) \\
 &= \frac{1}{2}(i_{R2} + i_{R2}) \\
 &= i_{R2}
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

D'après (4.3)

Pour le cas 3 :

$$\begin{aligned}
 i_R &= \frac{1}{2}(|i_{L1}| + |i_{L2}| + |i_{L3}|) \\
 &= \frac{1}{2}(0 + |i_{L2}| + |i_{L3}|) \\
 &= \frac{1}{2}(i_{L2} - i_{L3} + 0) \\
 &= \frac{1}{2}(i_{R3} + i_{R3}) \\
 &= i_{R3}
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

D'après (4.4)

4.2.3. Courant entrant dans l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé piloté par une MLI a l'architecture suivante (Figure 4.7) :

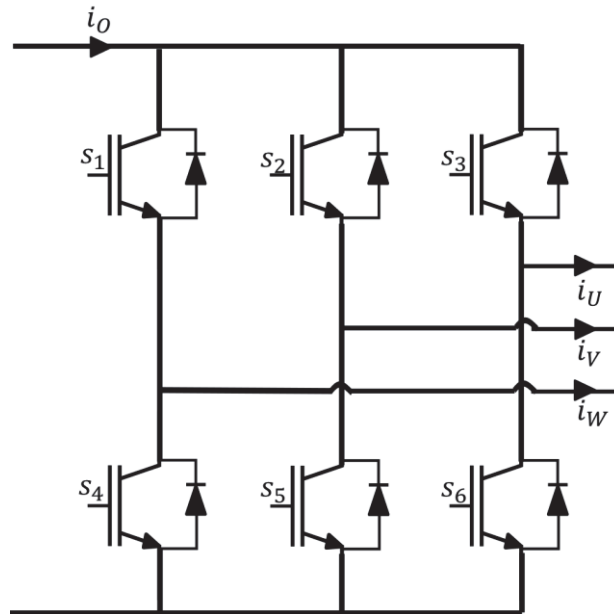


Figure 4.7 Onduleur triphasé à IGBT

Les états des interrupteurs d'une même branche sont complémentaires, c'est à dire lorsque l'un est passant « 1 », le second est bloqué « 0 » et vice-versa :

$$\begin{aligned} s_4 &= \overline{s_1} \\ s_5 &= \overline{s_2} \\ s_6 &= \overline{s_3} \end{aligned} \quad (4.12)$$

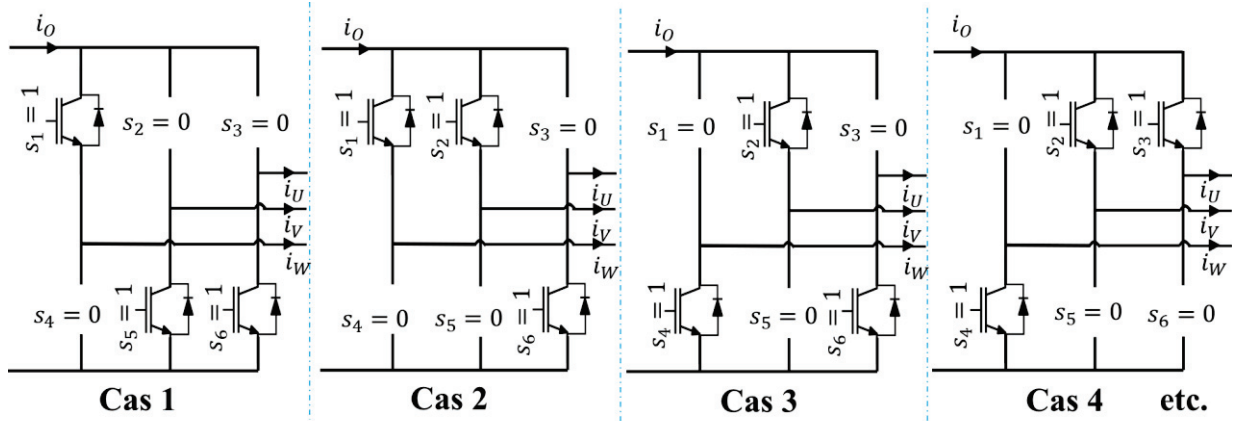


Figure 4.8 Quelques configurations possibles de l'onduleur triphasé à IGBT

D'après l'équation (4.12) et la Figure 4.8 et d'après la loi d'additivité des intensités dans un circuit en dérivation (loi des nœuds), on peut écrire :

$$i_O = s_1 \cdot i_U + s_2 \cdot i_V + s_3 \cdot i_W \quad (4.13)$$

4.2.4. Courant passant dans les condensateurs

Le courant passant dans les condensateurs peut être écrit sous la forme :

$$i_C = \frac{1}{2} (|i_{L1}| + |i_{L2}| + |i_{L3}|) - (s_1 \cdot i_U + s_2 \cdot i_V + s_3 \cdot i_W) \quad (4.14)$$

Le redresseur fournit le sixième harmonique de la fréquence f_L du réseau triphasé d'alimentation, $6f_L$, et génère, en cas d'un déséquilibre de la tension ou de l'impédance de la ligne triphasée, le deuxième harmonique, $2f_L$. L'onduleur triphasé fournit un courant d'ondulation qui contient une composante à la fréquence de commutation ou de découpage f_d de la MLI et des composantes multiples de cette fréquence. En conséquence, le courant d'ondulation contient plusieurs harmoniques dans une large plage de fréquence.

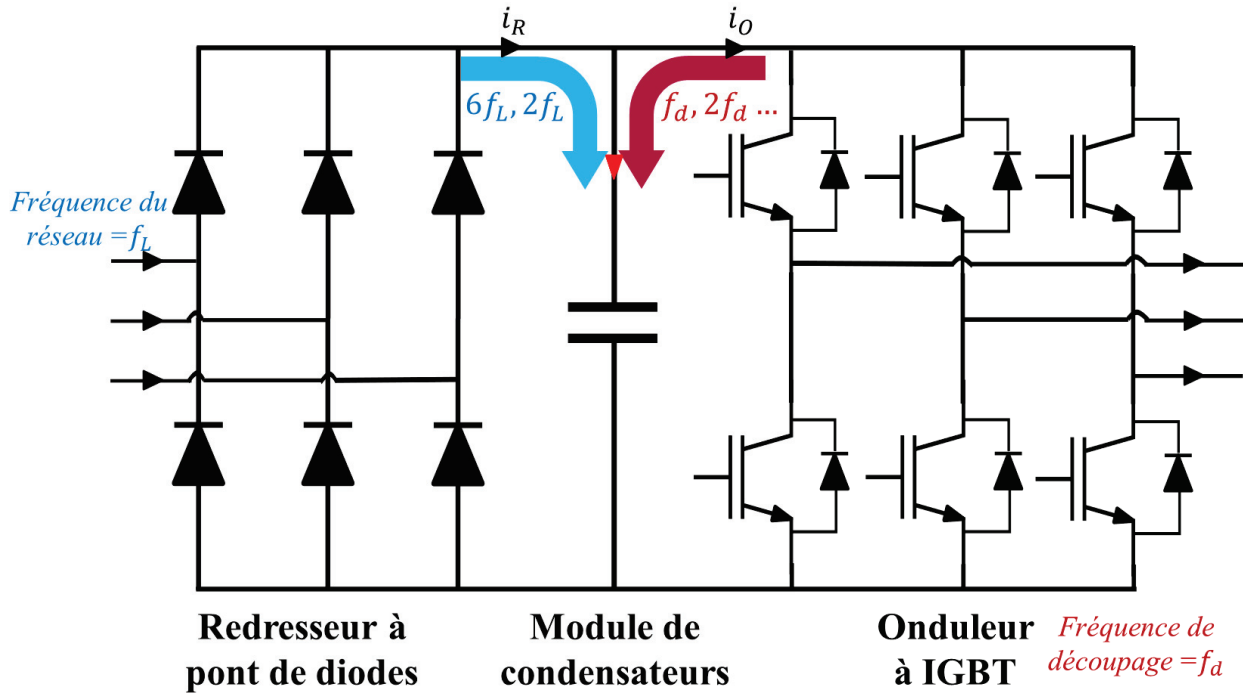


Figure 4.9 Schéma du variateur de vitesse indiquant le spectre fréquentiel composant l'ondulation du courant dans les condensateurs

Pour surveiller l'ESR et la capacité C , nous retiendrons la composante $6f_L$ du courant i_C (car elle est toujours présente contrairement à $2f_L$), la composante f_d de i_C (puisque ce premier harmonique est celui qui a la plus grande amplitude).

4.3. Extraction des indicateurs de vieillissement

4.3.1. Rappel du comportement du condensateur à basse fréquence

La fréquence de découpage des onduleurs triphasés considérés ne dépasse pas quelques dizaines de kilohertz et reste inférieure à la fréquence de résonance de l'ensemble des condensateurs. Le comportement des condensateurs en se référant à la Figure 1.16 du chapitre 1 est donc capacitif et résistif.

4.3.2. Méthode 1 : Méthode simple et précise d'extraction des indicateurs de vieillissement (ESR et C)

4.3.2.1. Description

Pour améliorer l'identification des paramètres, nous avons choisi d'identifier séparément les deux paramètres ESR et C . Ceci est expliqué principalement par le fait que la bande passante où domine ces deux paramètres est différente (Figure 4.10).

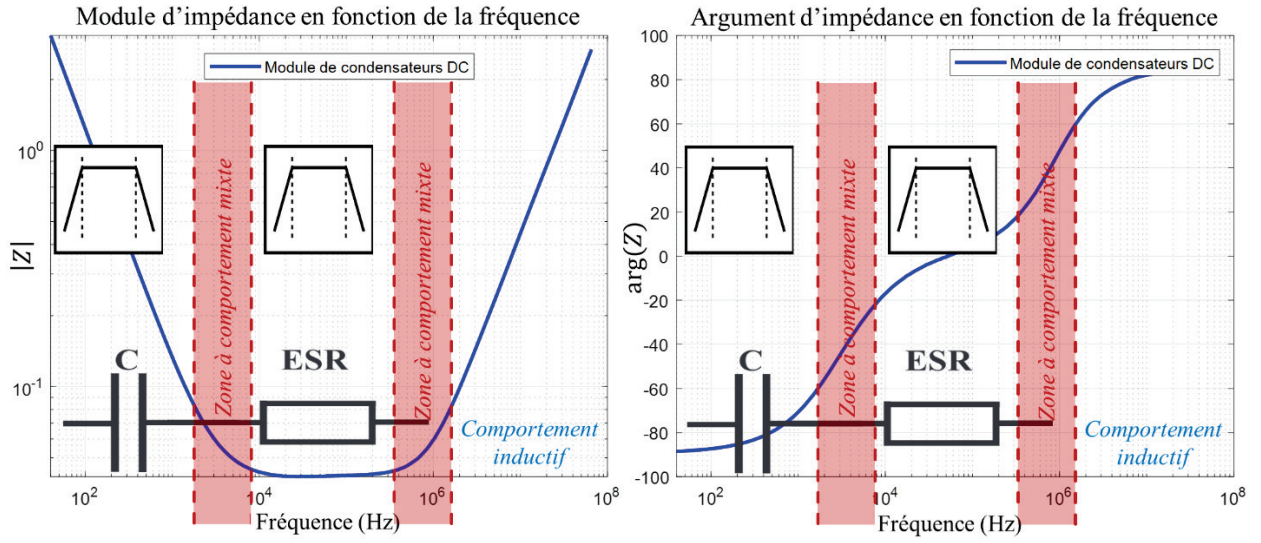


Figure 4.10 Diagramme de Bode présentant la zone de fréquence dominante respectivement pour identifier ESR et C du module des condensateurs du prototype (mesures réalisées avec l'impédancemètre Agilent4294A)

Les mesures de la tension v_{BUS} et du courant i_c , permettent de calculer la valeur du module de l'impédance. Celui-ci correspond au rapport entre les valeurs efficaces de l'ondulation de tension v_{BUS_RMS} et du courant i_{c_RMS} par exemple. Ce module d'impédance, suivant la bande de fréquence choisie correspond à ESR ou permet de calculer la capacité C.

$$|Z_c|(f_k) = \frac{v_{BUS_RMS}(f_k)}{i_{c_RMS}(f_k)} = \sqrt{\left(\frac{1}{C\omega_k}\right)^2 + ESR^2} \quad (4.15)$$

Pour les moyennes fréquences ($10kHz < \omega_k < 100kHz$), $ESR^2 \gg \left(\frac{1}{C\omega_k}\right)^2$ et $\omega_k = 2\pi f_k$ d'où :

$$|Z_c|(f_k) = \frac{v_{BUS_RMS}(f_k)}{i_{c_RMS}(f_k)} = ESR \quad (4.16)$$

Pour les basses fréquences ($f_k < 1kHz$), $ESR^2 \ll \left(\frac{1}{C\omega_k}\right)^2$ et $\omega_k = 2\pi f_k$ d'où :

$$|Z_c|(f_k) = \frac{v_{BUS_RMS}(f_k)}{i_{c_RMS}(f_k)} = \frac{1}{C\omega_k} \quad (4.17)$$

$$C = \frac{1}{\omega_k \cdot |Z_c|(f_k)}$$

Symboles	Paramètres
f_k	Fréquence de mesure (Hz)
ω_k	Pulsation correspondante à la fréquence telle que $\omega_k = 2\pi f_k$
$v_{BUS_RMS}(f_k)$	Tension efficace à la fréquence f_k du bus DC correspondante à la tension aux bornes de l'ensemble des condensateurs
$i_{c_RMS}(f_k)$	Courant efficace à la fréquence f_k passant dans le module des condensateurs
$ Z_c (f_k)$	Module de l'impédance de l'ensemble des condensateurs à la fréquence f_k
ESR, C	Indicateurs de vieillissement à identifier pour l'ensemble des condensateurs

Nous avons représenté sur la Figure 4.9 le spectre composant le courant dans les condensateurs et par conséquent le spectre de la tension aux bornes de ces derniers. En se basant sur des mesures de courant et de tension à différentes fréquences, nous pouvons alors en déduire une estimation de ESR et C grâce aux équations (4.16) et (4.17). Des filtres passe-bande sont utilisés pour choisir la bande de fréquence dominante. La figure ci-dessous montre les bandes de fréquence utilisées pour chaque indicateur de vieillissement.

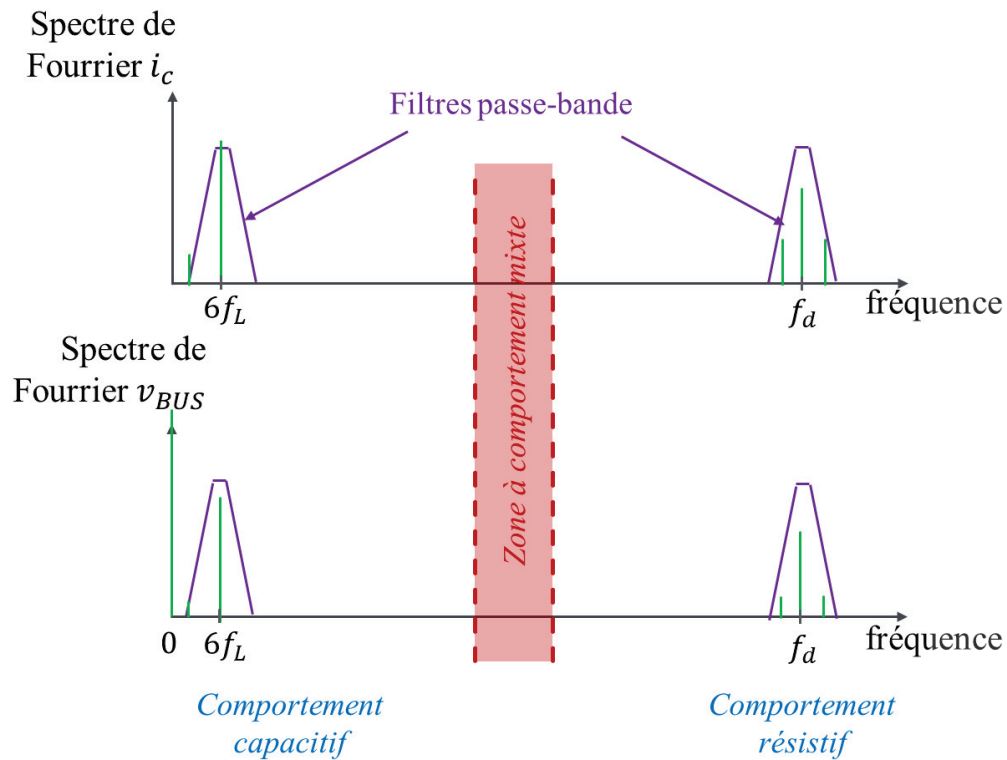


Figure 4.11 Emplacement des filtres passe-bande sur les signaux de courant et de tension des condensateurs

La résistance équivalente série (ESR) est identifiée à partir des mesures de tension et de courant qui sont filtrées en utilisant un filtre passe-bande centré sur la fréquence de découpage de l'onduleur f_d puisque sur cette bande de fréquence (Figure 4.11), l'impédance du condensateur (4.16) se ramène à la résistance équivalente série ESR.

De même, la capacité C est identifiée à partir des mesures de tension et de courant qui sont filtrées en utilisant un filtre passe-bande de basses fréquences centré sur la fréquence $6f_L$ avec $f_L =$

50Hz. Sur cette bande de fréquence (Figure 4.11), on peut tirer de l'impédance du condensateur (4.17) la capacité C.

4.3.2.2. Difficulté liée à la fréquence de découpage du prototype

La plupart des convertisseurs ont une fréquence de découpage f_d satisfaisante pour calculer ESR. Cependant, le variateur Altivar utilisé pour notre prototype a une fréquence de découpage nominale de 4 kHz. Ces caractéristiques électriques sont résumées dans le Tableau 4.2 :

Alimentation	50 Hz / 60 Hz 380 V à 480 V
Puissance nominale	15 kW
Fréquence de sortie	0.1 à 500 Hz
Fréquence de découpage	2 à 16 kHz avec fréquence nominale de 4 kHz

Tableau 4.2 Caractéristiques techniques de l'Altivar ATV930D15N4AD utilisé

D'après ce qui est évoqué sur la Figure 4.10, la fréquence de découpage à 4kHz ne se situe pas dans la plage exploitable pour l'estimation de ESR. En effet $f_d = 4 \text{ kHz}$ se trouve dans la zone à comportement mixte capacitif-résistif.

4.3.2.3. Solution simple et générique pour surmonter cette difficulté : Méthode par système d'équations

Nous proposons une méthode simple et efficace pour pouvoir alors estimer ESR et C, à partir des mesures à deux fréquences existantes distinctes.

En repartant de l'équation (4.15), il peut être écrit :

$$Z_c^2(f_k) = \left(\frac{v_{BUS_RMS}(f_k)}{i_{c_RMS}(f_k)} \right)^2 = \left(\frac{1}{C\omega_k} \right)^2 + ESR^2$$

$$Z_c^2(f_k) = \frac{\tau_k^2}{C^2} + ESR^2 \quad (4.18)$$

Symboles	Paramètres
τ_k^2	Constante taux telle que $\tau_k^2 = \frac{1}{\omega_k^2}$

P.S : La valeur efficace RMS est calculée sur la période $1/f_{min}$ la plus longue du système. Dans notre cas, la période peut être celle du réseau $1/f_L$ ou celle de sortie du variateur $1/f_{charge}$ si la fréquence de la charge est plus petite que celle du réseau ($1/f_L < 1/f_{charge}$).

Comme il existe deux harmoniques de courant à $6f_L$ et f_d , on peut simplement écrire le système, de deux équations à deux inconnus, suivant :

$$\begin{cases} Z_c^2(6f_L) = \frac{\tau_{6f_L}^2}{C^2} + ESR^2 \\ Z_c^2(f_d) = \frac{\tau_{f_d}^2}{C^2} + ESR^2 \end{cases} \quad (4.19)$$

Les solutions de ce système sont :

$$C = \sqrt{\frac{Z_c^2(6f_L) - Z_c^2(f_d)}{\tau_{6f_L}^2 - \tau_{f_d}^2}} \quad (4.20)$$

$$ESR = \sqrt{Z_c^2(f_d) - \frac{\tau_{f_d}^2}{C^2}} \quad (4.21)$$

La Figure 4.12 représente les valeurs de ESR et C en fonction de la fréquence et en particulier aux fréquences $6f_L$ et f_d . Elle montre la quasi-stabilité des valeurs de ESR et C sur des larges bandes de fréquences (entre 200 Hz et 1MHz pour ESR, et entre 0 Hz et 8 KHz pour C) et particulièrement sur la bande de fréquence entre $6f_L$ et f_d . Cela permet de justifier l'hypothèse de retenir des valeurs de solutions constantes pour C et ESR (4.20) (4.21) et pour le système d'équations (4.19).

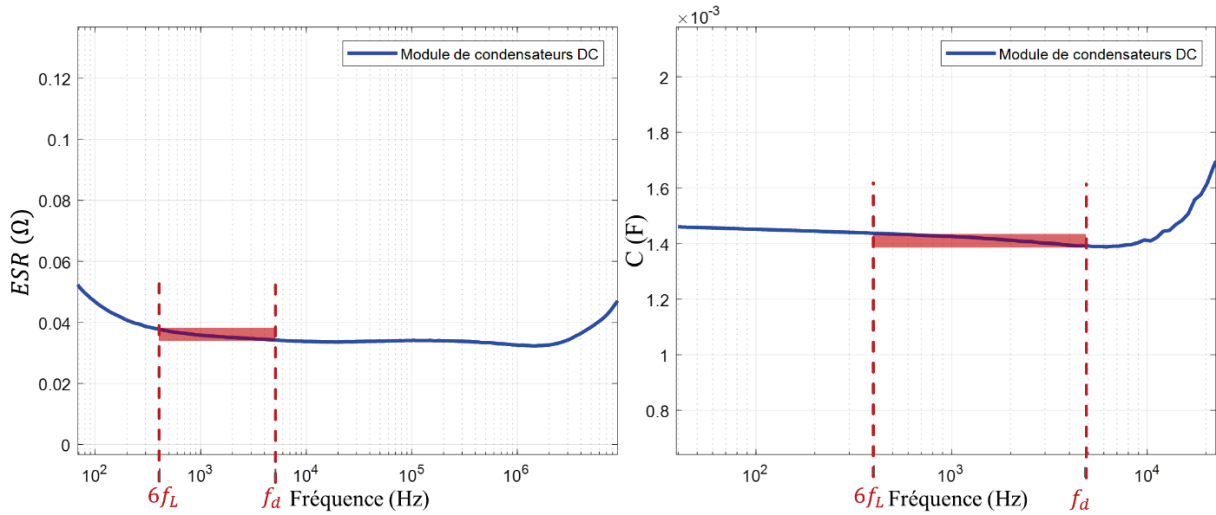


Figure 4.12 Valeurs de ESR et C aux fréquences $6f_L$ et f_d mesurées avec l'impédancemètre Agilent 4294A pour le module de condensateurs sains du prototype

ESR et C peuvent ainsi être identifiées en ligne, simplement sans ajout de capteur. L'estimation des indicateurs de vieillissement peut se réaliser en permanence en tâche de fond sans perturber le fonctionnement du variateur.

Le dispositif d'estimation de ESR et C a été validé sur un variateur de vitesse mais la méthode utilisée peut être adaptée à n'importe quel autre système contenant des condensateurs (autres topologies de convertisseurs, UPS...). Pour ce faire, il suffit de pouvoir mesurer ou reconstruire les signaux de courant et de tension des condensateurs considérés. La Figure 4.13 montre les étapes de la méthode 1 « Méthode par système d'équations » pour aboutir aux estimations de ESR et de C.

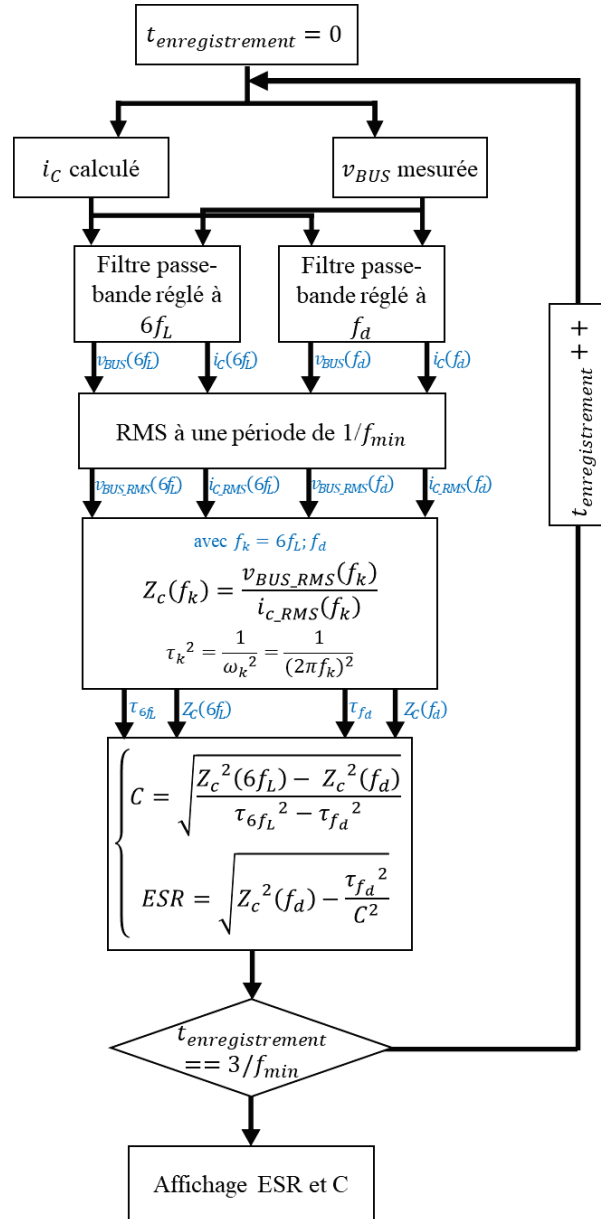


Figure 4.13 Organigramme d'estimation de ESR et C par la méthode 1« Méthode par système d'équations »

4.3.3. Méthode 2 : Application de l'algorithme des moindres carrés récursifs pour extraire les indicateurs de vieillissement ESR et C

4.3.3.1. Description

Nous avons comparé la méthode précédente d'identification d'ESR et C avec les résultats obtenus avec une méthode utilisant les moindres carrés récursifs, cas particulier d'un filtre de Kalman. Nous avons évalué leurs performances en termes de rapidité (temps de convergence), de précision (erreur d'estimation) et de coût calculatoire de traitement.

Le courant et la tension aux bornes des condensateurs sont les entrée et sortie du système. La structure du système repose sur le modèle électrique précédemment validé. L'identification des paramètres en appliquant cette nouvelle méthode est schématisée de la façon suivante :

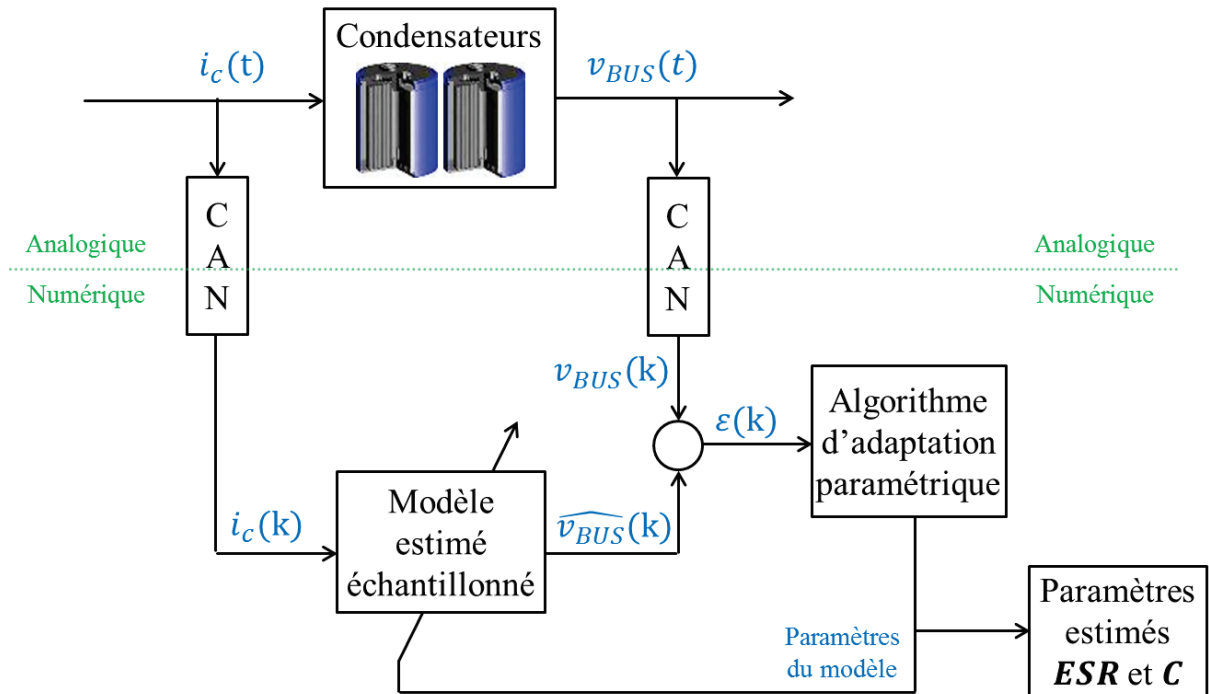


Figure 4.14 Application des moindres carrés récursifs pour identifier les indicateurs de vieillissement de l'ensemble des condensateurs

4.3.3.2. Modèle estimé échantillonné

Comme nous l'avons vu dans le §4.3.1, le condensateur a un comportement capacitif et résistif dans la plage de fonctionnement du convertisseur considéré.

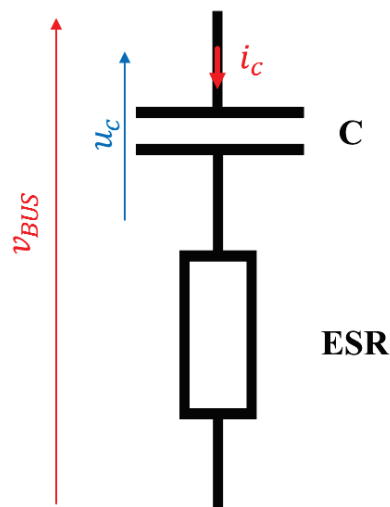


Figure 4.15 Schéma équivalent des condensateurs retenu

En considérant le schéma électrique de la Figure 4.15, les équations d'états peuvent être données grâce aux équations de tension et courant suivantes :

$$\begin{cases} i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt} \\ v_{BUS} = u_c + ESR \cdot i_c \end{cases} \quad (4.22)$$

Par suite, la fonction de transfert équivalente est donnée par :

$$F(s) = \frac{v_{BUS}(s)}{i_c(s)} = \frac{u_c + ESR \cdot C \cdot u_c \cdot s}{C \cdot u_c \cdot s} = \frac{1 + ESR \cdot C \cdot s}{C \cdot s} \quad (4.23)$$

Nous utilisons la transformée bilinéaire dite de Tustin pour approximer la fonction de transfert F. En substituant la variable de Laplace s par son approximation bilinéaire :

$$s \approx \frac{2}{T_e} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (4.24)$$

Symboles	Paramètres
T_e	Période d'échantillonnage $T_e = 1/f_e$
s	Variable complexe de Laplace
z	Variable complexe discrétisée

On peut écrire l'équation de transfert en z suivante :

$$F(z^{-1}) \approx \frac{1 + ESR \cdot C \cdot \left(\frac{2}{T_e} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right)}{C \cdot \left(\frac{2}{T_e} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right)} \quad (4.25)$$

En développant, le modèle échantillonné à estimer suivant est obtenu :

$$F(z^{-1}) \approx \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{\left(\frac{T_e}{2C} + ESR \right) + \left(\frac{T_e}{2C} - ESR \right) z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.26)$$

Avec ce modèle, b_0 et b_1 sont à estimer ce qui permet l'identification d'ESR et de C :

$$\begin{cases} b_0 = \left(\frac{T_e}{2C} + ESR \right) \\ b_1 = \left(\frac{T_e}{2C} - ESR \right) \end{cases} \quad (4.27)$$

4.3.3.3. Algorithme d'adaptation paramétrique

Nous avons choisi l'algorithme des moindres carrés récurrents « MCR » pour réaliser l'identification paramétrique car il est facile à implémenter, efficace et précis [24], [126]–[128]. L'identification paramétrique récurrente est donnée par l'équation suivante :

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + F(k+1) \cdot \phi(k) \cdot \varepsilon(k+1) \quad (4.28)$$

Symboles	Paramètres
$\hat{\theta}(k+1)$	Nouvelle estimation de paramètre (vecteur $m \times 1$)
$\hat{\theta}(k)$	Estimation de paramètre précédente (vecteur $m \times 1$)
$F(k+1)$	Gain d'adaptation (matrice $m \times m$)
$\phi(k)$	Fonction de mesure (vecteur $m \times 1$)
$\varepsilon(k+1)$	Fonction de l'erreur de prédiction (scalaire)

Cette équation permet de mettre à jour l'estimation du vecteur de paramètres à identifier. L'algorithme arrête d'évoluer (convergence à la bonne valeur) lorsque l'erreur $\varepsilon(k+1)$ devient suffisamment petite pour être négligée. L'algorithme des moindres carrés récurrents dans notre cas d'étude est décrit par les équations suivantes :

- Paramètres

$$\theta(k) = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Te}{2C} + ESR \\ \frac{Te}{2C} - ESR \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

- Gain d'adaptation

$$F(k+1) = F(k) - \frac{F(k)\phi(k)\phi(k)^T F(k)}{1 + \phi(k)^T F(k)\phi(k)} \quad (4.30)$$

- Entrées

$$\phi(k) = \begin{bmatrix} i_c(k) \\ i_c(k-1) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

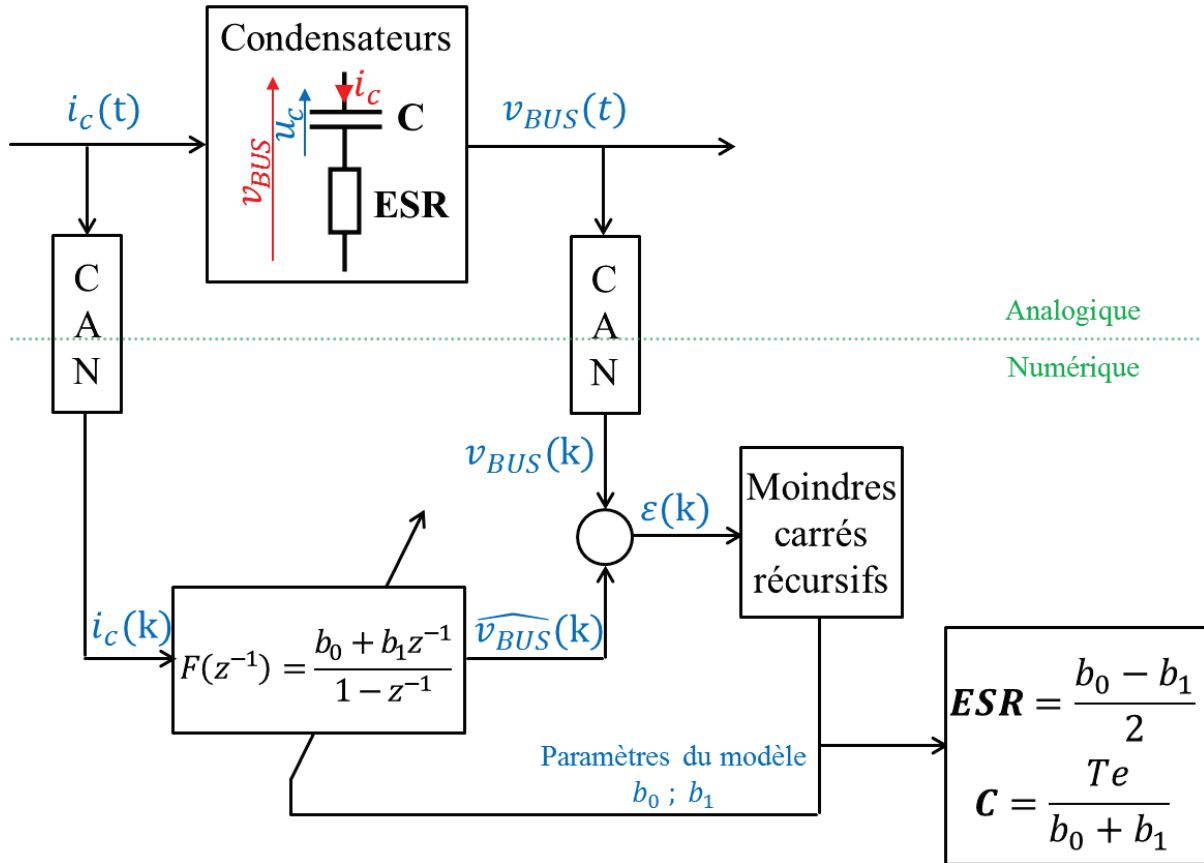
- Sortie mesurée et estimée

$$v_{BUS}(k) \quad (4.32)$$

- Erreur de prédiction

$$\varepsilon(k+1) = v_{BUS}(k+1) - \hat{\theta}(k)^T \phi(k) \quad (4.33)$$

La Figure 4.19 illustre notre choix de modèle et notre méthode d'identification par les moindres carrés récurrents.



Malheureusement, cette méthode n'a pas été implémentée dans notre prototype. Les raisons seront expliquées dans le §4.4.3.1 où nous comparons les résultats de simulation des deux méthodes tout en citant les avantages et/ou les inconvénients de chacune.

4.4. Conception du prototype et résultats expérimentaux

4.4.1. Description de la maquette expérimentale

Pour valider notre approche, nous avons utilisé un banc de test équipé d'un variateur de vitesse (Altivar ATV930D15N4AD) alimentant une machine asynchrone (MAS) de puissance 15kW. La MAS est accouplée mécaniquement à une génératrice à courant continu (MCC) de puissance 45kW. La machine asynchrone est pilotée par l'ATV930, et la charge mécanique (couple résistant) produite par la MCC est réalisée par un variateur à courant continu permettant de renvoyer l'énergie au réseau afin de minimiser l'énergie consommée. La Figure 4.17 représente le circuit du banc expérimental.

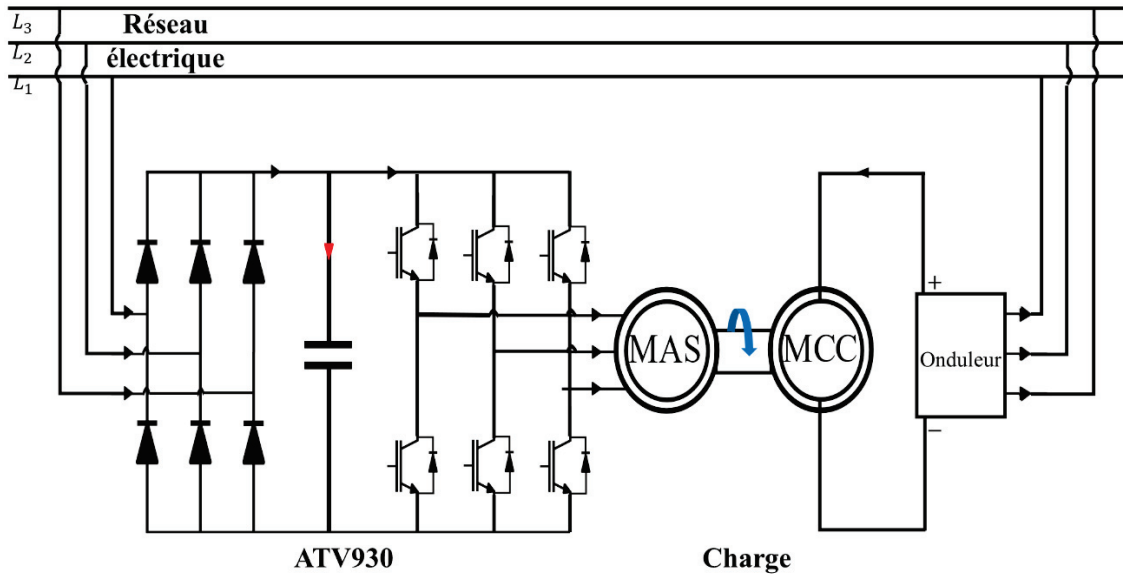


Figure 4.17 Schéma de fonctionnement du banc expérimental

4.4.2. Carte prototype

4.4.2.1. Présentation

Nous nous sommes orientés, afin de limiter le surcoût, vers un processeur de signal numérique (DSP) aux performances moindres par rapport au DSP embarqué dans le variateur Altivar ATV930. Le nombre de grandeurs à acquérir et la complexité sont limités par la fréquence d'échantillonnage. Les acquisitions et les calculs numériques ont été optimisés pour pouvoir être exécutés avec une fréquence d'échantillonnage f_e de 16 kHz soit 4 fois plus grande que la fréquence maximale de f_d ce qui respecte le critère de Nyquist-Shannon. Nous montrerons que, même avec une fréquence d'échantillonnage assez basse, la reproduction des signaux est suffisante et permet une bonne estimation de ESR et de C. Cela démontre que la méthode pour identifier les indicateurs de vieillissement est simple et requiert une puissance de calcul modeste. Elle est facilement implémentable dans un DSP industriel et capable de fonctionner en tâche de fond sans impacter le fonctionnement du convertisseur.

4.4.2.2. Carte d'interface et de conditionnement

Pour adapter et filtrer toutes les mesures utilisées pour l'identification de ESR et de C, nous avons conçu une carte d'interface et de conditionnement qui vient se connecter directement sur la partie amont de la carte d'acquisition et de calcul. Cette carte présente plusieurs fonctionnalités :

- Compte tenu de la fréquence d'échantillonnage f_e fixée, des filtres anti-repliement avec une fréquence de coupure de moitié ($\frac{f_e}{2}$) ont été ajoutés.
- Le filtrage analogique de toutes les mesures : les filtres passe-bande et les filtres anti-repliement.

Les filtres anti-repliement ajoutés aux commandes MLI transforme les signaux de commande en des grandeurs analogiques images du rapport cyclique. Cela crée un « modèle moyen » des commandes (voir §4.4.3.2).

- Le conditionnement : à chaque mesure, un gain variable est adapté automatiquement pour avoir toujours la pleine échelle (3V) à l'entrée de la carte d'acquisition et de calcul.

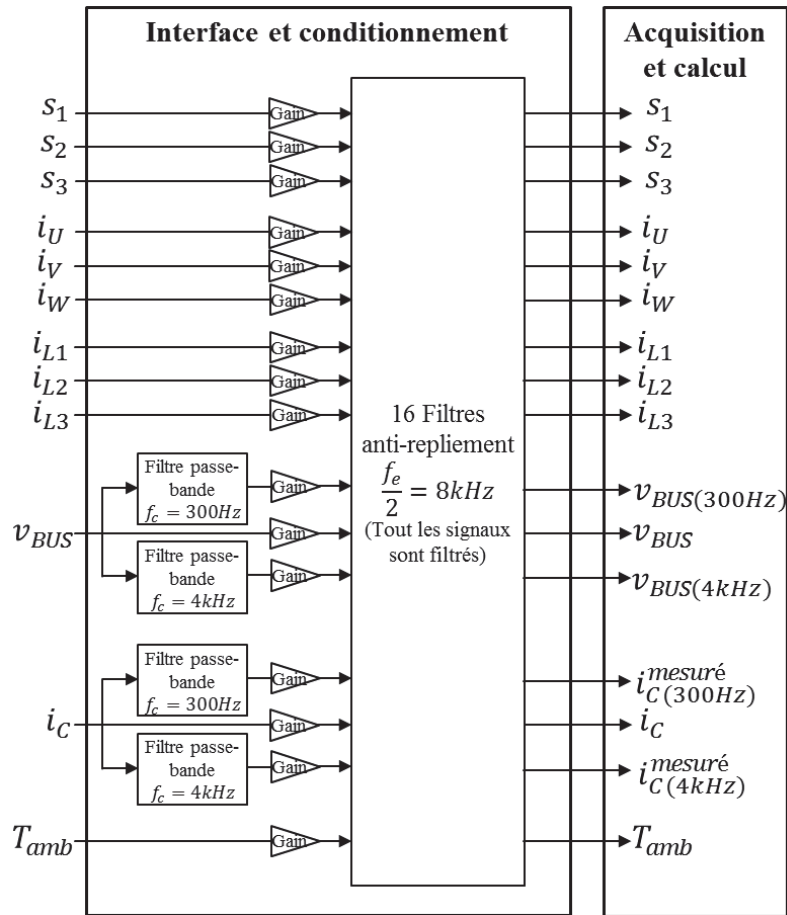


Figure 4.18 Synoptique de fonctionnement de la carte d'interface et de conditionnement

4.4.2.3. Carte d'acquisition, de calcul et de transmission

Comme déjà évoqué plus haut, la carte d'acquisition et de calcul fonctionne à une fréquence d'échantillonnage f_e de 16 kHz. Les différentes fonctionnalités de cette carte sont résumées dans le tableau suivant :

Fonction	Descriptif et caractéristiques
Enregistrement	Le calcul de durée de vie nécessite une mémoire pour le stockage de certains paramètres tels que : des constantes, des calculs intermédiaires et des variables qui s'incrémentent. Pour ce faire, nous avons prévu une mémoire à stockage.
Traitement des calculs	Pour le calcul du courant dans les condensateurs i_C et des indicateurs de vieillissement, nous avons choisi un DSP muni d'un microcontrôleur. La fréquence d'échantillonnage est de $f_e = 16kHz$, compatible avec $f_{6L} = 300 Hz$ et $f_d = 4kHz$.
Communication	La communication est réalisée grâce à une entrée COM.
Entrées	Il y a 16 entrées de mesures filtrées provenant de la sortie de la carte d'interface et de conditionnement (cf. 16 sorties de la carte illustrée sur la figure 4.24).
Sorties	Les 7 valeurs de sortie (cf. figure 4.25) sont stockées dans un fichier de sauvegarde via le port COM : - La valeur efficace de l'ondulation du courant $i_{C\ RMS}$ - La valeur moyenne de la tension du bus DC $\overline{V_{DC}}$ - La température ambiante aux alentours des condensateurs T_{amb}. Les valeurs de ESR et C issues du courant i_C mesuré d'une part et du courant i_C calculé d'autre part. Les valeurs calculées de ESR et C avec les courants mesurés sont utilisées à titre de comparaison avec celles calculées avec les valeurs estimées. Elles ne seront pas conservées dans la version finale. Seules 5 valeurs finales au total seront alors transmises.

Tableau 4.3 Les différentes fonctions et rôles de la carte utilisée

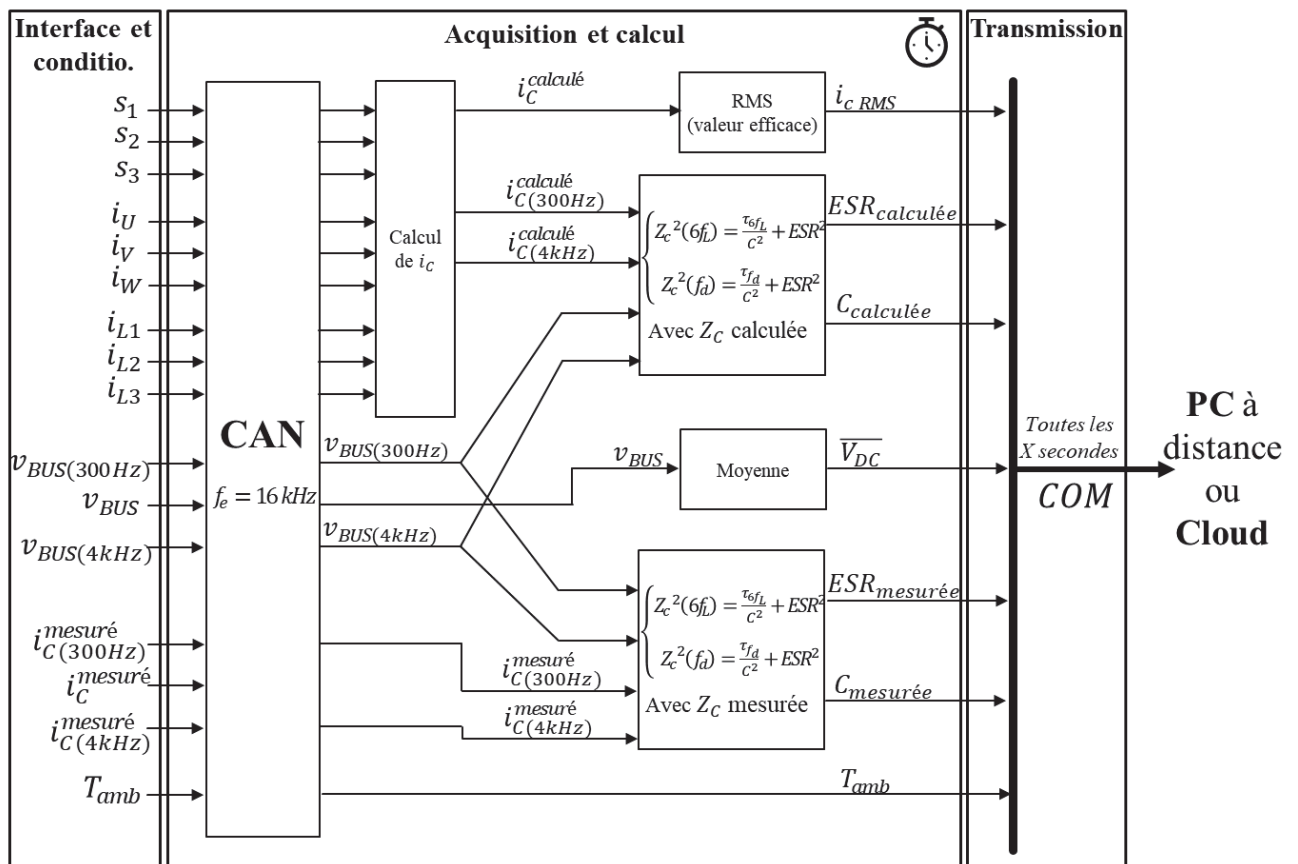


Figure 4.19 Synoptique de fonctionnement de la carte d'acquisition, de calcul et de transmission en mode « Run »

Deux mode de fonctionnement sont possibles :

- Le mode « Run » qui qualifie le fonctionnement dans lequel le dispositif sera utilisé et pour lequel la RUL des condensateurs électrolytiques sera évalué. En particulier, il deviendra inutile de conserver les calculs d'ESR et de C à partir du courant i_c mesuré.
- Le mode « debug » ou « oscilloscope ». Dans ce mode 1600 points par signal peuvent être enregistrés sur un temps d'acquisition supérieur à 2 fois la période la plus grande du système ($1/f_L$ ou $1/f_{charge}$ si la fréquence de sortie du variateur est inférieure à la fréquence du réseau). Le temps d'acquisition joue un rôle important dans le calcul des valeurs efficaces.

. Le synoptique de fonctionnement du DSP dans le mode « oscilloscope » est présenté sur la figure suivante :

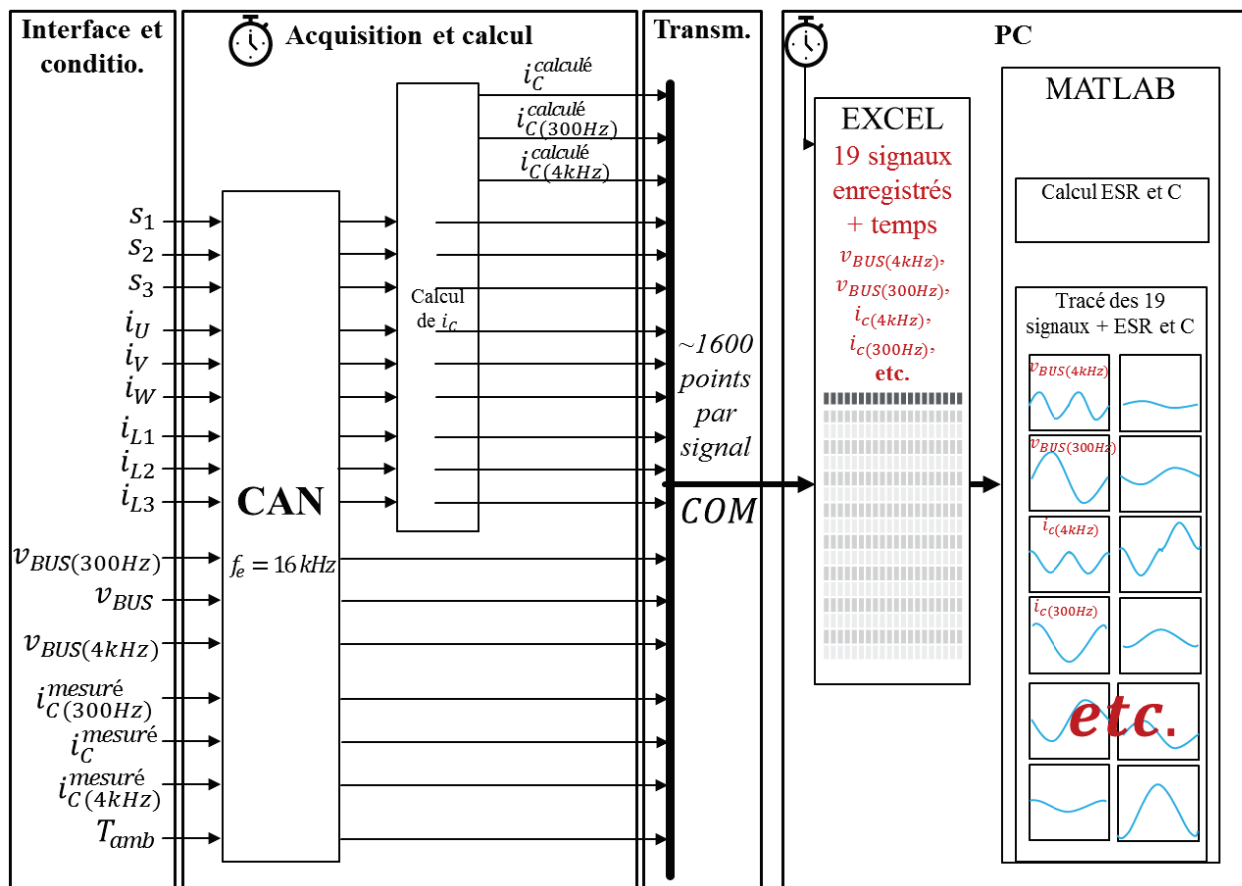


Figure 4.20 Synoptique de fonctionnement de la carte d'acquisition, de calcul et de transmission en mode oscilloscope

4.4.3. Résultats expérimentaux

4.4.3.1. Comparaison entre la méthode simple et l'algorithme des moindres carrés récursifs pour l'identification des indicateurs de vieillissement – Simulation

Dans la phase de prototypage, il était prévu d'implémenter les deux méthodes d'identification de ESR et C comme le montre la Figure 4.21, c'est à dire la méthode qualifiée de « méthode 1 : méthode par système d'équations » consistant à extraire ESR et C depuis les valeurs d'impédance à deux fréquences données et la « méthode 2 : méthode par MCR » consistant à appliquer les moindres carrés récursifs pour estimer ESR et C.

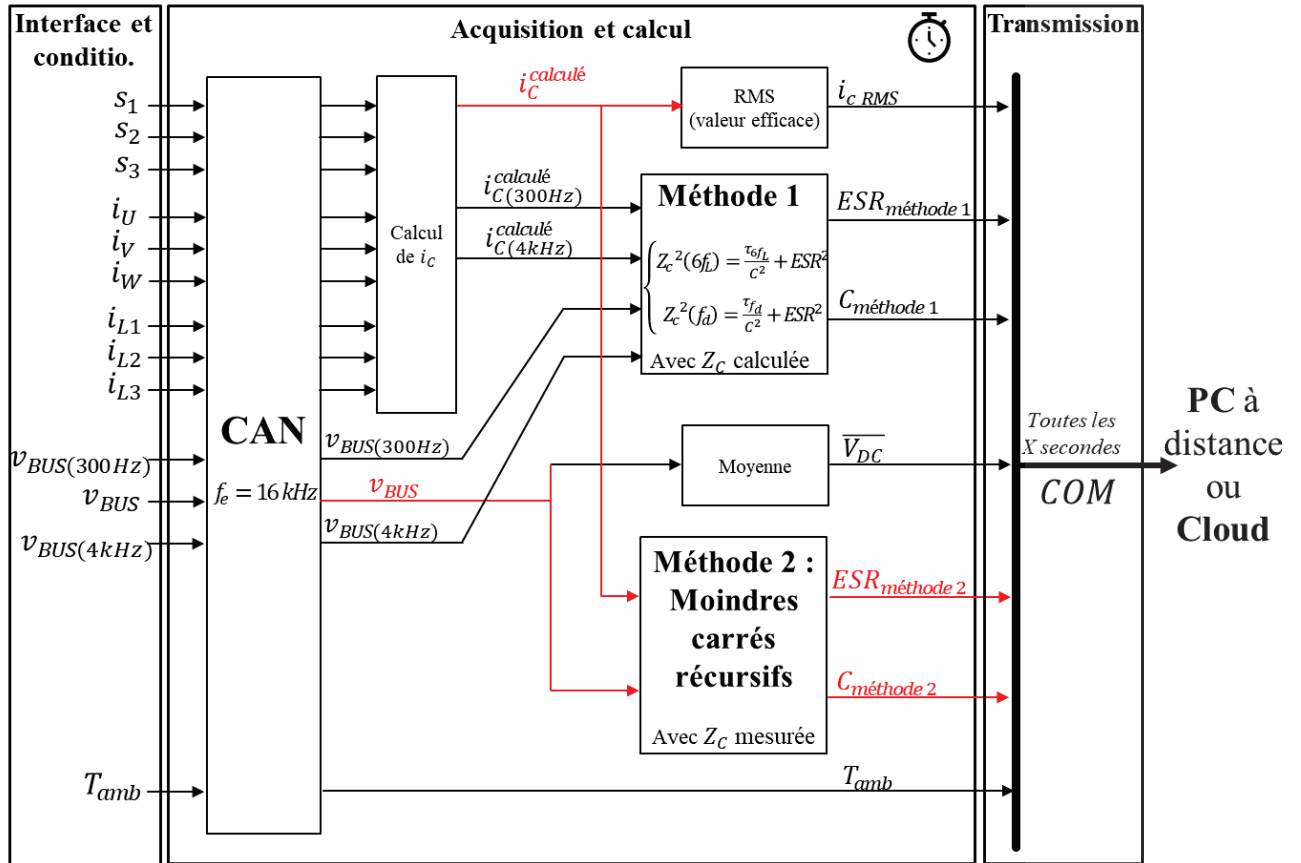


Figure 4.21 Synoptique de fonctionnement initial de la carte prototype en mode « Run »

L'algorithme d'adaptation paramétrique utilisé étant l'algorithme des moindres carrés récursifs il est simulé sous l'environnement Simulink grâce au bloc « Recursive Least Squares Estimator ».

Ce bloc requiert de définir le modèle échantillonné sous forme d'une équation récursive discrétisée :

$$y(k) = x(k)H(k) \quad (4.34)$$

Symboles	Paramètres
$y(k)$	Sortie estimée à l'instant k (dans notre cas c'est $v_{BUS}(k)$)
$x(k)$	Variables internes qui peuvent être mesurées à l'instant (k) ou (k-1) ou estimées à l'instant (k-1)
$H(k)$	Vecteur des paramètres à identifier

D'après l'équation (4.26), nous pouvons en déduire l'expression qui relie l'entrée et la sortie au modèle discrétisé :

$$\frac{v_{BUS}(k)}{i_c(k)} = F(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.35)$$

Soit :

$$(1 - z^{-1})v_{BUS}(k) = (b_0 + b_1 z^{-1})i_c(k) \quad (4.36)$$

Le terme z^{-1} signifie un retard pur (d'une période), c'est à dire à l'état (k-1) :

$$v_{BUS}(k) - v_{BUS}(k-1) = b_0 \cdot i_c(k) + b_1 \cdot i_c(k-1) \quad (4.37)$$

L'équation discrétisée récursive reliant la sortie recherchée aux états internes devient :

$$v_{BUS}(k) = b_0 \cdot i_c(k) + b_1 \cdot i_c(k-1) + v_{BUS}(k-1) \quad (4.38)$$

Elle peut alors s'écrire sous la forme de (4.34) par :

$$v_{BUS}(k) = [i_c(k) \quad i_c(k-1) \quad v_{BUS}(k-1)] \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Une fois identifié $H(k)$, c'est à dire b_0 et b_1 , l'équation (4.27) permet de calculer ESR et C. Lorsque l'algorithme donnant b_0 et b_1 converge, les valeurs de ESR et C sont déterminées.

Nous avons simulé nos deux méthodes pour estimer la RUL des condensateurs DC du variateur de vitesse. Leur ESR équivalente est égale à $20\text{m}\Omega$ et la capacité C équivalente est de $1500\mu\text{F}$. La simulation du variateur est effectuée sous PLECS et MATLAB est utilisé pour identifier ESR et C de manière discrète en utilisant les deux méthodes. Les résultats sont résumés sur les figures Figure 4.22, Figure 4.23 et le Tableau 4.4 évaluant le pourcentage d'erreur et le temps de convergence suivant chaque méthode et pour chaque indicateur de vieillissement.

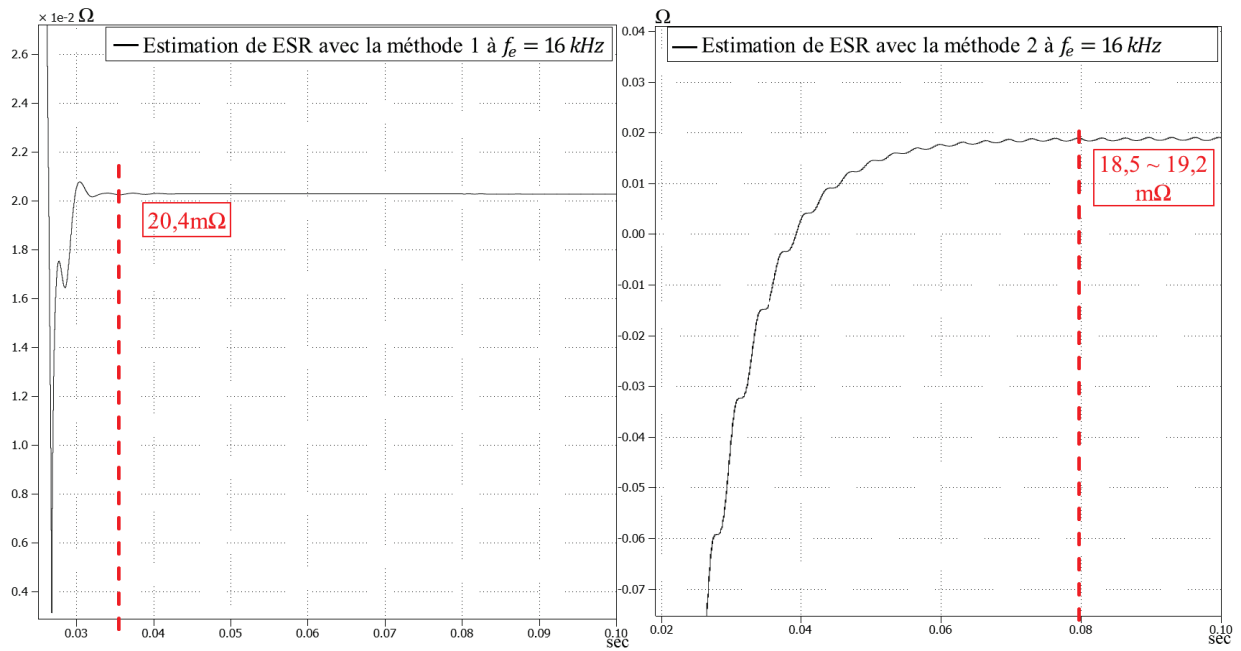


Figure 4.22 Évolution de l'estimation de ESR selon les deux méthodes d'extraction à une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz

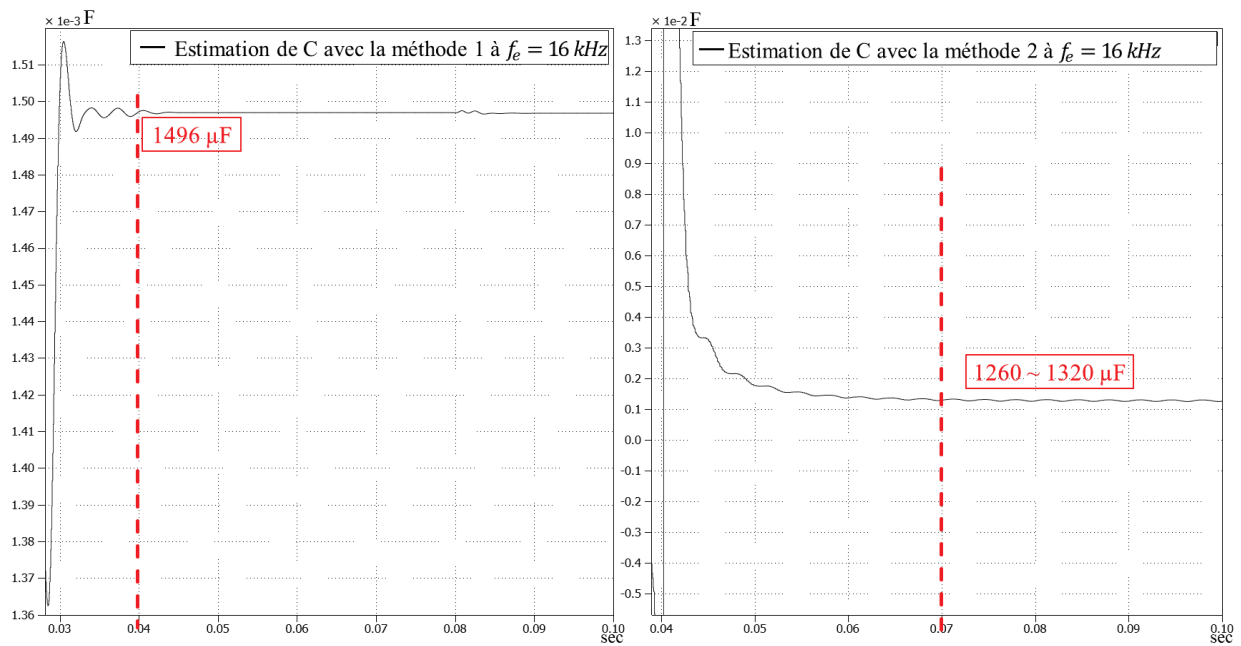


Figure 4.23 Évolution de l'estimation de C selon les deux méthodes d'extraction à une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz

Simulation sous Plecs [129] et Matlab Simulink@Mathworks [130] avec discrétisation des mesures							
Fréquence d'échantillonnage		40kHz			16 kHz		
Méthode	Paramètre estimé	Valeur estimée	Erreur d'estimation	Temps de convergence	Valeur estimée	Erreur d'estimation	Temps de convergence
Méthode 1 : système d'équations	ESR	20,3 mΩ	1,5%	0,005 sec	20,4 mΩ	2%	0,035 sec
	C	1503 μF	0,19%	0,015 sec	1496 μF	0,2%	0,04 sec
Méthode 2 : moindres carrés récursifs	ESR	[19,4; 19,8] mΩ	~3%	0,01 sec	[18,5; 19,2] mΩ	~5%	0,08 sec
	C	[1390; 1430] μF	~6%	0,02 sec	[1260; 1320] μF	~13%	0,07 sec

Tableau 4.4 L'estimation de ESR et C suivant les deux méthodes sur deux fréquences d'échantillonnage différentes ($10f_d$ et $4f_d$) et comparaison des erreurs d'estimation et du temps de convergence pour un condensateur équivalent avec $ESR = 20m\Omega$, $C = 1500\mu F$

Le temps de convergence est plus court et l'erreur d'estimation est plus faible pour la méthode 1 que pour la méthode 2. De plus la fréquence d'échantillonnage a peu d'influence sur l'erreur d'estimation pour la méthode 1 comparée à celle utilisant les moindres carrés récursifs.

La méthode 1 nécessite nettement moins de ressources mémoire. La méthode 2 mobilisait dans certains cas un excédent de mémoire conduisant à un écrasement de la pile mémoire interne. Seule la première méthode « méthode par système d'équations » a donc été implantée sur le prototype expérimental final.

4.4.3.2. Intérêt des filtres anti-repliement sur les signaux de commande des IGBT issus de la MLI

Que ce soit avec une MLI numérique ou une MLI analogique, un signal binaire, à fréquence fixe (4 kHz dans notre cas) mais dont le rapport cyclique est contrôlé numériquement ou analogiquement est créé. Le signal de commande d'un IGBT est une grandeur dont la valeur moyenne est égale au produit du rapport cyclique par l'amplitude maximale du signal. Son spectre est composé d'une infinité de fréquences.

Pour représenter l'état des interrupteurs, la fréquence d'échantillonnage f_e doit être, au moins, 10 fois plus grande que la fréquence de découpage f_d . Comme ce n'est pas le cas avec notre prototype, l'échantillonneur va louper les petites impulsions et mal représenter quasiment toutes les autres impulsions (cf. Figure 4.24). En ajoutant, le filtre anti-repliement à $f_e/2$, les images des formes d'onde de commande des interrupteurs vont être modifiées lors de l'acquisition. Cependant, l'ajout du filtre

permet à l'échantillonneur de détecter toutes les impulsions, même les plus petites, et une grande image des rapports cycliques peut être obtenu (Figure 4.24).

En effet, le filtre anti-repliement crée une sorte de moyenne mobile ou glissante de la série temporelle en supprimant les fluctuations transitoires ce qui souligne les tendances à long terme.

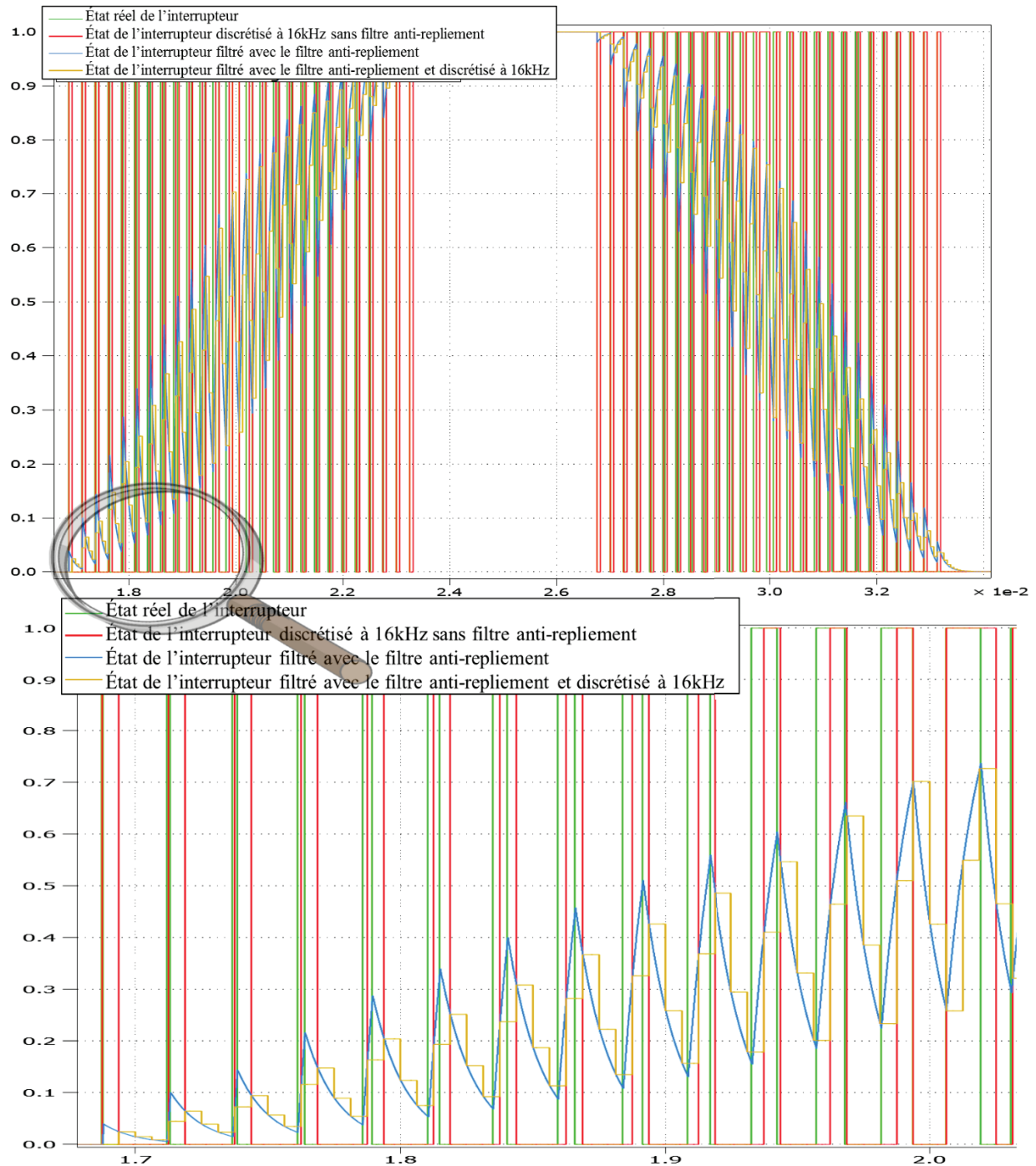


Figure 4.24 Les différentes formes d'onde de l'état d'un interrupteur filtré ou non à une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz

4.4.3.3. Comparaison entre la mesure et l'estimation du courant parcourant les condensateurs

La simulation en mode continu sous Matlab Simulink et PLECS a permis de comparer le courant des condensateurs mesuré avec celui calculé et a validé l'équation (4.14). Nous pouvons dans ces conditions écrire :

$$\begin{aligned} i_{C \text{ mesuré}} &= i_{C \text{ calculé}} \\ &= \frac{1}{2} (|i_{L1}| + |i_{L2}| + |i_{L3}|) - (s_1 \cdot i_U + s_2 \cdot i_V + s_3 \cdot i_W) \end{aligned} \quad (4.40)$$

Néanmoins, lors de notre application expérimentale, nous avons remarqué une légère distorsion entre le courant calculé et celui mesuré. Plusieurs raisons sont à l'origine de cette distorsion :

- La fréquence d'échantillonnage n'est pas assez élevée. Le temps d'acquisition des différents signaux et le temps de calcul influe aussi sur la représentation du courant calculé.
- La distorsion entre les deux signaux de courant provient principalement de la représentation virtuelle des états passants et bloqués des IGBT de l'onduleur MLI. En effet, dans le cas idéal, la commande « s » et la tension IGBT (collecteur-émetteur) « V_s » sont identiques à un facteur d'échelle prêt. Mais en pratique, il y a toujours un délai entre les états des commandes et les états passant/bloqué des IGBT (temps morts, temps de commutation, ...).

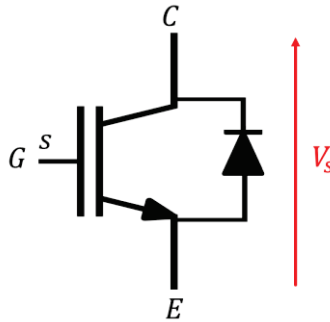


Figure 4.25 La commande « s » et la tension « V_s » (collecteur-émetteur) d'un IGBT

Les chronogrammes des commandes des interrupteurs complémentaires sont représentés sur la Figure 4.26 (a). La Figure 4.26 (b), représente ces mêmes commandes avec la prise en compte des retards introduits pour éviter une conduction simultanée des interrupteurs d'une même branche. Ainsi lorsque la commande s_1 de l'interrupteur du haut doit passer à l'état haut au temps T_1 , la commande complémentaire s_4 passe d'abord à l'état bloqué à l'instant $T_1 - T_c$. Le délai T_c est ajouté par le concepteur entre deux interrupteurs complémentaires, par souci de sécurité, pour éviter le court-circuit.

La commande réelle de fermeture s_1 passe à l'état haut à l'instant $T_1 - T_c + T_m$ (avec T_m , le temps mort).

Lorsque l'interrupteur supérieur doit se bloquer à T_2 , s_1 passe à l'état bas et la commande de l'interrupteur complémentaire s_4 à l'état haut à l'instant $T_2 + T_m$. Dans les deux cas, le temps mort T_m est garanti.

La tension de l'IGBT réelle V_{s1} tenant compte des retards de la commande et de la pente de transition de tension est illustrée à la Figure 4.26 (c). La tension de l'IGBT équivalente simplifiée V'_{s1} peut alors être décrite par la Figure 4.26 (d), où la croissance non instantanée de la tension est assimilée à un retard équivalent. Sur la figure 4.32 (d), le retard à la fermeture correspond au délai T_{r1} entre la mise à 1 du signal de commande et la mise en conduction effective de l'IGBT. Le retard au blocage correspond au délai T_{r2} entre le passage à 0 du signal de commande et le blocage effectif de l'IGBT.

Le déphasage entre l'instant de passage à l'état haut de la commande s_1 et la fermeture de l'IGBT s'exprime par :

$$T_{deph1} = T_{r1} + T_m - T_c \quad (4.41)$$

Le déphasage entre l'instant de passage à l'état bas de la commande s_1 et le blocage de l'IGBT s'exprime par :

$$T_{deph2} = T_{r2} \quad (4.42)$$

À partir de la Figure 4.26 (a), l'interrupteur supérieur est conçu pour conduire pendant un temps :

$$T_{on} = T_2 - T_1 \quad (4.43)$$

La Figure 4.26 (d) montre que la durée effective de conduction de l'interrupteur de puissance supérieur est en fait :

$$\begin{aligned} T'_{on} &= T_{on} + T_{deph2} - T_{deph1} \\ T'_{on} &= T_2 - T_1 + T_{r2} - T_{r1} - T_m + T_c \end{aligned} \quad (4.44)$$

Ainsi, l'erreur due aux déphasages influe sur la durée de temps où l'IGBT est passant et bloqué. L'erreur sur le temps de conduction résultant des délais de commutation et du temps mort est donnée par :

$$T_{err} = T'_{on} - T_{on} = T_{r2} - T_{r1} - T_m + T_c \quad (4.45)$$

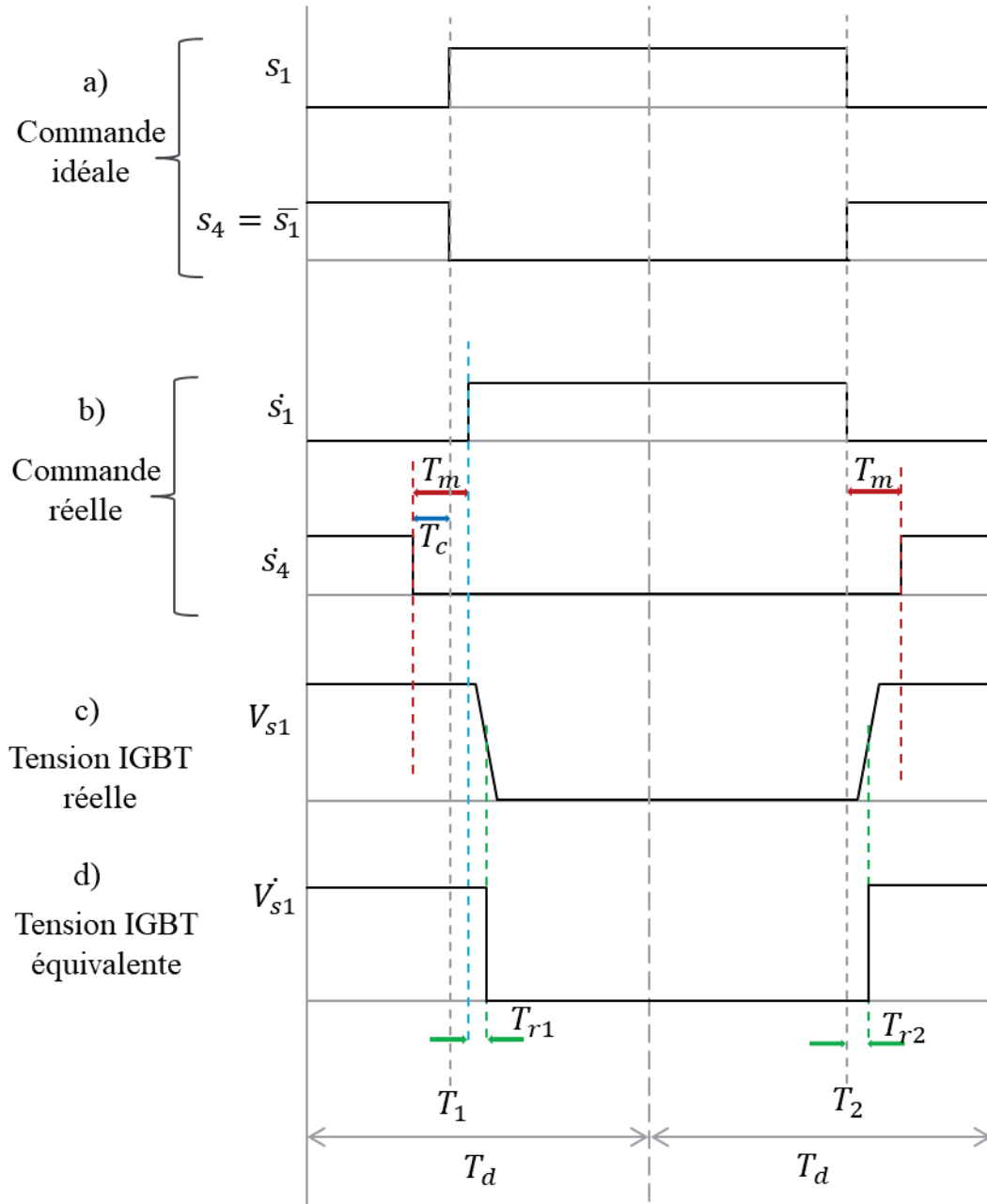


Figure 4.26 États de commande et tension collecteur émetteur d'un IGBT. (a) États passant/bloqué des commandes idéales s_1 et s_4 complémentaires. (b) États passant/bloqué des commandes complémentaires en incluant les temps morts T_m . (c) Tension collecteur émetteur réelle de l'IGBT commandé par s_1 . (d) Tension équivalente aux états passant/bloqué de l'IGBT.

Pour identifier ESR et C, il est nécessaire de reconstruire le courant des condensateurs en se basant sur les états réels des commandes supérieures s_1 s_2 s_3 mesurés. Il est alors supposé que s_4 s_5 s_6 sont parfaitement complémentaires aux signaux s_1 s_2 s_3 .

Bien que ce ne soit pas le cas, le courant reconstruit ne présente pas d'importante distorsion par rapport au courant mesuré. En effet, on peut voir une grande similitude entre le courant mesuré et celui calculé sur la Figure 4.27.

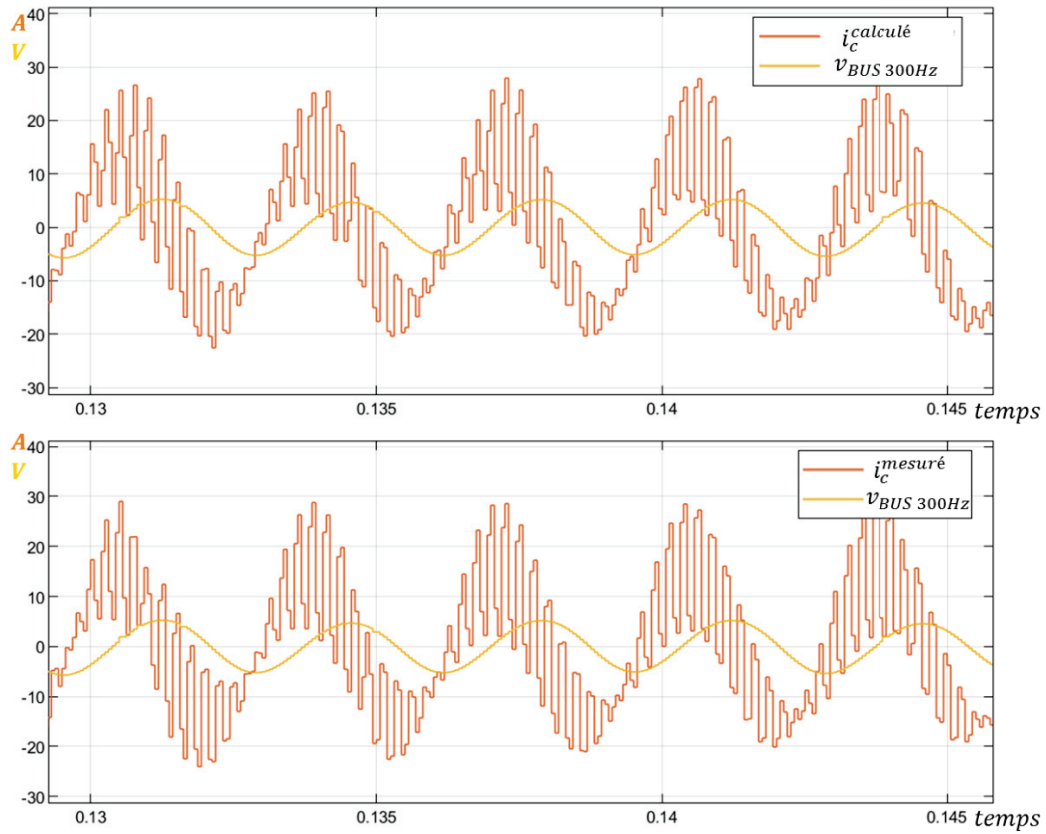


Figure 4.27 Différentes formes d'onde du courant des condensateurs calculé et mesuré à une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz

Cette similitude est aussi perçue sur les harmoniques aux fréquences nous intéressant pour l'extraction de ESR et de C (Figure 4.28).

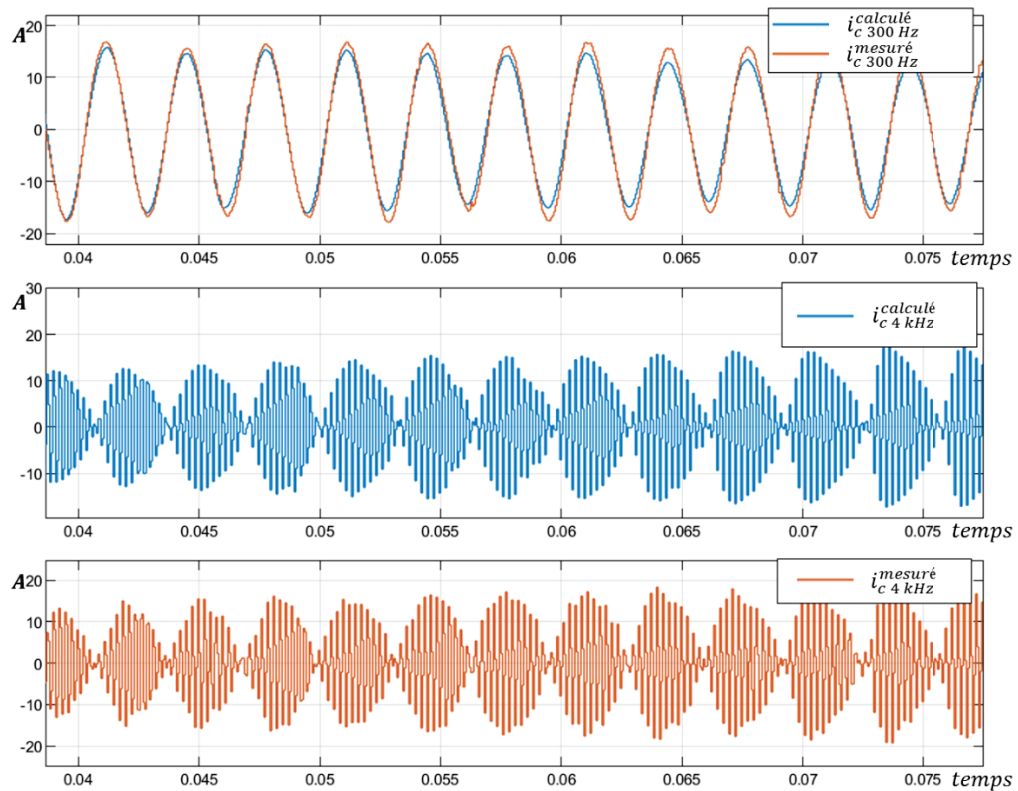


Figure 4.28 Les différentes formes d'onde du courant des condensateurs calculé et mesuré à $6f_L$ et à f_d pour une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz

4.4.3.4. Identification de ESR et de C avec le prototype expérimental

En faisant la caractérisation ex situ du module des condensateurs de l'Altivar ATV930D15N4AD avec un impédancemètre, nous avons obtenu une valeur de ESR entre $6f_L$ et f_d en moyenne égale à 35.3 mΩ et une capacité moyenne de 1440μF entre $6f_L$ et f_d (cf. Figure 4.12 du §4.3.2.3).

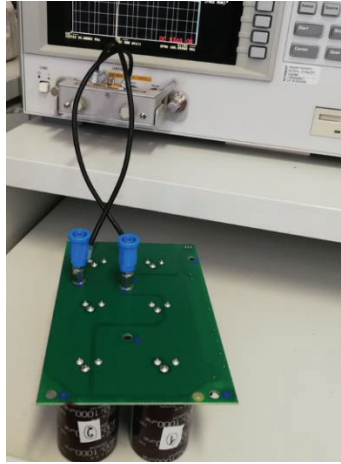


Figure 4.29 Caractérisation du module des condensateurs DC avec l'impédancemètre Agilent 4294A

Afin de valider l'estimation de ESR et de C avec la méthode 1 « méthode par système d'équations », leurs valeurs ont été mesurées in situ (charge du variateur de 30A, 50Hz, 30°C) lorsque le module était dans le variateur. Nous remarquons que les valeurs de ESR et C convergent en moins de 0.06 secondes (Figure 4.30). Les erreurs par rapport à la mesure ex situ avec l'impédancemètre sont résumées dans le tableau suivant :

Indicateur	Origine de l'estimation	Valeur estimée	Erreur d'estimation	Temps de convergence
ESR	Impédancemètre	~35,3 mΩ	n/a	n/a
	ESR_{calcul}	~37,5 mΩ	~6%	0,06 sec
	ESR_{mesure}	~34,6 mΩ	~1,9%	0,01 sec
C	Impédancemètre	~1,44 mF	n/a	n/a
	C_{calcul}	~1,47 mF	~1,8%	0,05 sec
	C_{mesure}	~1,5 mF	~3,8%	0,06 sec

Tableau 4.5 Estimations de ESR et C issues de la mesure et du calcul de i_C avec le prototype testé sur un variateur de vitesse et comparaison avec la mesure ex situ

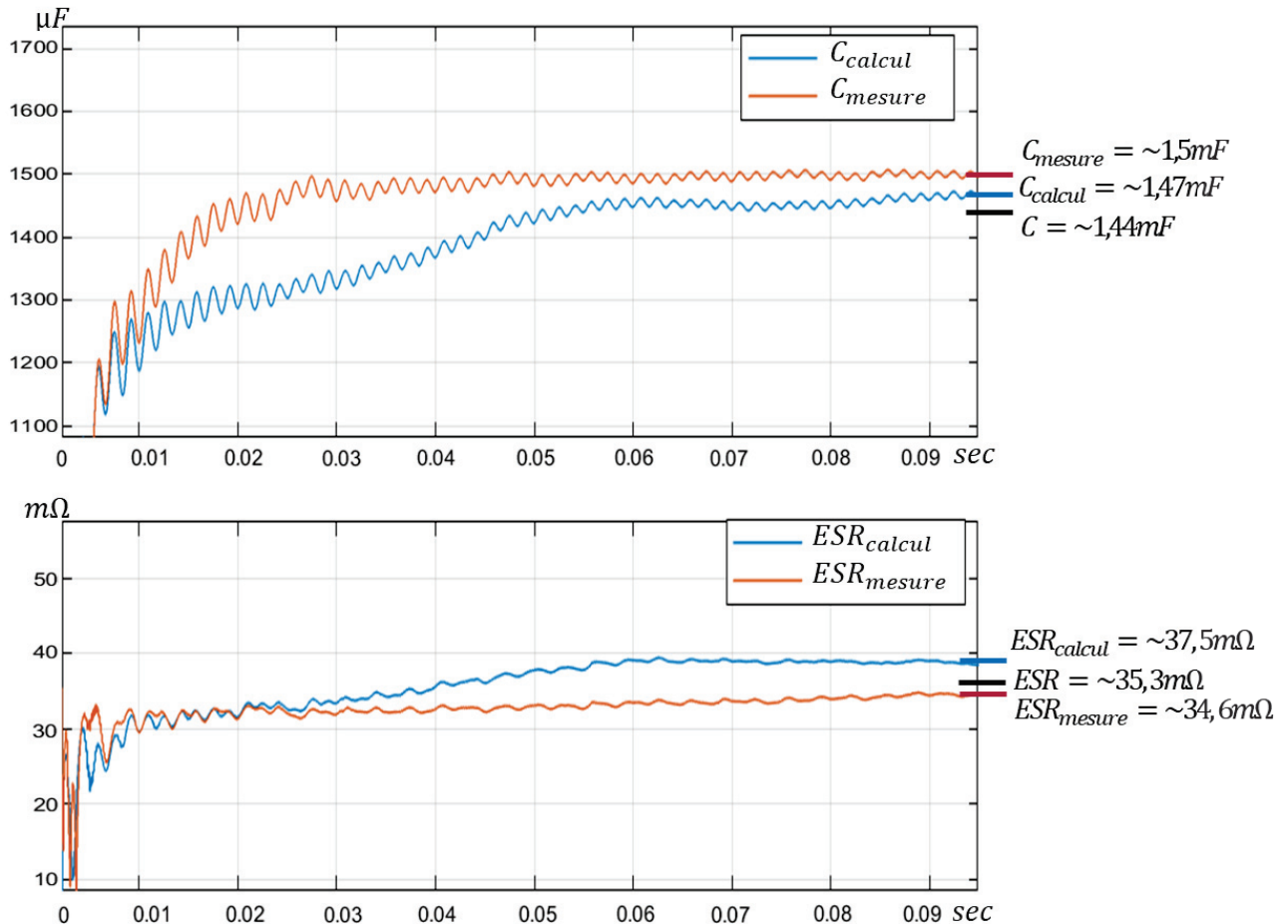


Figure 4.30 Estimation de ESR et C en utilisant le courant mesuré d'une part et le courant calculé d'autre part

L'estimation la plus lente demande 0.06s c'est à dire 3 fois plus que la période la plus grande puisque $1/f_L = 1/f_{charge} = 1/50 = 0.02s$.

Les différentes étapes d'extraction et de calcul pour arriver à l'estimation de ESR et de C avec la méthode 1 « méthode par système d'équations » sont présentées dans l'Annexe B.

Les estimations de ESR et C par la méthode 1, en utilisant i_C mesuré et i_C calculé, ont aussi été testé sous différent profils de charge :

- Variation de l'amplitude de charge entre 10A et 33A
- Variation de la fréquence de la charge ou de sortie entre 10Hz et 60Hz

Les estimations restent toujours avec une erreur inférieure à 10 % tant que la condition du calcul des valeurs efficaces (RMS) est respectée, c'est à dire lorsque le temps d'enregistrement est 3 fois supérieur à la période la plus grande. La plus grande erreur reste celle sur l'estimation de ESR_{calcul} . Ceci est dû au fait que cette dernière se fait majoritairement à 4kHz et que notre échantillonnage n'est supérieur que de 4 fois cette fréquence. En augmentant la fréquence d'échantillonnage, des estimations plus précises seraient obtenues.

5. Système de prédiction en temps réel de la durée de vie des condensateurs électrolytiques et sans essais préalables de vieillissement

5.1. Prérequis

Ce dernier chapitre expose la démarche ayant conduit, à partir des notions introduites dans les chapitres 2 à 4, à la création d'un dispositif capable d'estimer la durée de vie des condensateurs électrolytiques :

- quelles que soient leur version ou leurs caractéristiques électriques ;
- en ligne, c'est à dire lors du fonctionnement du convertisseur d'énergie ;
- sans essai préalable de vieillissement accéléré comme cela était réalisé dans les travaux précédents [5], [10]–[23] ;
- sans ajout de capteurs supplémentaires.

Avant d'expliquer le fonctionnement de notre dispositif d'estimation de durée de vie des condensateurs, il est utile de rappeler les équations qui vont être utilisées dans la construction du dispositif (Tableau 5.1).

Formules	Équations	Réf.
Loi de vieillissement : modèle d'estimation de durée de vie	$L_x = L_0 \cdot K_{TI} \cdot K_V$ $= L_0 \cdot e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x + R_{th} \cdot ESR_x \cdot I_{RMSx}^2} - \frac{1}{T_0 + R_{th} \cdot ESR_0 \cdot I_{RMS0}^2} \right)} \left(\frac{V_0}{V_x} \right)^n$	(2.28)
	<i>Remarque :</i> <i>Cette formule est à l'origine de celle simplifiée proposée par les fabricants</i> $L_x = L_0 \cdot K_T \cdot K_I \cdot K_V$. <i>En retirant les simplifications, nous obtenons une</i> <i>formule plus exacte. Dans ce qui suit</i>	
Paramètres de la loi de vieillissement utilisés dans le modèle de durée de vie	$E_a = [0.3eV ; 0.95eV]$ $n = [1 ; 6]$ $R_{th} = [0.5^\circ C/W ; 9^\circ C/W]$	(2.29)
	<i>Remarques :</i> <i>Les valeurs de ces constantes dépendent des caractéristiques électriques et</i> <i>thermo/mécaniques du condensateur considéré. Les fabricants peuvent</i>	

	fournir ces données au client. À défaut de donnée, des valeurs de constantes peuvent être fixées ainsi : $E_a = 0.5\text{eV}$; $n = 3$; $R_{th} = 3^\circ\text{C/W}$. Après avoir recueilli des données sur les indicateurs de vieillissement lors du fonctionnement du convertisseur, ces constantes peuvent être réévaluées comme décrit dans le chapitre 3 §3.1.4.2.	
Identification en ligne des indicateurs de vieillissement	$C = \sqrt{\frac{Z_c^2(6f_L) - Z_c^2(f_d)}{\tau_{6f_L}^2 - \tau_{f_d}^2}} \quad (4.20)$	
	$ESR = \sqrt{Z_c^2(f_d) - \frac{\tau_{f_d}^2}{C^2}} \quad (4.21)$	
	Remarques : Les indicateurs de vieillissement sont calculés par la méthode 1 « méthode par système d'équations » en ligne sous des conditions réelles de fonctionnement (chapitre 4 §4.3.2) c'est à dire avec des conditions de mesure qui varient en permanence suivant la température, le taux de charge, le niveau de tension... Comme nous avons vu dans le §2.4 du chapitre 2, la mesure de ESR et de C sont très sensibles aux variations de température du condensateur.	
Ajustement des valeurs des indicateurs de vieillissement	$\frac{ESR_{T_k}}{ESR_{T_{ref}}} = \beta_{esr1} + \beta_{esr2} e^{\frac{-T_k}{\beta_{esr3}}} \quad (2.36)$	
	$\frac{C_{T_k}}{C_{T_{ref}}} = \beta_{c1} + \beta_{c2} \cdot T_k \quad (2.37)$	
	Remarques : Les variations de ESR et C suivant la température sont exprimées par des équations incluant des paramètres β_{esri} et β_{ci} à identifier. Ces paramètres dépendent de la version du condensateur et de la température de référence choisie (elle peut être 293.15K (20°C), 298.15K (25°), 303.15K (30°) ou T_0 (θ_0)) ... Deux méthodes sont exposées dans la suite pour identifier en ligne et hors ligne ces paramètres.	
Modèles d'évolution des indicateurs de vieillissement pendant le vieillissement des condensateurs	$ESR(t) = \alpha_{esr1} + \alpha_{esr2} e^{\alpha_{esr3} t} \quad (3.11)$	
	$C(t) = \alpha_{c1} + \alpha_{c2} t \quad (3.12)$	
	Remarques : Les modèles de vieillissement des indicateurs ci-dessus ont été déduits par plusieurs études du domaine. Ces modèles décrits par les équations (3.11) et (3.12) ont été validés par nos essais de vieillissement accéléré exposés dans les chapitre 2 et 3. L'étape suivante consiste à identifier les paramètres α_i pendant le fonctionnement du convertisseur.	

Tableau 5.1 Tableau résumant les principales formules utilisées pour le fonctionnement du dispositif d'estimation de durée de vie des condensateurs

Remarque : Dans ce chapitre, comme il nous a fallu définir un grand nombre de paramètres, les intitulés de certaines variables déjà définies précédemment ont dû être légèrement adaptés et plusieurs nouveaux termes sont introduits :

Symboles	Significations
$L_{0\ ga}$	Appelé dans le chapitre 2 L_0 , c'est la durée de vie spécifiée et garantie (heures) par le constructeur sous un fonctionnement aux conditions extrêmes (température maximale supportée, ondulation de courant maximale permise, tension nominale). Cette valeur est indiquée dans les « datasheets » des condensateurs utilisés.
EOL_0	Durée de fin de vie estimée (heures) par l'algorithme dans le cas des conditions extrêmes
t_x	Instant présent pour les conditions actuelles
t_0	Instant présent extrapolé pour les conditions extrêmes
i	Indice définissant un nouvel intervalle de conditions appliquées
t_{xi}	Instant pour lequel les conditions actuelles changent pour la $i^{ème}$ fois
t_{0i}	Instant extrapolé pour les conditions extrêmes pour la $i^{ème}$ fois
$T_{xi}, V_{xi}, I_{RMSxi}$	Conditions de fonctionnement stables d'indice i
T_0, V_0, I_{RMS0}	Conditions extrêmes quel que soit l'indice i
T'_x, V'_x, I'_{RMSx}	Conditions de fonctionnement prévues
$K_{Tli} ; K_{Vi}$	Facteurs influençant la durée de vie des condensateurs liés aux conditions de fonctionnement $T_{xi}, V_{xi}, I_{RMSxi}$
$K'_{TI} ; K'_V$	Facteurs influençant la durée de vie des condensateurs liés aux conditions de fonctionnement prévues T'_x, V'_x, I'_{RMSx}
L_{xi}	Période de fonctionnement dans les conditions fixes (T_{xi}, V_{xi}, I_{RMSi}) entre l'instant t_{xi-1} et t_{xi}
L_{0i}	Période de vie consommée dans les conditions extrêmes (après extrapolation de la période de fonctionnement [$t_{xi-1}; t_{xi}$]) entre l'instant t_{0i-1} et t_{0i}
$L_{x\ tot}$	Durée de fonctionnement totale dans les conditions actuelles depuis l'instant initial 0 jusqu'à t_x $L_{x\ tot} = \sum L_{xi} = t_x - 0$
$L_{0\ tot}$	Durée de vie totale consommée dans les conditions extrêmes (T_0, V_0, I_{RMS0}) (après extrapolation des durées de fonctionnement) depuis l'instant initial 0 jusqu'à t_0 . $L_{0\ tot} = \sum L_{0i} = t_0 - 0$
RUL_0	Durée de vie restante aux conditions extrêmes entre l'instant t_0 et EOL_0
RUL_x	Durée de vie restante extrapolée aux conditions envisagées ($T'_{xi}, V'_{xi}, I'_{RMSi}$) pour des conditions prévues du fonctionnement des condensateurs

5.2. Principe de fonctionnement du système de prédiction de la durée de vie restante (RUL) des condensateurs

5.2.1. Description

Les contraintes qui impactent majoritairement la durée de vie utile des condensateurs sont : la température du composant et la tension appliquée. Comme la température interne du condensateur n'est pas mesurée usuellement dans les convertisseurs, elle est déduite de la température ambiante aux alentours des condensateurs et du courant circulant dans les condensateurs. Ce dernier doit être pris en compte puisqu'il engendre l'échauffement potentiel des composants.

En résumé, la connaissance des trois conditions d'utilisation (la tension du bus DC aux bornes des condensateurs v_{BUS} , la température ambiante T_{amb} et l'ondulation courant i_C) est nécessaire pour déterminer la durée de vie restante (Remaining Useful Life – RUL) du bloc de condensateurs (Figure 5.1).

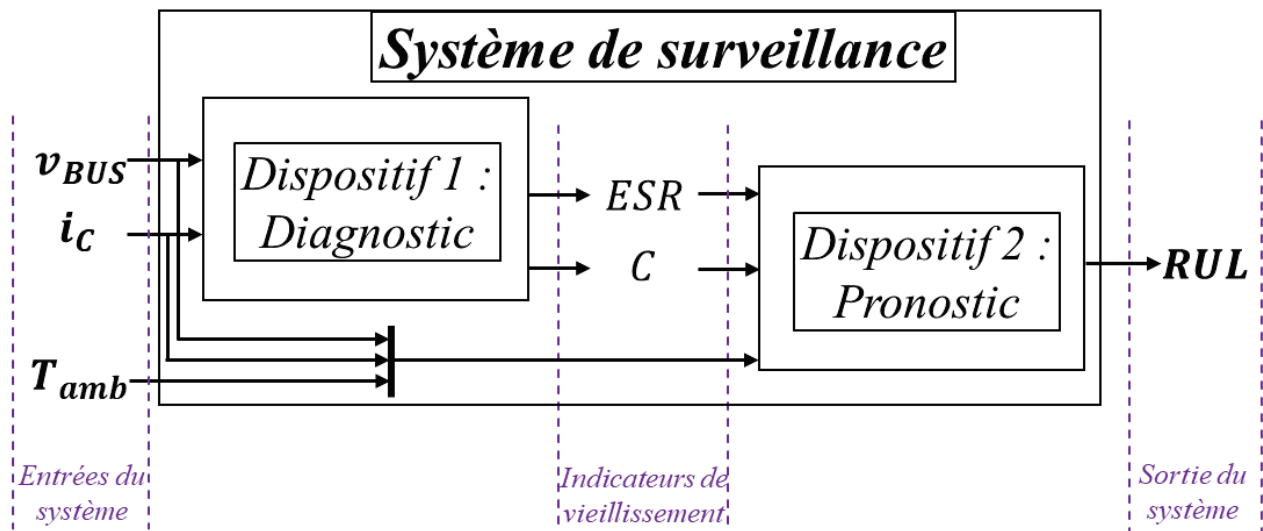


Figure 5.1 Entrées requises pour le système estimant la durée de vie restante RUL

Quasiment tous les convertisseurs statiques du marché sont équipés d'un capteur de température interne au convertisseur et d'un capteur de tension du bus DC. Cependant, peu de convertisseurs sont équipés d'un capteur de courant au niveau du bloc de condensateurs. Donc, pour considérer le cas le plus répandu et le plus contraignant, nous avons choisi un variateur qui n'a pas de capteur de courant au niveau des condensateurs. Nous avons montré qu'en utilisant les seules mesures disponibles, il est possible de reconstruire i_C et par la suite estimer la RUL des condensateurs.

5.2.2. Description globale du système de surveillance et d'estimation de la durée de vie restante des condensateurs

Pour estimer en ligne et sans essai préalable la RUL à partir des entrées, différentes étapes sont nécessaires. Chaque étape est brièvement présentée ci-dessous en portant une attention particulière à celles qui n'ont pas été décrites dans les chapitres précédents.

5.2.2.1. Les entrées du système de surveillance

La première étape (Figure 5.2) consiste à relever les caractéristiques du condensateur présentes dans les fiches techniques des fabricants nécessaires au fonctionnement du dispositif. Ces caractéristiques sont :

- La température maximale supportée par le condensateur θ_0 (en °C) ou T_0 (en K)
- La tension nominale du condensateur V_0
- Le courant efficace maximal permis I_{RMS0}
- La durée de vie garantie sous les conditions extrêmes $L_{0\text{ ga}}(T_0, V_0, I_{RMS0})$
- La résistance thermique du condensateur R_{th} (à défaut, cf. Tableau 5.1)
- L'énergie d'activation du condensateur E_a (à défaut, cf. Tableau 5.1)
- L'exposant n du facteur de tension (à défaut, cf. Tableau 5.1)
- Les coefficients de variation de ESR et C suivant la température $\beta_{esr1...c2}$ (on expliquera dans le §5.3.1 comment ces coefficients peuvent être obtenus).

Ces caractéristiques sont enregistrées dans le système de pronostic. Il n'est pas nécessaire de les modifier au cours du fonctionnement sauf si le module de condensateurs est remplacé lors d'une opération de maintenance, avec des nouveaux composants présentant d'autres caractéristiques.

Cette étape inclut également les mesures temporelles suivantes :

- La température ambiante θ_{amb} (en °C) ou T_{amb} (en K)
- La tension du bus DC v_{BUS}
- Le courant circulant dans le module des condensateurs i_C

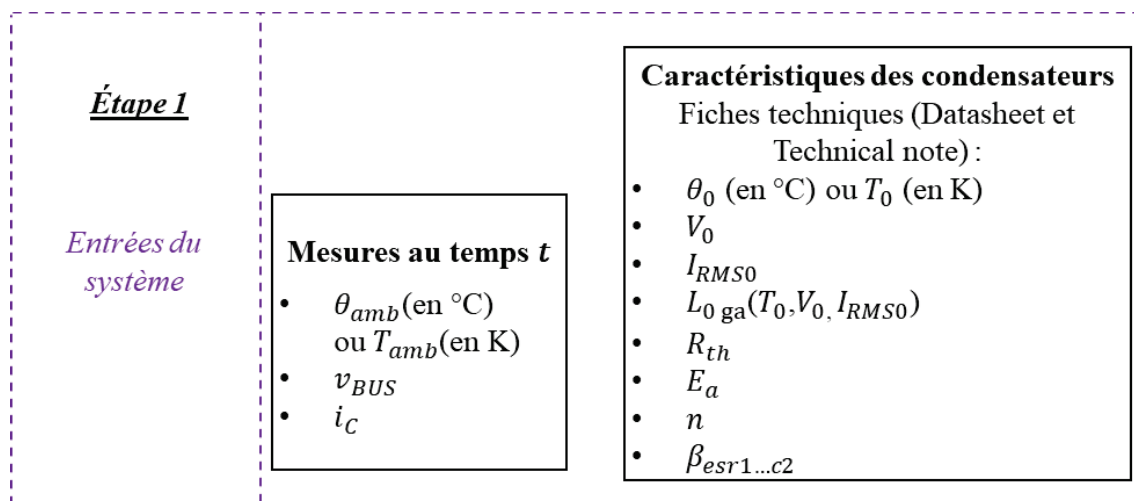


Figure 5.2 Étape 1 : les données d'entrée du dispositif

5.2.2.2. Extraction des données utiles à partir des mesures

Durant l'étape 2 (Figure 5.3), les informations suivantes sont extraites des signaux mesurés :

- les harmoniques de i_C et v_{BUS} qui permettent de calculer ESR et C ;

- les conditions de fonctionnement qui influent sur la durée de vie des condensateurs : T_x, V_x, I_{RMSx} .

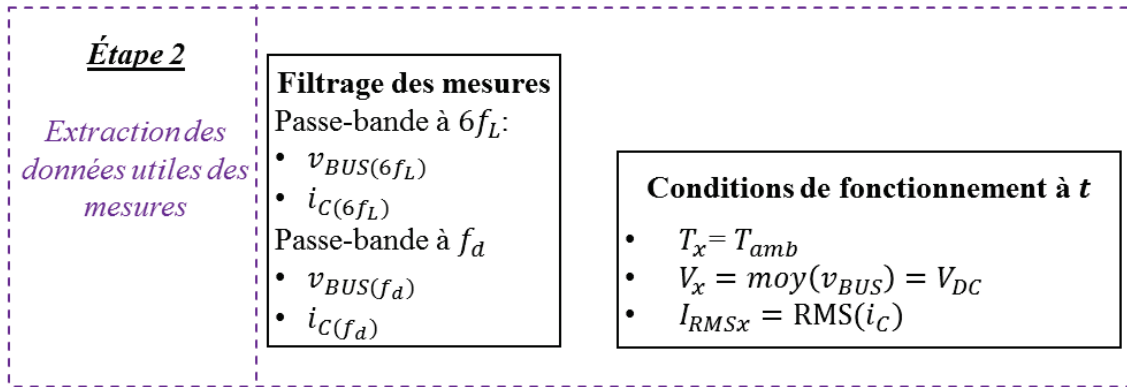


Figure 5.3 Étape 2 : extraction des données utiles des mesures

5.2.2.3. Identification des indicateurs de vieillissement ESR et C

Dans cette étape (Figure 5.4), ESR et C sont calculés avec la première méthode détaillée dans le §4.3.2 du chapitre 4.

Si le calculateur le permet, la méthode des moindres carrés récurrents peut aussi être utilisée pour cette identification. Dans ce cas, le filtrage des mesures de l'étape 2 n'est plus utile.

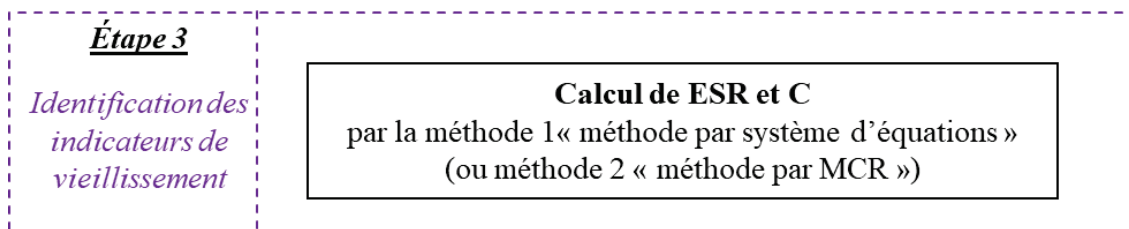


Figure 5.4 Étape 3 : identification des indicateurs de vieillissement ESR et C

5.2.2.4. Ajustement vers les conditions extrêmes

Une fois le calcul d'ESR et C et l'enregistrement des conditions de mesure (ou de fonctionnement) correspondantes effectués, les valeurs de ESR et C sont ajustées à $ESR_{T_{ref}}$ et $C_{T_{ref}}$ sous une même température de référence T_{ref} . L'enregistrement des conditions de fonctionnement $T_{xi}, V_{xi}, I_{RMSxi}$ durant la période de fonctionnement L_{xi} nous permet aussi de calculer K_{Ti} et K_{Vi} et de déduire L_{0i} correspondante si les conditions extrêmes T_0, V_0, I_{RMS0} étaient appliquées. Chacun de ces ajustements est détaillé dans le §5.3.

Avec les mesures de $ESR_{T_{ref}}$ et $C_{T_{ref}}$ ajustées à une température fixe de référence, l'intervalle de temps entre deux mesures est recalculé en supposant que les conditions extrêmes aient été appliquées. Les valeurs obtenues $ESR_{T_{ref}; L_0}$ et $C_{T_{ref}; L_0}$ sont alors semblables à celles obtenues lors des essais de vieillissement accéléré. Tous les résultats des vieillissements accélérés peuvent alors être utilisés (Figure 5.5).

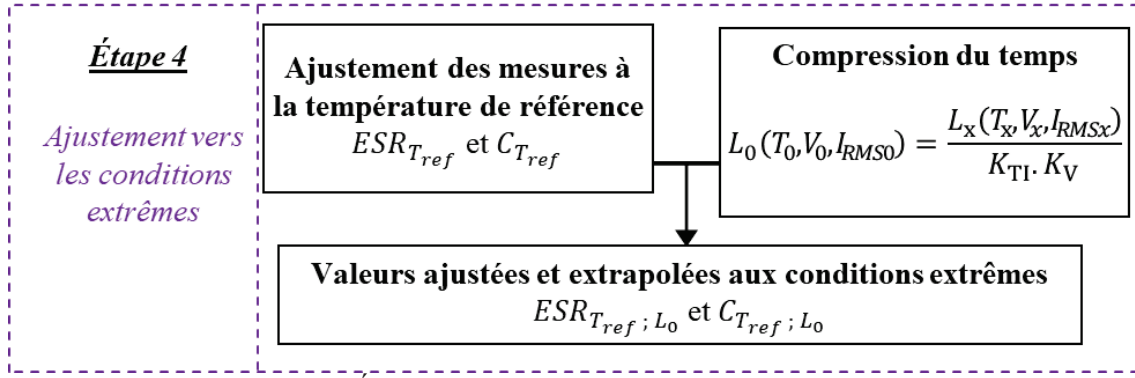


Figure 5.5 Étape 4 : ajustement vers les conditions extrêmes

5.2.2.5. Modélisation sous les conditions extrêmes

Lors de cette étape (Figure 5.6), les condensateurs sont, virtuellement, soumis aux conditions extrêmes. Une analogie peut donc être faite entre ce recalibrage du vieillissement aux conditions extrêmes et un essai de vieillissement accéléré sous les conditions T_0 , V_0 , I_{RMS0} . Il est alors possible de trouver les paramètres $\alpha_{esr1...c2}$ des modèles d'évolution des indicateurs de vieillissement (cf. équations (3.11) et (3.12)) par une identification. Une fois le modèle construit, une extrapolation du temps pour déterminer ESR et C est effectuée vers un futur, suffisamment grand pour inclure la fin de durée de vie. Les instants où les indicateurs de vieillissement atteignent leur valeur limite fixé par l'utilisateur ou par la norme (usuellement ESR doublé par rapport à sa valeur initiale ou C diminué de 20% par rapport à sa valeur initiale) correspondent aux instants de fin de vie (End Of Life EOL_0). La durée de vie restante RUL_0 , liée à chaque indicateur estimé aux conditions extrêmes, est la différence entre l'instant présent t_0 extrapolé aux conditions extrêmes et l'instant virtuel de fin de vie EOL_0 . Le RUL_0 retenu est celui qui correspond au plus petit temps restant en considérant les valeurs calculées de l'ESR et de C.

$$RUL_0 = EOL_0 - t_0 \quad (5.1)$$

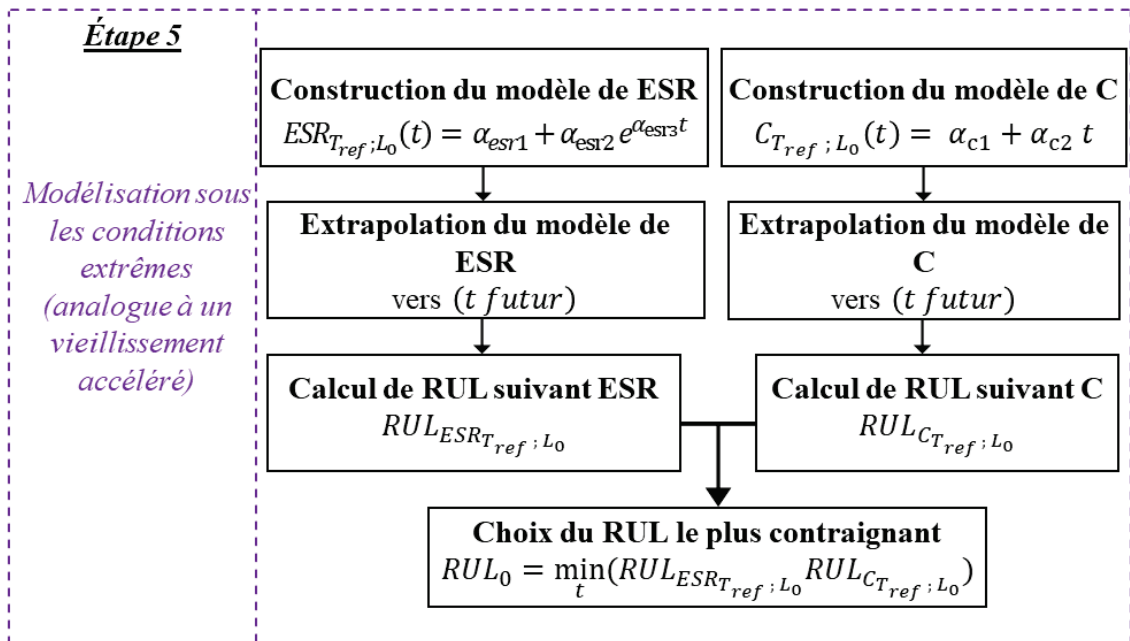


Figure 5.6 Étape 5 : modélisation sous les conditions extrêmes

5.2.2.6. Réajustement vers les conditions actuelles de fonctionnement et affichage du RUL

Après avoir trouvé la durée de vie restante RUL_0 virtuelle correspondant à l'application en permanence des conditions extrêmes supportées par les condensateurs, la durée de vie est ramenée aux conditions réelles de fonctionnement (Figure 5.7). En supposant que les conditions réelles correspondent à des contraintes constantes, le calcul de RUL_x peut se faire alors de cette manière :

$$RUL_x(T'_x, V'_x, I'_{RMSx}) = RUL_0(T_0, V_0, I_{RMS0}) \cdot K'_{TI} \cdot K'_V \quad (5.2)$$

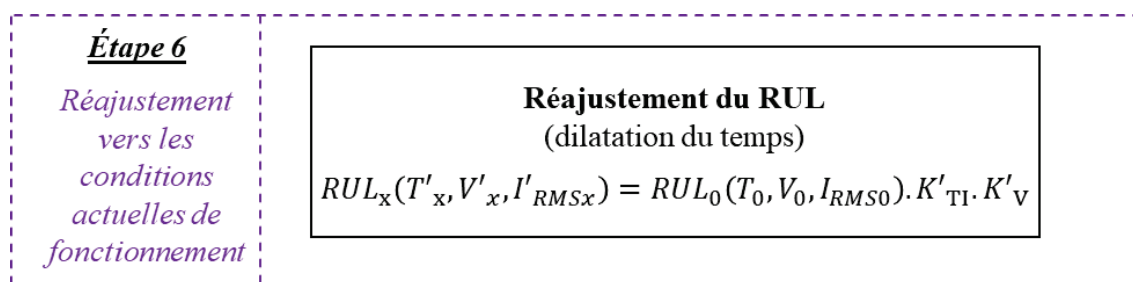


Figure 5.7 Étape 6 : réajustement vers les conditions actuelles de fonctionnement

Un message d'avertissement peut alors indiquer à l'utilisateur cette dernière valeur de RUL_x et les conditions d'évaluation (T_x, V_x, I_{RMSx}) (Figure 5.8) :

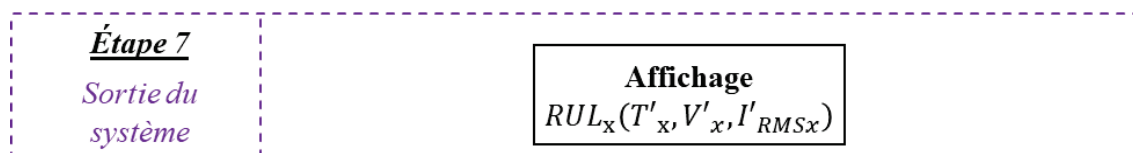


Figure 5.8 Étape 7 : affichage du RUL avec les conditions actuelles

Une autre possibilité est d'afficher l'état de santé du module des condensateurs dans l'équipement. Les deux dernières étapes sont alors remplacées par celles indiquées sur la Figure 5.9.

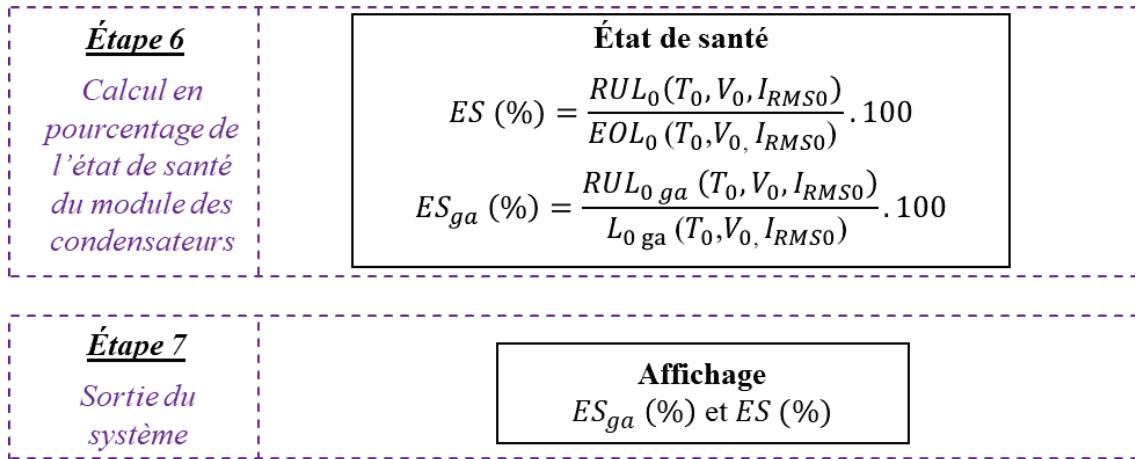


Figure 5.9 Étapes 6 et 7 : calcul de l'état de santé du module des condensateurs et affichage

L'état de santé est calculé par rapport à deux grandeurs :

- La fin de vie estimée par notre algorithme $EOL_0(T_0, V_0, I_{RMS0})$ comme exprimé par l'équation (5.1).
- La durée de vie garantie par le constructeur des condensateurs $L_{0\ ga}(T_0, V_0, I_{RMS0})$ telle que :

$$RUL_{0\ ga} = L_{0\ ga} - t_0 \quad (5.3)$$

Dans ces cas, il n'est donc pas nécessaire de réajuster la durée de vie restante vers les conditions actuelles de fonctionnement. Le rapport $ES (\%) = \frac{RUL_0}{EOL_0} \cdot 100$ donne l'état de santé selon la durée de vie totale calculée par notre algorithme. Le deuxième rapport $ES_{ga} (\%) = \frac{RUL_{0\ ga}}{L_{0\ ga}} \cdot 100$ donne l'état de santé selon la durée de vie garantie par le fabricant.

5.2.2.7. Pré-calculs nécessaires si la mesure du courant dans les condensateurs n'est pas disponible

Cette étape est optionnelle et n'existe que si la mesure du courant dans les condensateurs n'est pas accessible. Il faut alors reconstruire celle-ci avec un observateur et/ou avec les capteurs disponibles.

Pour la série de variateurs de vitesse « Altivar » de Schneider Electric, une méthode a été proposée pour construire le courant du module des condensateurs (cf. §4.2 du chapitre 4).

Cette étape 0 est rappelée sur la Figure 5.10.

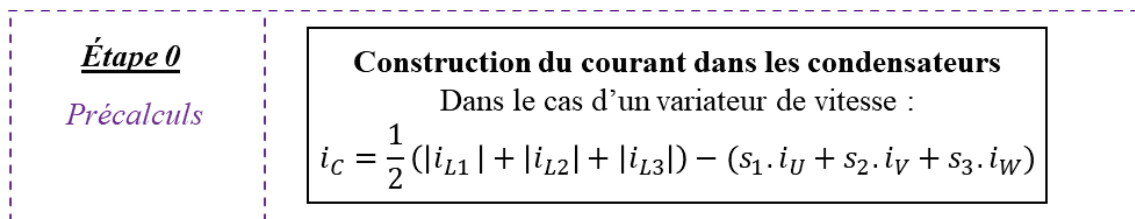


Figure 5.10 Étape 0 : pré-calculs nécessaires si la mesure du courant dans les condensateurs est indisponible

5.2.2.8. Interactions entre les différentes étapes

Les étapes 0 à 3 ont été expliquées dans les chapitres précédents. Nous allons donc détailler les étapes 4 à 7 dans le reste de ce chapitre. Avant ces descriptifs, l'organigramme suivant montre comment les différentes étapes interagissent entre elles (Figure 5.11).

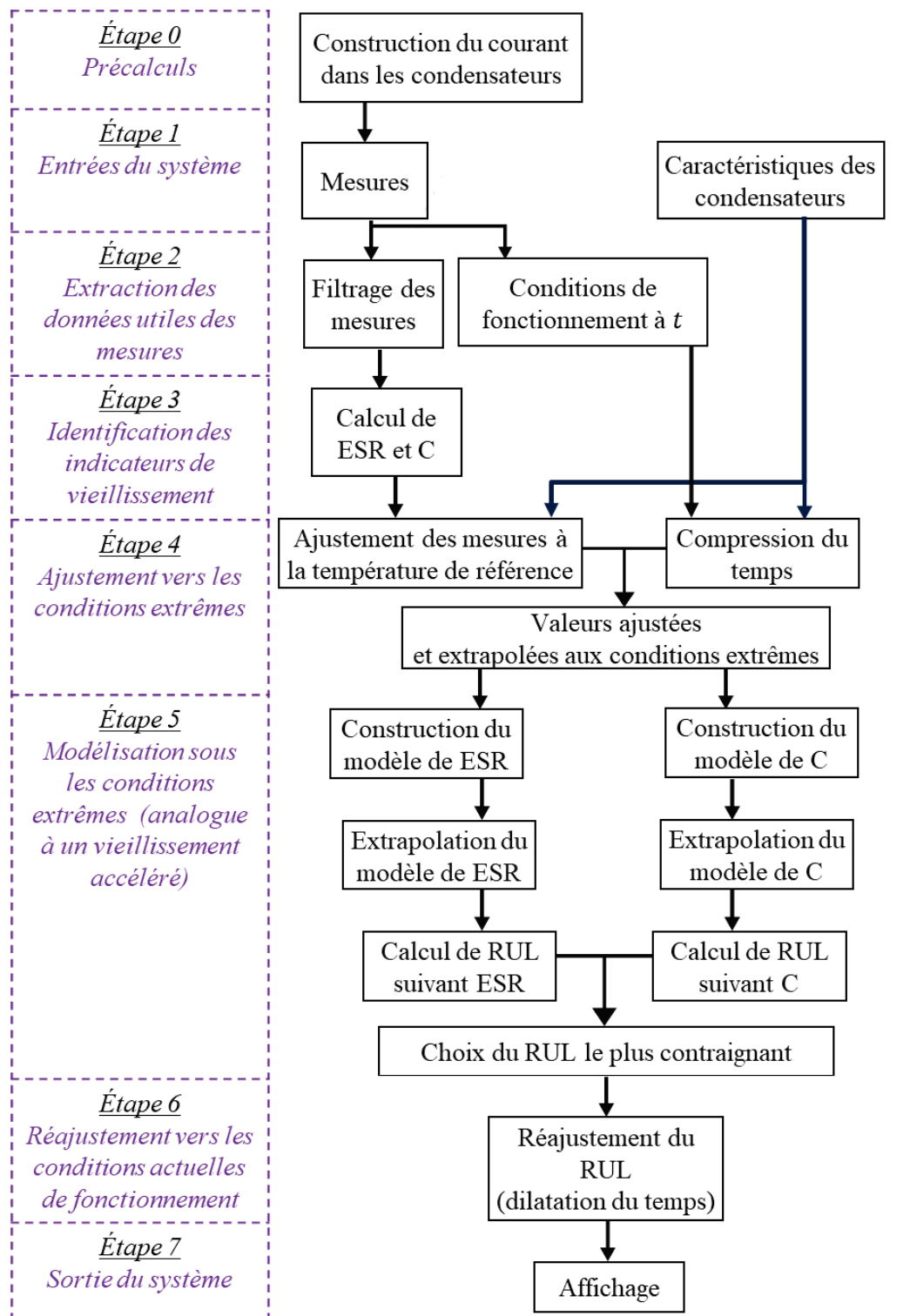


Figure 5.11 Organigramme de fonctionnement du dispositif de calcul de durée de vie RUL des condensateurs

5.3. Adaptation des indicateurs de vieillissement vers un même référentiel

Pour avoir des données de l'ESR et de C exploitables, il faut satisfaire deux conditions :

1. Les mesures doivent être faites au même référentiel de température.
2. Les conditions de vieillissement doivent être constantes pour utiliser les modèles d'évolution des indicateurs de vieillissement élaborés.

5.3.1. Ajustement de la mesure des indicateurs de vieillissement

Les indicateurs de vieillissement, ESR et C, sont calculés à tout instant et quel que soit les conditions de fonctionnement. Cependant, ces dernières, qui varient, vont influencer la mesure et le calcul de l'ESR et de C comme cela a été montré au §2.4 du chapitre 2. Il est donc important de prendre en compte la température des condensateurs lors du calcul de l'ESR et de C. La température interne d'un condensateur a été donnée dans le §2.2.3 du chapitre 2 (équations (2.10) (2.11)) :

$$T_{cx} = T_x + \Delta T_x \quad (2.10)$$

Avec

$$\Delta T_x = \mathcal{R}_{th} \cdot ESR_x \cdot I_{RMSx}^2 \quad (2.11)$$

L'ajustement de température est réalisé comme décrit par les équations (2.36) et (2.37) :

$$ESR_{T_{ref}} = \frac{ESR_{T_{cx}}}{\beta_{esr1} + \beta_{esr2} e^{\frac{-T_{cx}}{\beta_{esr3}}}} \quad (2.36)$$

$$C_{T_{ref}} = \frac{C_{T_k}}{\beta_{c1} + \beta_{c2} \cdot T_{cx}} \quad (2.37)$$

avec T_{ref} une température de référence fixée.

Il convient de déterminer les coefficients $\beta_{esr1...c2}$. Deux approches sont possibles :

- Par la mesure : une journée suffit pour mesurer la variation de l'ESR et de C des condensateurs en question suivant différentes températures. Le matériel nécessaire est un impédancemètre pour mesurer ESR et C et une chambre climatique pour faire varier la température.
- In situ : le but de notre travail est de pouvoir estimer la durée de vie des condensateurs en ligne sans avoir recours à des essais de vieillissement accéléré préalables à l'installation. Néanmoins, la méthode précédente nécessite un essai préalable, même si ce dernier ne prend que quelques heures comparées aux essais de vieillissement qui durent plusieurs mois.

Pour éliminer tous les essais préalables, il est toujours possible d'estimer les coefficients $\beta_{1...5}$ sachant que :

1. Durant une même journée, les variations de ESR et C ne sont pas dues au vieillissement, mais plutôt au changement de température.
2. La connaissance de la relation entre les mesures de ESR et C et la température sur toute la plage de température n'est pas nécessaire. Il y a des températures qui ne seront jamais atteintes durant le fonctionnement du convertisseur.

À partir de ces deux remarques, il est possible de déduire $\beta_{\text{esr1...c2}}$ suivant les différents couples de mesures (ESR_x, T_{cx}) et (C_x, T_{cx}). Les différents points de mesure seront placés sur des graphes ESR en fonction de la température et C en fonction de la température et la détermination de la courbe de variation sera faite par un algorithme d'identification paramétrique comme expliqué dans le §2.4 du chapitre 2.

5.3.2. Notions de compression, de dilatation et de segmentation du temps de fonctionnement des condensateurs suivant les conditions d'utilisation

5.3.2.1. Notions de compression et de dilatation du temps

Le modèle de durée de vie qui a été proposé dans le chapitre 2 permet d'estimer la durée de vie suivant des conditions de température, de courant et de tension définies.

$$L_x = L_0 \cdot K_{TI} \cdot K_V \quad (5.4)$$

Elle permet aussi de mettre en relation deux durées de vie L_x et L_0 ayant des conditions de fonctionnement différentes. K_{TI} et K_V étant des facteurs multiplicateurs supérieurs à 1 (5.5) (5.6), cela signifie que $L_x > L_0$. La durée de vie L_0 correspond aux conditions extrémales.

$$K_{TI} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_x + \mathcal{R}_{th} \cdot \text{ESR}_x \cdot I_{RMSx}^2} - \frac{1}{T_0 + \mathcal{R}_{th} \cdot \text{ESR}_0 \cdot I_{RMS0}^2} \right)} > 1 \quad (5.5)$$

$$K_V = \left(\frac{V_0}{V_x} \right)^n > 1 \quad (5.6)$$

Les conditions d'applications ne dépassent jamais les conditions extrêmes :

$$[T_x; I_{RMSx}; V_x] < [T_0; I_{RMS0}; V_0] \quad (5.7)$$

La durée de vie L_x est donc liée à L_0 grâce à une dilatation du temps si les conditions T_x, I_{RMSx} et V_x sont appliquées au lieu de T_0, I_{RMS0} et V_0 .

En suivant la même logique, L_0 sera une compression du temps L_x si les conditions T_0, I_{RMS0} et V_0 sont appliquées au lieu de T_x, I_{RMSx} et V_x :

$$L_0 = \frac{L_x}{K_{TI} \cdot K_V} \quad (5.8)$$

Dans ce qui suit, nous montrons comment inclure les variations des conditions de fonctionnement dans le calcul de la durée de vie.

5.3.2.2. Notion de segmentation du temps de fonctionnement

Au lieu de considérer L_0 et L_x comme étant les durées de vie totales des condensateurs sous les conditions T_0, V_0, I_{RMS0} et T_x, V_x, I_{RMSx} respectivement, on peut aussi voir L_0 et L_x comme les durées de vie consommées sur une période déterminée de temps lorsque T_0, V_0, I_{RMS0} et T_x, V_x, I_{RMSx} sont appliqués. La durée de vie totale peut donc être segmentée en intervalles de temps gouvernés par des conditions de fonctionnement propres à chacun d'eux. Les intervalles de temps peuvent donc être délimités par le changement des conditions T_x, V_x, I_{RMSx} . Ils ne sont donc pas de durées égales. La précision des bornes délimitant ces intervalles dépend de la périodicité des mesures tout au long du fonctionnement. Pour mieux comprendre le concept, voici un exemple qui traite de la segmentation, de la compression puis de la dilatation du temps :

Imaginons les contraintes vécues jusqu'à l'instant présent t_x comme indiqué sur le Tableau 5.2 :

Étape	Durée	Conditions	Durée totale de fonctionnement $L_{x\ tot}$
1	L_{x1}	$(T_{x1}, V_{x1}, I_{RMSx1})$	L_{x1}
2	L_{x2}	$(T_{x2}, V_{x2}, I_{RMSx2})$	$L_{x1} + L_{x2}$
3	L_{x3}	$(T_{x3}, V_{x3}, I_{RMSx3})$	$L_{x1} + L_{x2} + L_{x3}$
...q	L_{xq}	$(T_{xq}, V_{xq}, I_{RMSxq})$	$\sum_{i=1}^q L_{xi}$

Tableau 5.2 Profil de contraintes vécu jusqu'au temps présent

La durée totale de fonctionnement des condensateurs peut être écrite de la manière suivante :

$$L_{x\ tot} = \sum_{i=1}^q L_{xi} \quad (5.9)$$

Cette durée de fonctionnement peut être représentée grâce à la Figure 5.12.

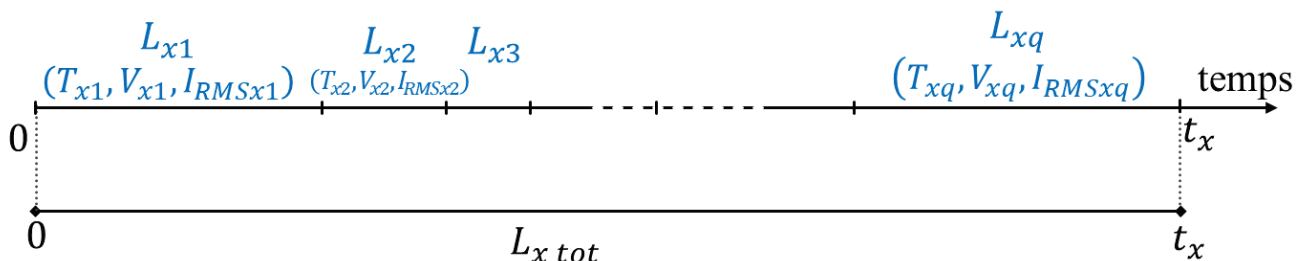


Figure 5.12 Profil de contraintes vécu jusqu'à l'instant présent t_x

5.3.2.3. Intérêt de la segmentation avec la compression du temps

Avec ce profil, il est possible de venir compresser le temps pour chaque période L_{xi} selon les contraintes appliquées vers les contraintes extrêmes T_0 , I_{RMS0} et V_0 (Tableau 5.3).

Étape	Durée	Conditions	Durée totale de fonctionnement $L_{x\ tot}$	Facteurs multiplicateurs	Durée compressée si (T_0, V_0, I_{RMS0}) appliquées	Durée totale compressée
1	L_{x1}	$(T_{x1}, V_{x1}, I_{RMSx1})$	L_{x1}	$\frac{1}{K_{TI1} \cdot K_{V1}}$	L_{01}	L_{01}
2	L_{x2}	$(T_{x2}, V_{x2}, I_{RMSx2})$	$L_{x1} + L_{x2}$	$\frac{1}{K_{TI2} \cdot K_{V2}}$	L_{02}	$L_{01} + L_{02}$
3	L_{x3}	$(T_{x3}, V_{x3}, I_{RMSx3})$	$L_{x1} + L_{x2} + L_{x3}$	$\frac{1}{K_{TI3} \cdot K_{V3}}$	L_{03}	$L_{01} + L_{02} + L_{03}$
...q	L_{xq}	$(T_{xq}, V_{xq}, I_{RMSxq})$	$\sum_{i=1}^q L_{xi}$	$\frac{1}{K_{TIq} \cdot K_{Vq}}$	L_{0q}	$\sum_{i=1}^q L_{0i}$

Tableau 5.3 Passage des contraintes vécues jusqu'à présent aux contraintes extrêmes

En sommant les nouveaux segments compressés, notre durée de vie consommée aux conditions extrêmes est calculée par :

$$L_{0\ tot} = \sum_{i=1}^q L_{0i} \quad (5.10)$$

La Figure 5.13 illustre l'utilisation de ces facteurs multiplicateurs/diviseurs qui influencent les pentes des segments de droites $L_0 = f(L_x)$.

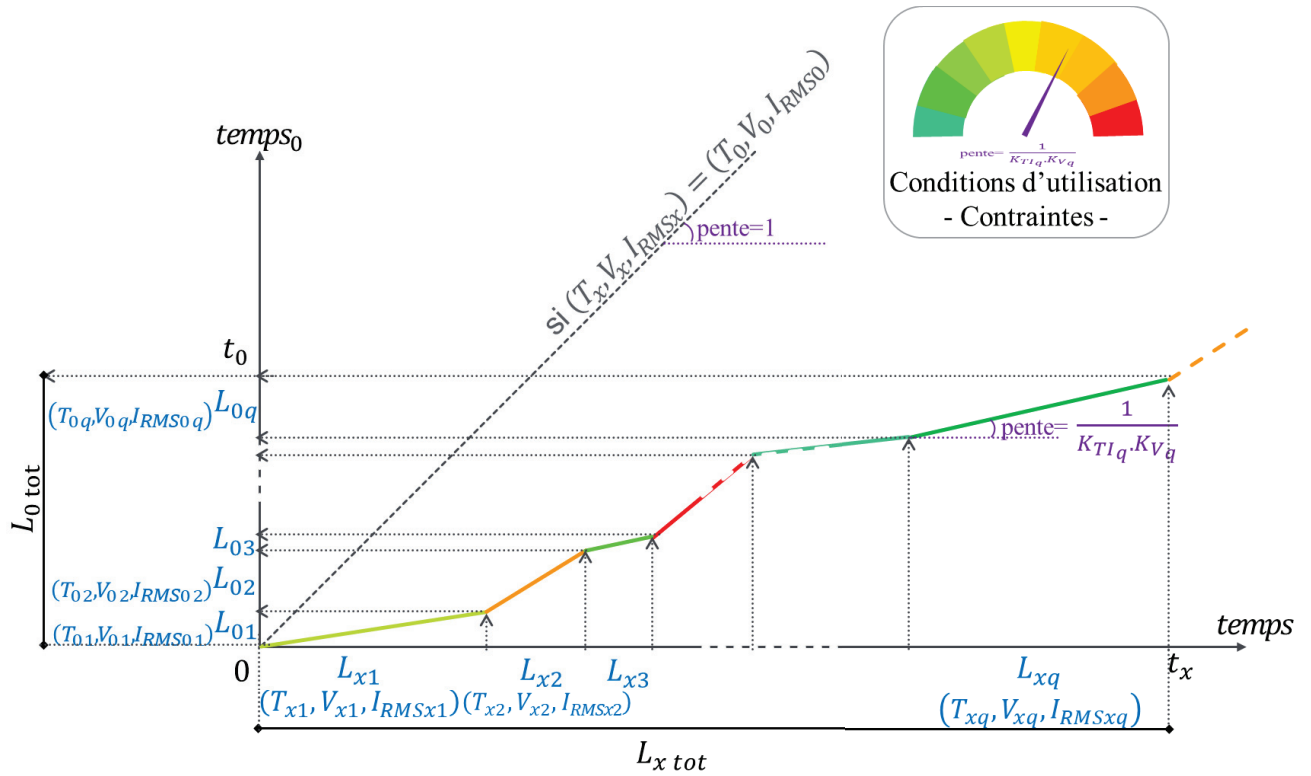


Figure 5.13 Détermination de la durée de vie $L_{0\ tot}$ consommée au lieu de $L_{x\ tot}$ en transformant les contraintes vécues jusqu'à présent aux contraintes extrêmes

Une fois la durée consommée $L_{0\ tot}$ déterminée, l'estimation de la fin de vie EOL0 est réalisée grâce à l'identification des modèles d'évolution des indicateurs de vieillissement (détaillé dans le §5.4). L'estimation de la durée de vie restante RUL_0 des condensateurs aux conditions extrêmes peut être alors réalisée (Figure 5.14).

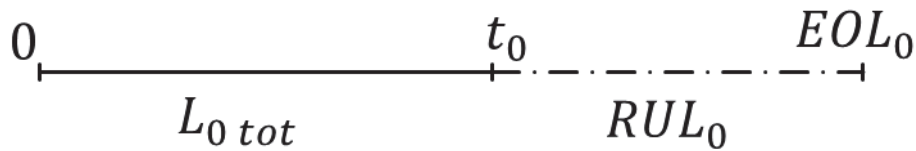


Figure 5.14 Durée de vie restante RUL_0 , aux conditions extrêmes, estimée à l'instant virtuel t_0

L'étape 6 (§5.2.2.6) montre comment passer à RUL_x en supposant que les contraintes prévues restent constantes et égales à celles de l'instant présent.

5.3.2.4. Intérêt de la segmentation avec la dilatation du temps

Un profil de contraintes plus réaliste (variant) peut être appliqué sur des intervalles de temps déterminés, en considérant par exemple l'historique du profil de charge et de température associé éventuellement à un algorithme de « rainflow ».

La formule de calcul (estimation) de RUL_x devient alors un peu différente. Le raisonnement ci-dessous permet de déduire la nouvelle formule de RUL_x .

La durée de vie restante aux conditions extrêmes RUL_0 a été estimée et un profil de contraintes à appliquer dans le futur (Tableau 5.4) (Figure 5.15) a été prévu (durée L'_{xi} pour chaque ensemble de contraintes $(T'_{xi}, V'_{xi}, I'_{RMSxi})$) :

Étape	Durée	Conditions
1	L'_{x1}	$(T'_{x1}, V'_{x1}, I'_{RMSx1})$
2	L'_{x2}	$(T'_{x2}, V'_{x2}, I'_{RMSx2})$
...m	L'_{xm}	$(T'_{xm}, V'_{xm}, I'_{RMSxm})$
...p	L'_{xp}	$(T'_{xp}, V'_{xp}, I'_{RMSxp})$

Tableau 5.4 Profil de contraintes prévues

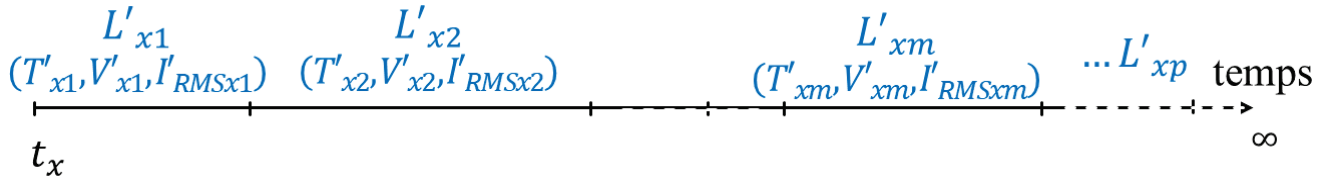


Figure 5.15 Profil de contraintes prévues

Pour calculer RUL_x , il faudra tout d'abord trouver m tel que, on ait :

$$RUL_0 = \sum_{i=1}^m L'_{oi} = \sum_{i=1}^m \frac{L'_{xi}}{K'_{TIxi} \cdot K'_{Vxi}} \quad (5.11)$$

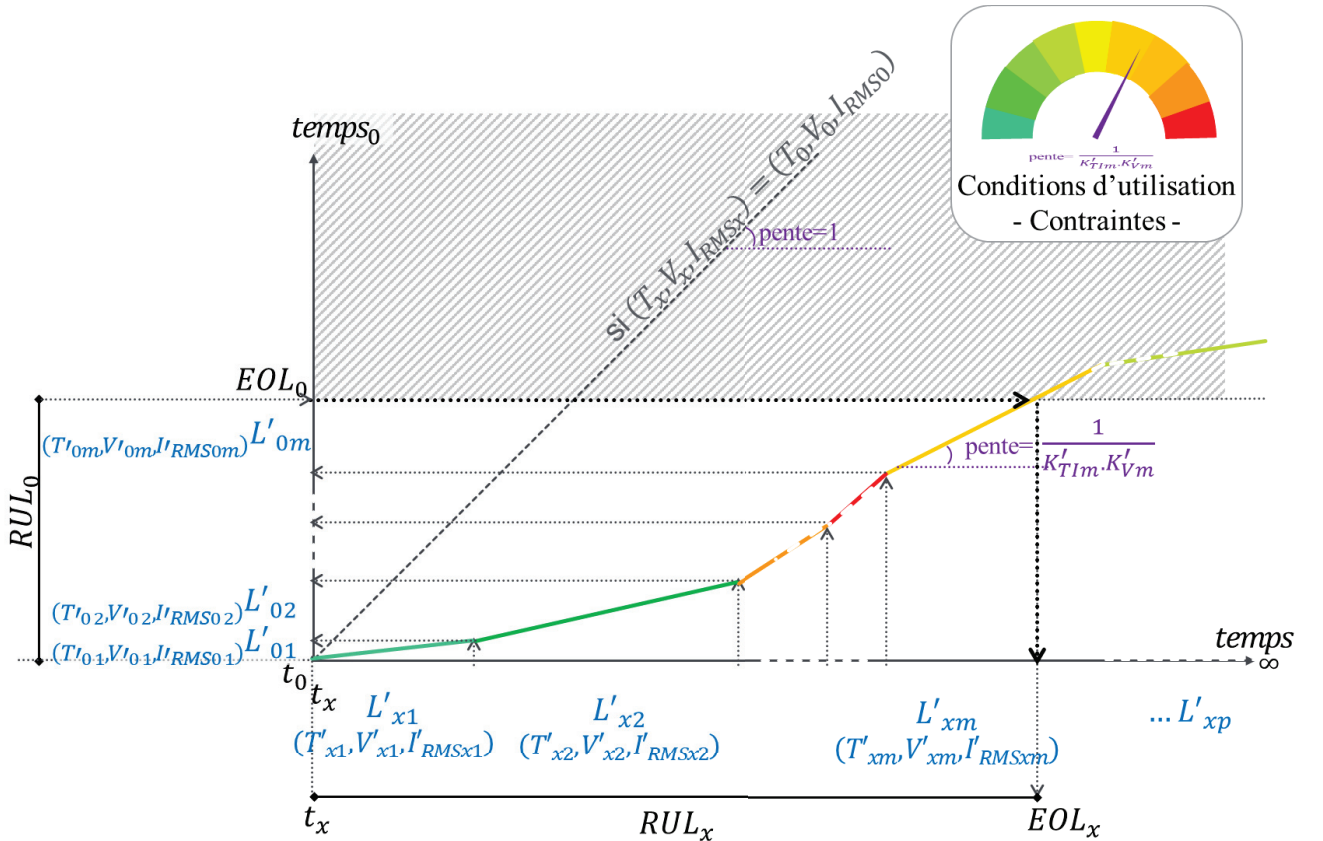


Figure 5.16 Compression du temps du profil prévu et arrêt lorsque $\sum_{i=1}^m L'_{oi} \ge RUL_0$

En d'autres termes, il faut trouver lors de quel intervalle de temps la différence ci-dessous passe par zéro (changement de signes) :

$$RUL_0 - \sum_{i=1}^m \frac{L'_{xi}}{K'_{TI_{xi}} \cdot K'_{V_{xi}}} \leq 0 \quad (5.12)$$

Étape	Durée	Conditions	Facteurs multiplicateurs	Durée compressée si (T_0, V_0, I_{RMS0}) appliquées	$RUL_0 - \sum_{i=1}^{ordre} \frac{L'_{xi}}{K'_{TI_{xi}} \cdot K'_{V_{xi}}}$
1	L'_{x1}	$(T'_{x1}, V'_{x1}, I'_{RMSx1})$	$\frac{1}{K'_{TI_1} \cdot K'_{V_1}}$	L'_{01}	$RUL_0 - L'_{01} > 0$
2	L'_{x2}	$(T'_{x2}, V'_{x2}, I'_{RMSx2})$	$\frac{1}{K'_{TI_2} \cdot K'_{V_2}}$	L'_{02}	$RUL_0 - L'_{01} - L'_{02} > 0$
...m	L'_{xm}	$(T'_{xm}, V'_{xm}, I'_{RMSxm})$	$\frac{1}{K'_{TI_m} \cdot K'_{V_m}}$	L'_{0m}	$RUL_0 - \sum_{i=1}^m L'_{0i} \leq 0$
...p	L_{xp}	$(T'_{xp}, V'_{xp}, I'_{RMSxp})$	$\frac{1}{K'_{TI_p} \cdot K'_{V_p}}$	L_{0p}	$RUL_0 - \sum_{i=1}^p L'_{0i} \ll 0$

Tableau 5.5 Profil de contraintes prévu en temps compressé

Rappelons que, dans cette échelle de temps compressé, lorsque cette différence $RUL_0 - \sum_{i=1}^{ordre} \frac{L'_{xi}}{K'_{TI_{xi}} \cdot K'_{V_{xi}}}$ décroît en deçà de « zéro » (Tableau 5.5), cela signifie que toute la durée de vie restante, dans les conditions virtuelles extrêmes, a été consommée (Figure 5.16).

La différence $RUL_0 - \sum_{i=1}^m L'_{0i}$, monotone décroissante, passe d'une valeur positive à une valeur négative en m_0 lorsque m croît. La durée de vie dans les conditions prévues du profil est alors encadrée par :

$$\sum_{i=1}^{m_0-1} L'_{xi} < RUL_x < \sum_{i=1}^{m_0} L'_{xi} \quad (5.13)$$

5.4. Modélisation sous les conditions extrêmes et estimation de durée de vie des condensateurs

5.4.1. Algorithme d'optimisation à régression non linéaire

5.4.1.1. Modèle de représentation

Nous allons décrire dans ce paragraphe la méthode d'identification en ligne utilisée pour déterminer les paramètres de nos lois comportementales ESR(t) et C(t).

Dans notre cas, les modèles d'évolution de ESR et C, trouvés dans le chapitre 3, sont :

$$ESR(t) = \alpha_{esr1} + \alpha_{esr2} e^{\alpha_{esr3} t} \quad (3.11)$$

$$C(t) = \alpha_{c1} + \alpha_{c2} t \quad (3.12)$$

La méthode étant identique pour les lois ESR(t) et C(t), nous représentons leur sortie par

$$\hat{y} = f(\alpha, t) \quad (5.14)$$

α est le vecteur de paramètres qui caractérise le modèle expérimental.

L'objectif dans l'identification de α est d'obtenir les valeurs optimales de telle sorte que la sortie estimée $\hat{y}(t)$ tende vers la valeur issue de mesure $y(t)$ c'est à dire que l'erreur entre les valeurs issues de mesures et celles issues du modèle soit minimiser.

En pratique, les mesures sont discrétisées aux instants k : $y(t) \Rightarrow y_k$ et $\hat{y}(t) \Rightarrow \hat{y}_k$.

L'écart entre les valeurs issues de mesures et la sortie du modèle est quantifié à l'aide d'un critère quadratique J :

$$J = \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (5.15)$$

avec N est le nombre de paramètres du vecteur α à identifier.

Les conditions pour trouver le minimum du critère quadratique J en fonction d'une seule variable, sont les suivantes :

- Condition du premier ordre pour trouver un extremum (maximum ou minimum)

$$J'(\alpha_1) = 0 \quad (5.16)$$

- Condition du premier ordre pour que l'extremum soit un minimum

$$J''(\alpha_1) > 0 \quad (5.17)$$

Lorsque le critère quadratique J est une fonction de plusieurs variables $J(\alpha_1, \alpha_2 \dots, \alpha_n)$:

- La condition du premier ordre signifie qu'il faut que le gradient soit nul :

$$J'(\alpha_1, \alpha_2 \dots, \alpha_n) = \left[\frac{\partial J}{\partial \alpha_1} \quad \frac{\partial J}{\partial \alpha_2} \quad \dots \quad \frac{\partial J}{\partial \alpha_n} \right] = 0 \quad (5.18)$$

- La condition du second ordre signifie qu'il faut que le hessien soit positif (les valeurs propres du hessien sont strictement positives) :

$$J''(\alpha_1, \alpha_2 \dots, \alpha_n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial \alpha_1^2} & \frac{\partial^2 J}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial^2 J}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_n} \\ \vdots & \frac{\partial^2 J}{\partial \alpha_2^2} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 J}{\partial \alpha_n \partial \alpha_1} & \frac{\partial^2 J}{\partial \alpha_n \partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial^2 J}{\partial \alpha_n^2} \end{bmatrix} > 0 \quad (5.19)$$

La méthode des moindres carrés est applicable uniquement si le modèle considéré est linéaire par rapport aux paramètres. Comme le modèle mathématique de ESR(t) n'est pas linéaire par rapport aux paramètres, il faut s'intéresser aux méthodes d'identification applicables aux modèles non linéaires.

Un modèle non linéaire par rapport aux paramètres peut s'exprimer génériquement ainsi :

$$\widehat{y}_k = f(\alpha, k) \quad (5.20)$$

Avec f une fonction mathématique quelconque et α le jeu (vecteur) de paramètres à identifier.

5.4.1.2. Méthodes numériques itératives

L'identification des paramètres d'un modèle non linéaire fait appel à des méthodes numériques itératives pour minimiser un critère donné (Figure 5.17).

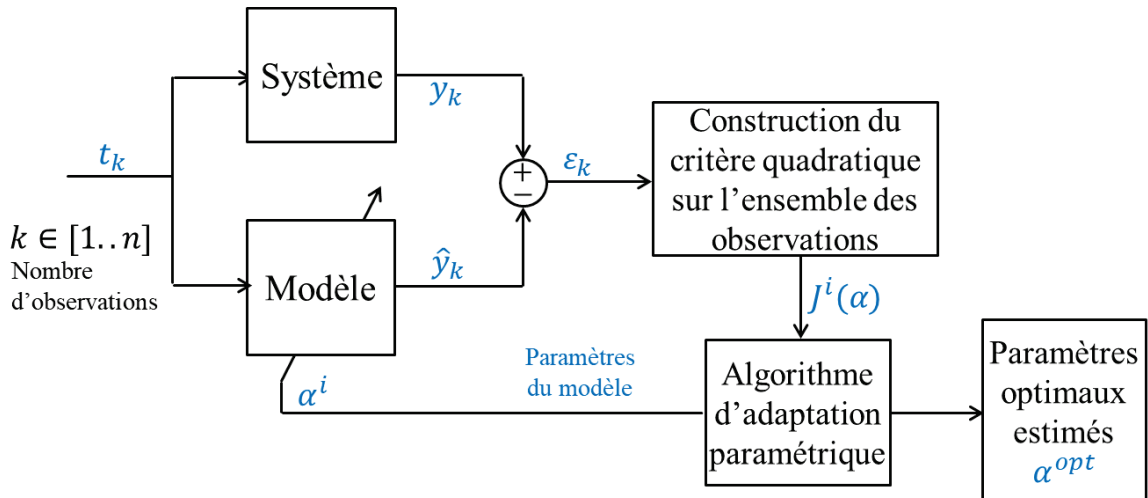


Figure 5.17 Schéma bloc d'optimisation des paramètres α^i

Cette technique consiste donc, à partir des erreurs entre les sorties du modèle et celles du processus, à faire évoluer le vecteur de paramètre α^i de manière à minimiser un critère quadratique d'erreur $J^i(\alpha)$ entre les mesures et le modèle :

$$\min[J^i] = \min \sum_{k=1}^N \varepsilon_k^2 = \min \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \rightarrow \alpha^{opt} \quad (5.21)$$

La méthode numérique itérative fonctionne de la manière suivante (Figure 5.18) :

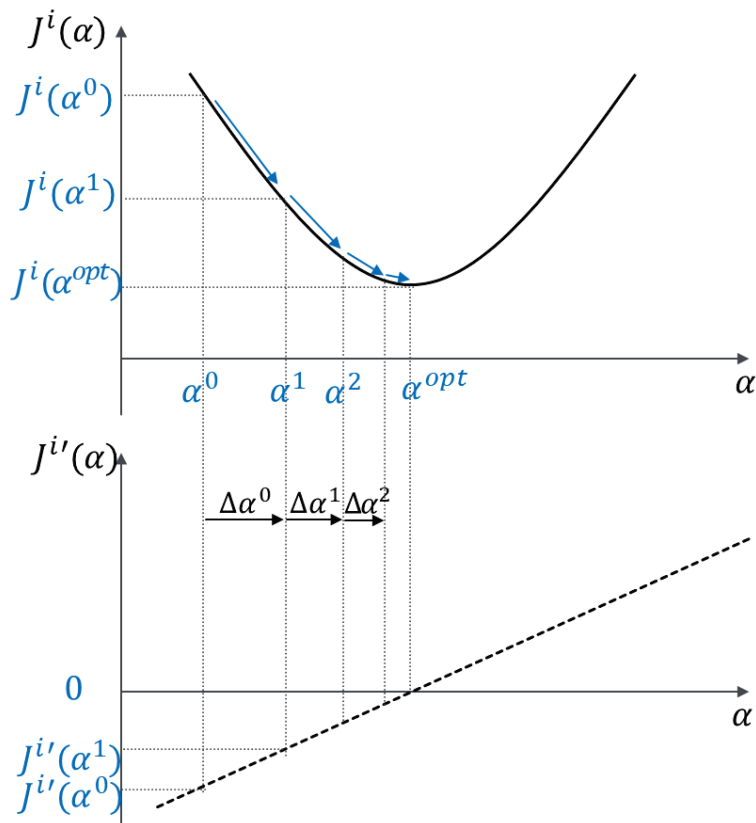


Figure 5.18 Évolution du critère quadratique et de son gradient suivant les valeurs de α^i

Le Tableau 5.6 ci-dessous, résume quelques méthodes numériques itératives :

Méthode	Loi d'évolution des paramètres : $\alpha^{i+1} = \alpha^i \pm \Delta\alpha$ avec $\Delta\alpha$ pas d'évolution	Remarques
Gradient	$\alpha^{i+1} = \alpha^i - \lambda J'(\alpha^i)$	Adaptation automatique du pas d'évolution « $\lambda J'(\alpha^i)$ » à la pente du critère : • Grand pas loin de α^{opt} (car $J'(\alpha^i)$ est grand) • Petit pas au voisinage de α^{opt} (car $J'(\alpha^i)$ est petit) Méthode à progression rapide loin de l'optimum et à convergence lente près de l'optimum.
Gauss-Newton	$\alpha^{i+1} = \alpha^i - \frac{J'(\alpha^i)}{J''(\alpha^i)}$	Utilisation de l'information contenue dans la dérivée seconde pour faire progresser l'algorithme. Si le critère est purement quadratique, on converge vers l'optimum en 1 fois : $J(\theta)$ parabolique $\rightarrow J'(\theta)$ droite $\rightarrow J''(\theta)$ constante Méthode à progression rapide près de l'optimum.
Levenberg-Marquardt	$\alpha^{i+1} = \alpha^i - \frac{J'(\alpha^i)}{J''(\alpha^i) + \lambda^i}$	Combinaison de la méthode du gradient avec la méthode de Gauss-Newton : • Quand λ^i est grand, la direction de recherche selon $J'(\alpha^i)$ est privilégiée • Quand λ^i est petit, on donne plus d'importance à la direction de recherche selon $J''(\alpha^i)$ Plus l'algorithme s'approche de α^{opt} plus λ^i devient petit (adaptatif).

Tableau 5.6 Quelques méthodes numériques itératives

La méthode d'optimisation des paramètres choisie est la méthode de Levenberg-Marquardt. Elle combine les avantages de la méthode du gradient (efficace loin de l'optimum) et les avantages de la méthode de Gauss-Newton (efficace proche de l'optimum). Cet algorithme s'avère être très efficace pour la résolution de problèmes d'identification non linéaire.

Dans la suite, les quantités $J'(\alpha)$ et $J''(\alpha)$ seront évaluées pour permettre la programmation de l'algorithme.

5.4.1.3. Les fonctions de sensibilité

Considérons un modèle de système à identifier de la forme $\widehat{y_k} = f(\alpha_k)$.

Le critère à minimiser associé au problème d'identification est le suivant :

$$J(\alpha) = \sum_{k=1}^N (y_k - \widehat{y_k}(\alpha))^2 \quad \text{avec } \alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_N] \quad (5.22)$$

Calcul du gradient :

$$\begin{aligned}
 J'(\alpha) &= \frac{\partial J(\alpha)}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k(\alpha))^2 \\
 &= \frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{k=1}^N (y_k^2 - 2y_k \hat{y}_k(\alpha) + \hat{y}_k(\alpha)^2) \\
 &= \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial}{\partial \alpha} y_k^2 - 2 \frac{\partial}{\partial \alpha} y_k \hat{y}_k(\alpha) + \frac{\partial}{\partial \alpha} \hat{y}_k(\alpha)^2 \right) \\
 &= \sum_{k=1}^N \left(0 - 2y_k \frac{\partial \hat{y}_k(\alpha)}{\partial \alpha} + 2\hat{y}_k(\alpha) \frac{\partial \hat{y}_k(\alpha)}{\partial \alpha} \right) \\
 &= -2 \sum_{k=1}^N \left((y_k - \hat{y}_k(\alpha)) \frac{\partial \hat{y}_k(\alpha)}{\partial \alpha} \right) \\
 J'(\alpha) &= -2 \sum_{k=1}^N \varepsilon_k \cdot \sigma_k(\alpha)
 \end{aligned} \tag{5.23}$$

avec $\sigma_k(\alpha) = \begin{bmatrix} \sigma_k(\alpha_1) \\ \vdots \\ \sigma_k(\alpha_N) \end{bmatrix}$ le fonction de sensibilité de la forme :

$$\begin{aligned}
 \sigma_k(\alpha_i) &= \frac{\partial \hat{y}_k(\alpha)}{\partial \alpha_i} \\
 \varepsilon_k &= y_k - \hat{y}_k(\alpha)
 \end{aligned} \tag{5.24}$$

Calcul du hessien

$$\begin{aligned}
 J''(\alpha) &= \frac{\partial J'(\alpha)}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(-2 \sum_{k=1}^N \varepsilon_k \cdot \sigma_k(\alpha) \right) \\
 &= -2 \sum_{k=1}^N \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial \alpha} \sigma_k - 2 \sum_{k=1}^N \frac{\partial \sigma_k}{\partial \alpha} \varepsilon_k \\
 &= -2 \sum_{k=1}^N \frac{\partial (y_k - \hat{y}_k(\alpha))}{\partial \alpha} \sigma_k - 2 \sum_{k=1}^N \frac{\partial \sigma_k}{\partial \alpha} \varepsilon_k
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

Les termes $\sum_{k=1}^N \frac{\partial \sigma_k}{\partial \alpha} \varepsilon_k$ peuvent être négligés et la dérivée seconde (matrice hessienne) approximée par :

$$J''(\alpha) = 2 \sum_{k=1}^N \sigma_k(\alpha) \cdot \sigma_k^T(\alpha) \tag{5.26}$$

5.4.1.4. Apprentissage et modélisation en ligne

À chaque nouvelle observation k :

- les paramètres du modèle d'évolution de ESR(t) sont optimisés $\alpha_{esr1}^{opt}_k$, $\alpha_{esr2}^{opt}_k$ et $\alpha_{esr3}^{opt}_k$;
- les paramètres du modèle d'évolution de C(t) sont optimisés $\alpha_{c1}^{opt}_k$ et $\alpha_{c2}^{opt}_k$.

Plus le temps de fonctionnement augmente, plus le nombre d'observations enregistrées augmente. La base d'apprentissage ainsi s'élargit et la modélisation devient de plus en plus précise.

Sur la Figure 5.19, les valeurs de ESR ont été mesurées toutes les 400 h lors d'un vieillissement accéléré. Chaque relevé (à température constante) présente une observation.

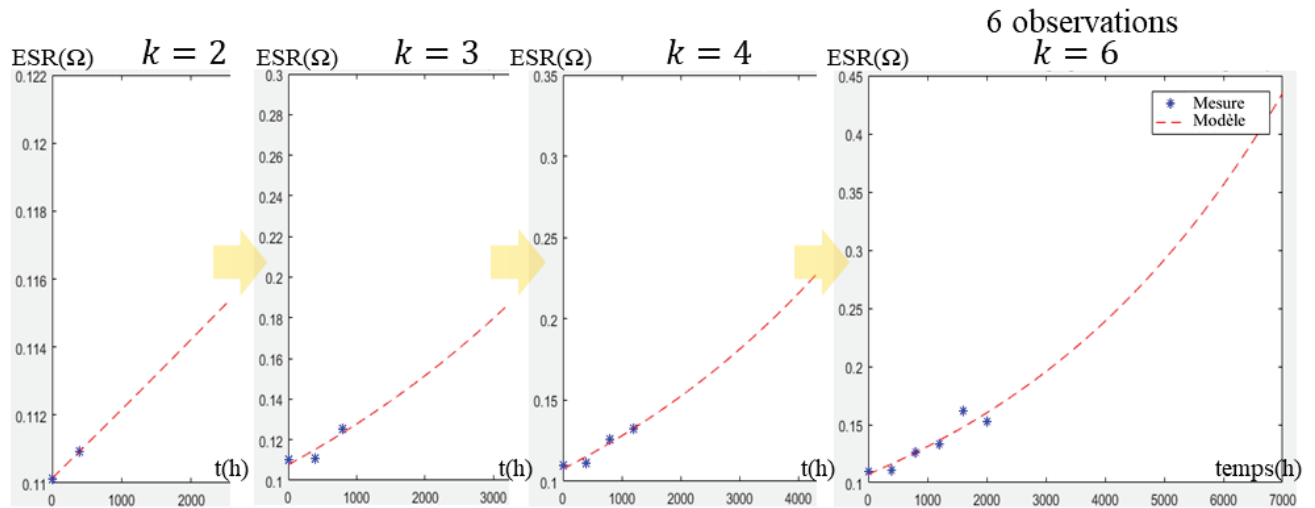


Figure 5.19 Un modèle d'évolution qui s'affine avec l'augmentation du nombre des observations

Nombre d'observations :

$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 6$
---------	---------	---------	---------

Paramètres optimisés :

$\alpha_{esr1}^{opt}_2 = 0\Omega$ $\alpha_{esr2}^{opt}_2 = 0,12\Omega$ $\alpha_{esr3}^{opt}_2 = 1,4e^{-5}h^{-1}$	$\alpha_{esr1}^{opt}_3 = 0,05\Omega$ $\alpha_{esr2}^{opt}_3 = 0,108\Omega$ $\alpha_{esr3}^{opt}_3 = 1,8e^{-4}h^{-1}$	$\alpha_{esr1}^{opt}_4 = 0,04\Omega$ $\alpha_{esr2}^{opt}_4 = 0,108\Omega$ $\alpha_{esr3}^{opt}_4 = 1,75e^{-4}h^{-1}$	$\alpha_{esr1}^{opt}_6 = 0,05\Omega$ $\alpha_{esr2}^{opt}_6 = 0,107\Omega$ $\alpha_{esr3}^{opt}_6 = 1,85e^{-4}h^{-1}$
--	--	---	---

À partir d'un certain nombre d'observations (3 minimum), quand les condensateurs atteignent environ un millier d'heures de vieillissement aux conditions extrêmes, les valeurs des paramètres α_1^{opt} , α_2^{opt} et α_3^{opt} déterminés par l'algorithme d'identification convergent. L'estimation de la RUL est donc satisfaisante et fidèle après un certain temps de fonctionnement des condensateurs. Ce temps nécessaire pour obtenir une base de données suffisante pour le bon fonctionnement de l'algorithme peut être assimilé à une phase d'apprentissage en ligne pour auto-paramétrer le modèle d'évolution de ESR(t) et de C(t). Cette phase d'apprentissage reste largement inférieure à la durée de vie totale des condensateurs (temps d'apprentissage : 1000 h / durée de fin de vie : 5000h donc le temps d'apprentissage est seulement de 20%).

5.4.2. Estimation de la durée de vie restante RUL_0 des condensateurs dans les conditions extrêmes

Une fois que :

- les valeurs initiales ESR_{0i} et C_{0i} sont définies ;
- les modèles d'évolution déterminés (soit les vecteurs paramètres α_{esr} et α_c des modèles optimisés) ;
- les valeurs limites ESR_{0f} et C_{0f} , délimitant la durée de vie utile, repérées ;

Il est possible de déterminer le point d'intersection entre la courbe d'évolution du modèle et la valeur limite des indicateurs de vieillissement, dans les conditions extrêmes de fonctionnement. L'instant d'intersection définit la fin de vie (EOL_0). La durée de vie restante aux conditions extrêmes RUL_0 est la différence entre EOL_0 et l'instant actuel t_0 (Figure 5.20).

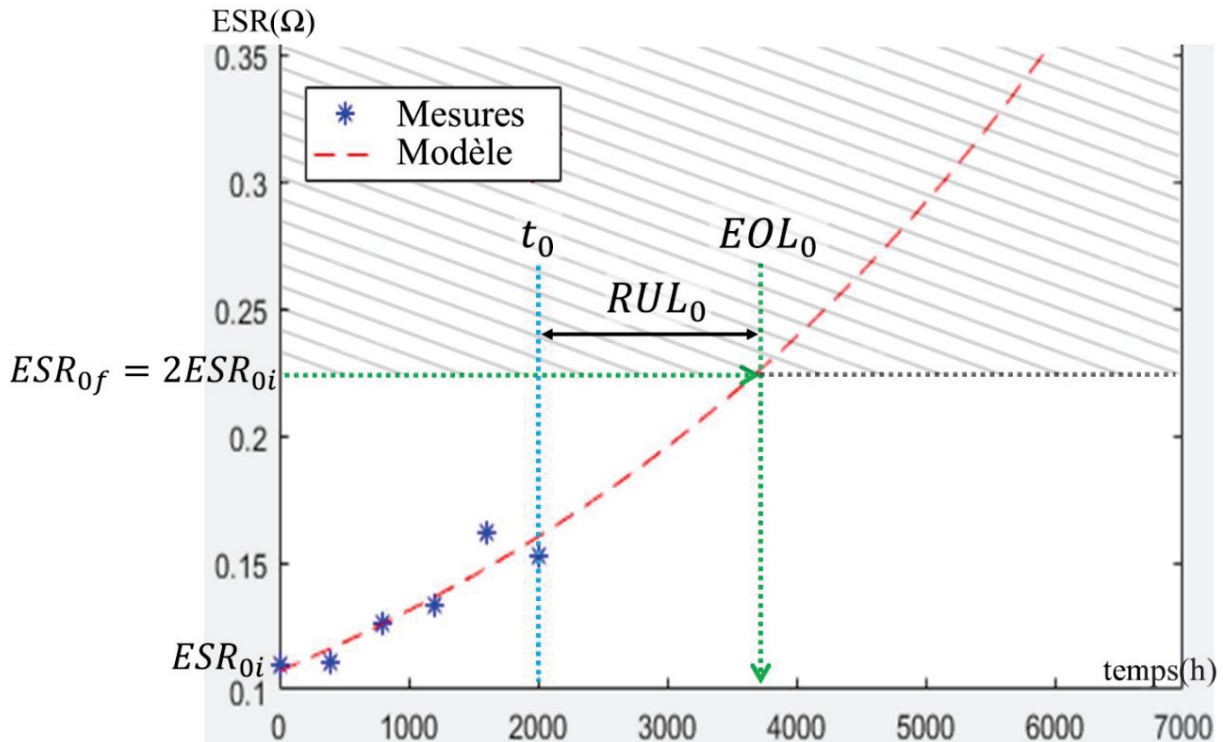


Figure 5.20 Estimation du RUL_0 des condensateurs après avoir construit le modèle d'évolution dans les conditions extrêmes

5.5. Fonctionnement global du système de prédiction

La Figure 5.21 résume le fonctionnement du système de prédiction de la durée de vie des condensateurs dans un variateur de vitesse triphasé. Ce système est divisé en deux parties :

- Une partie in-situ et en ligne (au niveau de l'équipement électrique) qui permet l'estimation des indicateurs de vieillissement ESR et C (dispositif 1 : Diagnostic) et la récupération des conditions d'utilisation à un instant donné t_x . 6 variables sont ensuite envoyées à la deuxième partie du système.
- Une deuxième partie ex-situ et en ligne (cloud ou PC à distance) qui récupère les 6 variables de sortie de la première partie et les traite (dispositif 2 : Pronostic), comme expliquée dans les étapes 4 à 7 (§5.2.2.4 au §5.2.2.6), pour estimer l'état de santé ou la durée de vie restante du module des condensateurs dans l'équipement électrique.

Il faut noter que la seconde partie qui traite les données reçues est une option permettant la mise en place d'une maintenance préventive conditionnelle.

Ce système doit être le plus optimisé possible pour représenter les conditions d'utilisation de manière la plus fidèle possible (ce qui nécessite un nombre d'enregistrement suffisant) sans devenir trop lourd puisque les données sont implémentées dans l'algorithme de vieillissement du dispositif 2 (nombre d'observations limité). Une méthode pour résoudre ce paradoxe est présentée sur la Figure 5.22.

Parmi les conditions d'utilisation, la variation du courant a la dynamique la plus élevée. La dynamique est de l'ordre de la seconde. Pour bien représenter la variation des conditions, il est préférable d'exécuter les mesures toutes les dizaines de secondes. Cette perte d'information n'impacte pas notablement l'évaluation du vieillissement tout en mobilisant moins de ressources de calcul. Ces mesures sont stockées dans un tableau et les facteurs multiplicateurs K_{TI} et K_V sont calculés pour chaque période $t_x = 10s$.

Comme expliqué dans le chapitre 2, les variations de ESR et C durant une journée ou une semaine ne sont pas dues au vieillissement des condensateurs mais aux conditions de mesures (les valeurs de ESR et de C varient suivant la température interne des condensateurs). Ainsi, afin de ne pas saturer le dispositif 2 en données d'entrée redondantes, il est judicieux de moyenniser les valeurs de ESR, C, K_{TI} et K_V sur une période suffisamment grande pour réduire le nombre d'observations à intégrer dans le dispositif 2. Une observation par semaine ou par mois peut être suffisante pour une bonne estimation du vieillissement du module des condensateurs soit entre 12 et 53 observations par an.

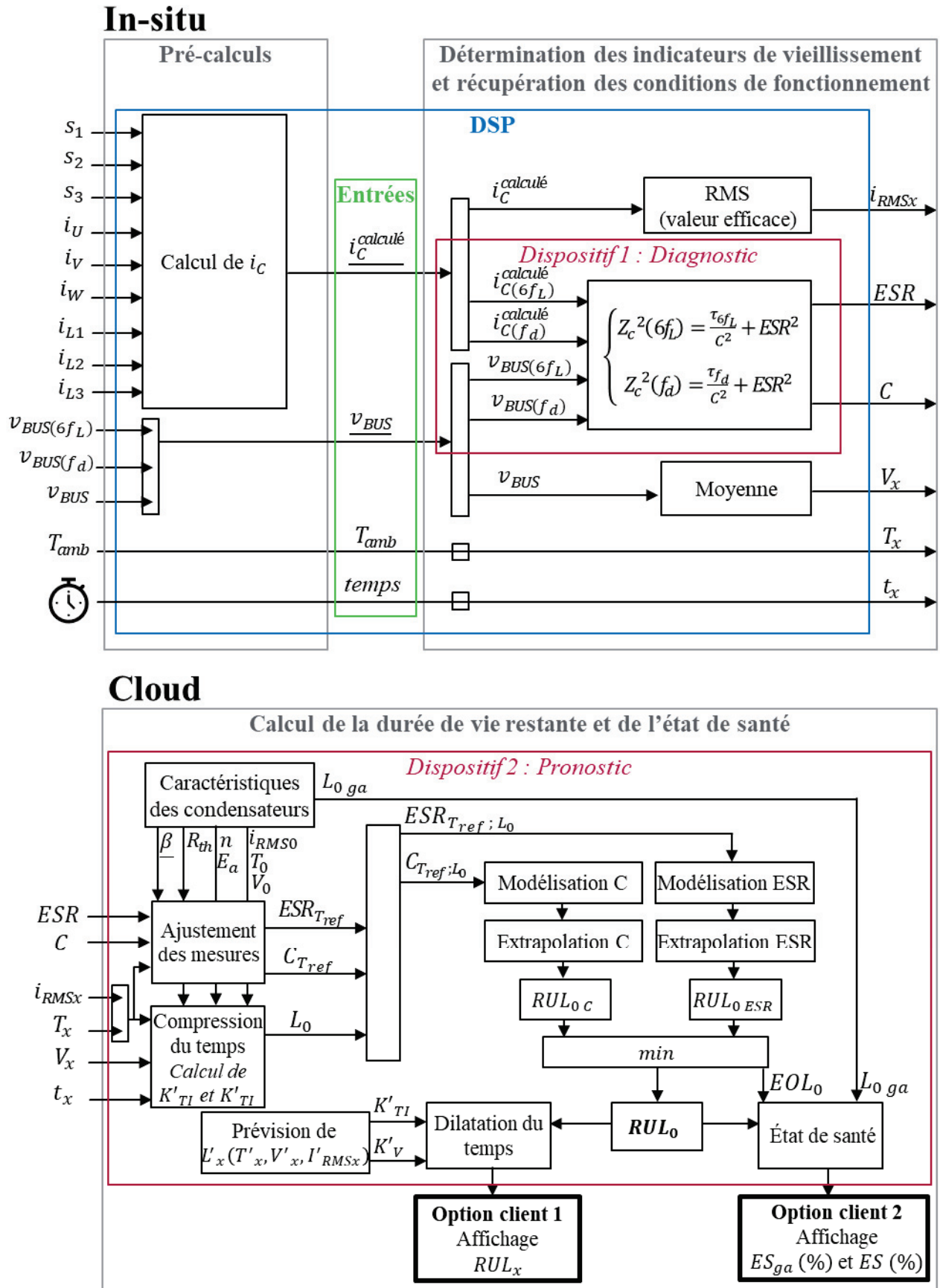


Figure 5.21 Fonctionnement complet du dispositif : de la récupération des mesures de l'équipement à l'estimation de la RUL des condensateurs

Cloud

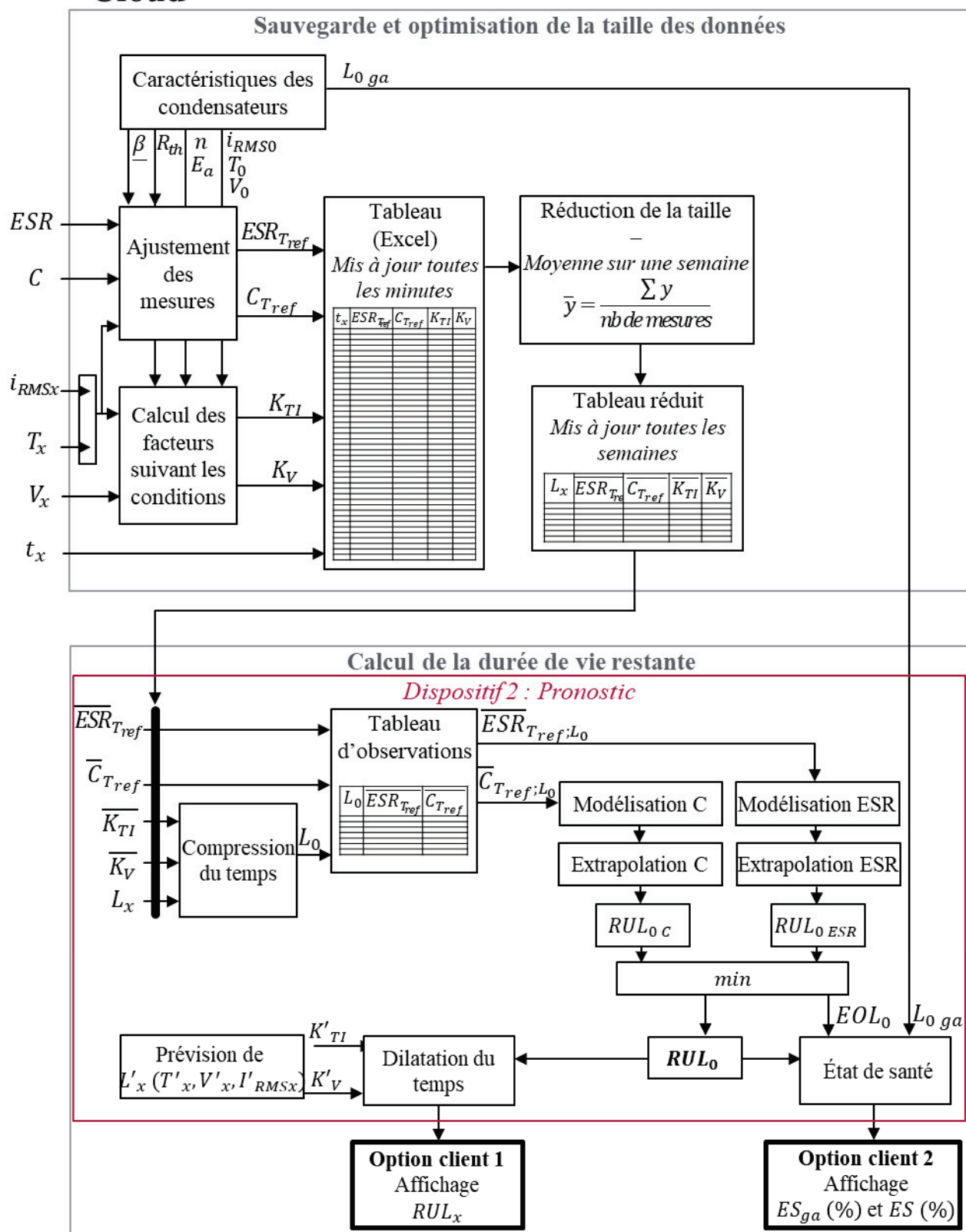


Figure 5.22 Fonctionnement pratique du dispositif d'estimation de la durée de vie des condensateurs

5.6. Simulations et expérimentations

5.6.1. Validation à partir d'un historique de mesures réelles d'utilisation

La journalisation système désigne l'enregistrement chronologique des événements survenant au niveau des composants du système. Le niveau de cette journalisation peut être paramétré, afin de filtrer les différents événements selon leur catégorie de gravité. Les catégories généralement utilisées sont, par ordre croissant de gravité : information, débogage, avertissement, erreur. Schneider Electric proposait ce genre de service pour les clients qui souhaitaient être alertés en cas de dysfonctionnement des équipements ou de perte de performance d'un système. Des journaux (« log files » en anglais) entre 2009 et 2013 ont été mis à notre disposition pour effectuer ces travaux. Néanmoins, ces journaux présentaient beaucoup de discontinuités dans l'enregistrement (arrêt de service coupure de connexions...) et les données enregistrées étaient propres à l'équipement et non au module de condensateurs. Malgré les données incomplètes, il a été possible de tirer des informations utiles concernant l'état de santé des condensateurs en réalisant un filtrage et un moyennage des données sur un grand intervalle (5000h). Les données liées à l'environnement des condensateurs sont :

- la température ambiante à l'intérieur de l'équipement ;
- la tension moyenne du bus DC ;
- la valeur efficace des harmoniques basse fréquence du courant et de la tension du bus DC ;
- la valeur efficace des harmoniques haute fréquence du courant et de la tension du bus DC.

Le Tableau 5.7 ci-dessous résume les données moyennées relevées :

Temps (heures)	θ (°C)	V_{DC} (V)	I_{RMS} Basse fréquence (A)	V_{RMS} Basse fréquence (V)	I_{RMS} Haute fréquence (A)	V_{RMS} Haute fréquence (mV)
0	45	500	2	6,6	0,2	43
5000	55	450	3	10,1	0,3	56
10000	50	500	2	6,8	0,2	45
15000	45	450	3	10,4	0,3	75
20000	55	500	1	3,5	0,1	26
25000	40	470	3	10,6	0,3	93
30000	45	500	4	14,3	0,4	115

Tableau 5.7 Tableau représentant les données utiles des condensateurs dans une application industrielle

À partir de ces données, les valeurs de ESR et C sont calculées et positionnées en bleu sur les graphes de la Figure 5.23. Ces valeurs sont ensuite ajustées à une même température de mesure (ici, la température de référence choisie est $T_{ref} = T_0 = 85^\circ\text{C}$) et sont représentées par les points verts. Notons que la température de référence choisie ici est plus grande que les températures cœurs de fonctionnement

des condensateurs. Aussi, l'ajustement conduit à un accroissement de la valeur de C et une diminution de celle de ESR.

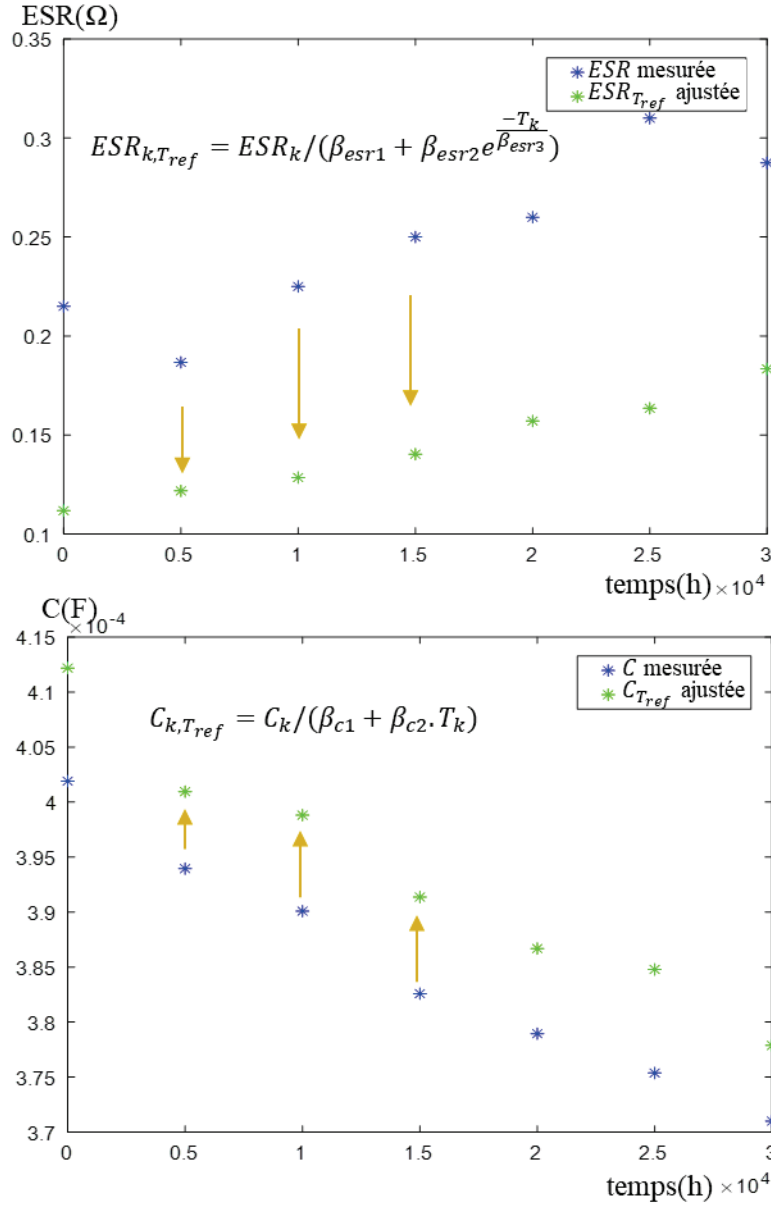


Figure 5.23 Ajustement des conditions de mesures pour ESR et C

Connaissant les conditions de fonctionnement T_{xi} , V_{xi} , I_{RMSxi} pour chaque intervalle de temps L_{xi} , il est possible de compresser le temps pour obtenir le nouveau temps de fonctionnement si les conditions de fonctionnement étaient extrêmes. Cette compression du temps engendre un déplacement horizontal des points verts ($ESR_{T_{ref}}$ et $C_{T_{ref}}$) qui sont translatés jusqu'aux points rouges ($ESR_{T_{ref};L_0}$ et $C_{T_{ref};L_0}$) (Figure 5.24) représentant les valeurs de ESR et C au même référentiel de mesure et aux conditions extrêmes de fonctionnement. Désormais, il est possible de tracer les modèles d'évolution de ESR(t) et de C(t) et de réaliser une extrapolation des modèles.

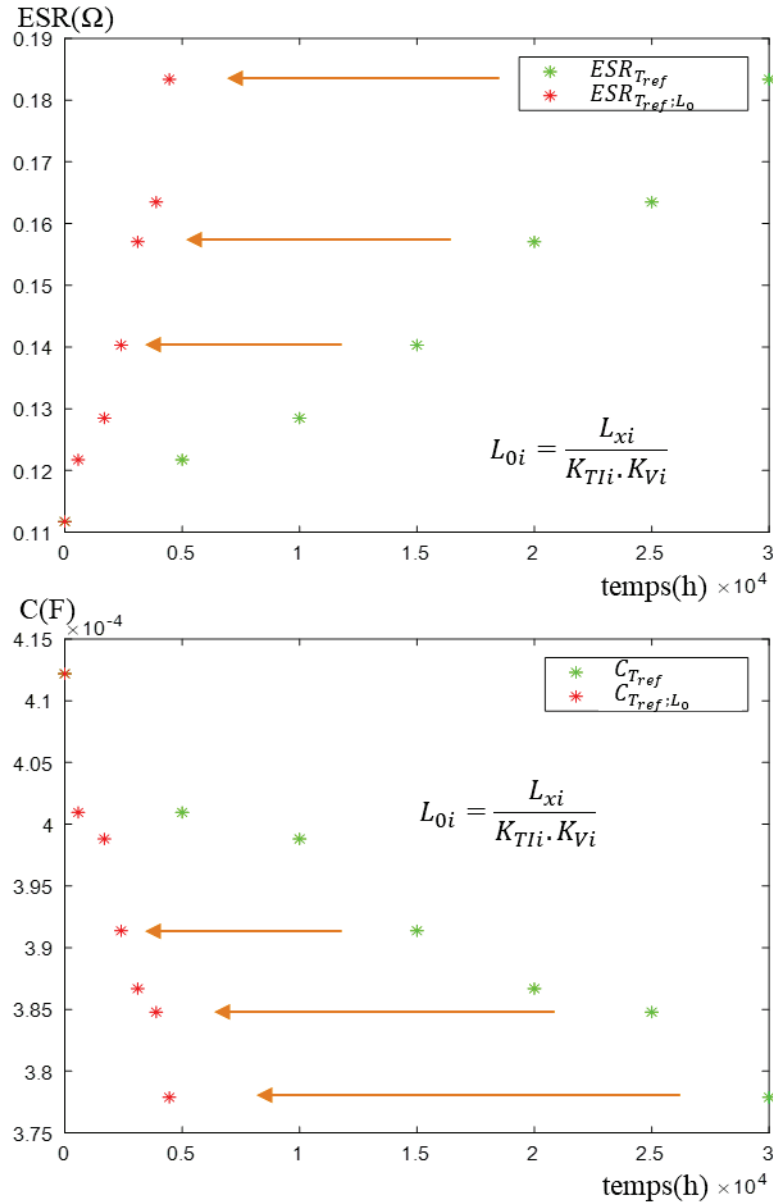


Figure 5.24 Compression du temps suivant les conditions de fonctionnement

Une fois les modèles de ESR(t) et C(t) construits et extrapolés, il est possible de déterminer la durée de vie restante des condensateurs suivant chaque indicateur de vieillissement (Figure 5.26). La durée de vie des condensateurs retenue dans les conditions extrêmes sera la plus petite des deux durées de vie déterminées :

$$RUL_0 = \min(RUL_{ESR}, RUL_C) = \min(2800, 7000) = RUL_{ESR} \cong 2800h \quad (5.27)$$

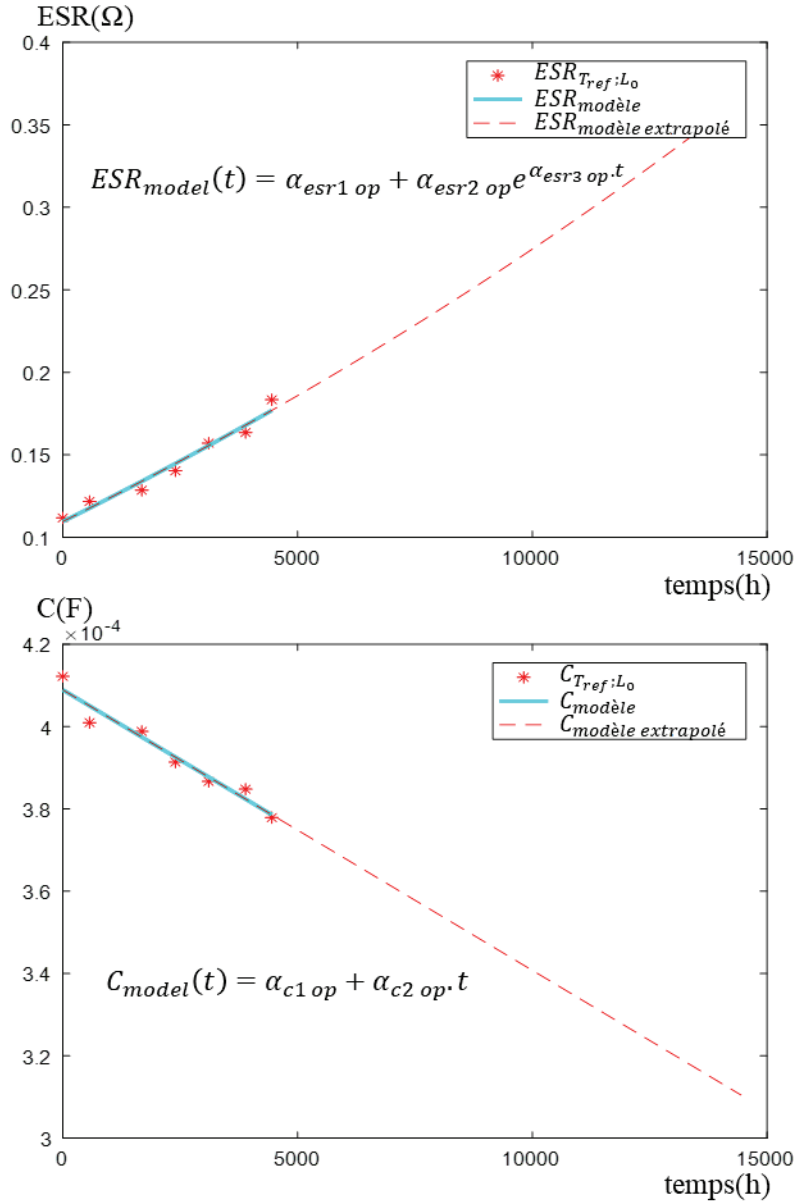


Figure 5.25 Compression du temps suivant les conditions de fonctionnement

- L'état de santé peut être calculé par rapport à la fin de vie des condensateurs (Figure 5.26) $EOL_{0\ ga}(T_0, V_0, I_{RMS0}) = 7400h$:

$$ES(\%) = \frac{RUL_0(T_0, V_0, I_{RMS0})}{EOL_0(T_0, V_0, I_{RMS0})} \cdot 100 = \frac{2800}{7400} \cdot 100 = 38\% \quad (5.28)$$

- L'état de santé garantie peut être aussi calculé par rapport à la durée de vie donné par le fabricant du condensateur $L_{0\ ga}(T_0, V_0, I_{RMS0}) = 5000h$:

$$ES_{ga}(\%) = \frac{RUL_{0\ ga}}{L_{0\ ga}} \cdot 100 = \frac{500}{5000} \cdot 100 = 10\% \quad (5.29)$$

Notons que l'estimateur ES (%) donne une estimation plus réaliste de l'état de santé que celui fourni par le fabricant qui semble pessimiste. Des maintenances trop précoces des condensateurs se basant uniquement sur les « datasheets » des fabricants peuvent ainsi être évitées.

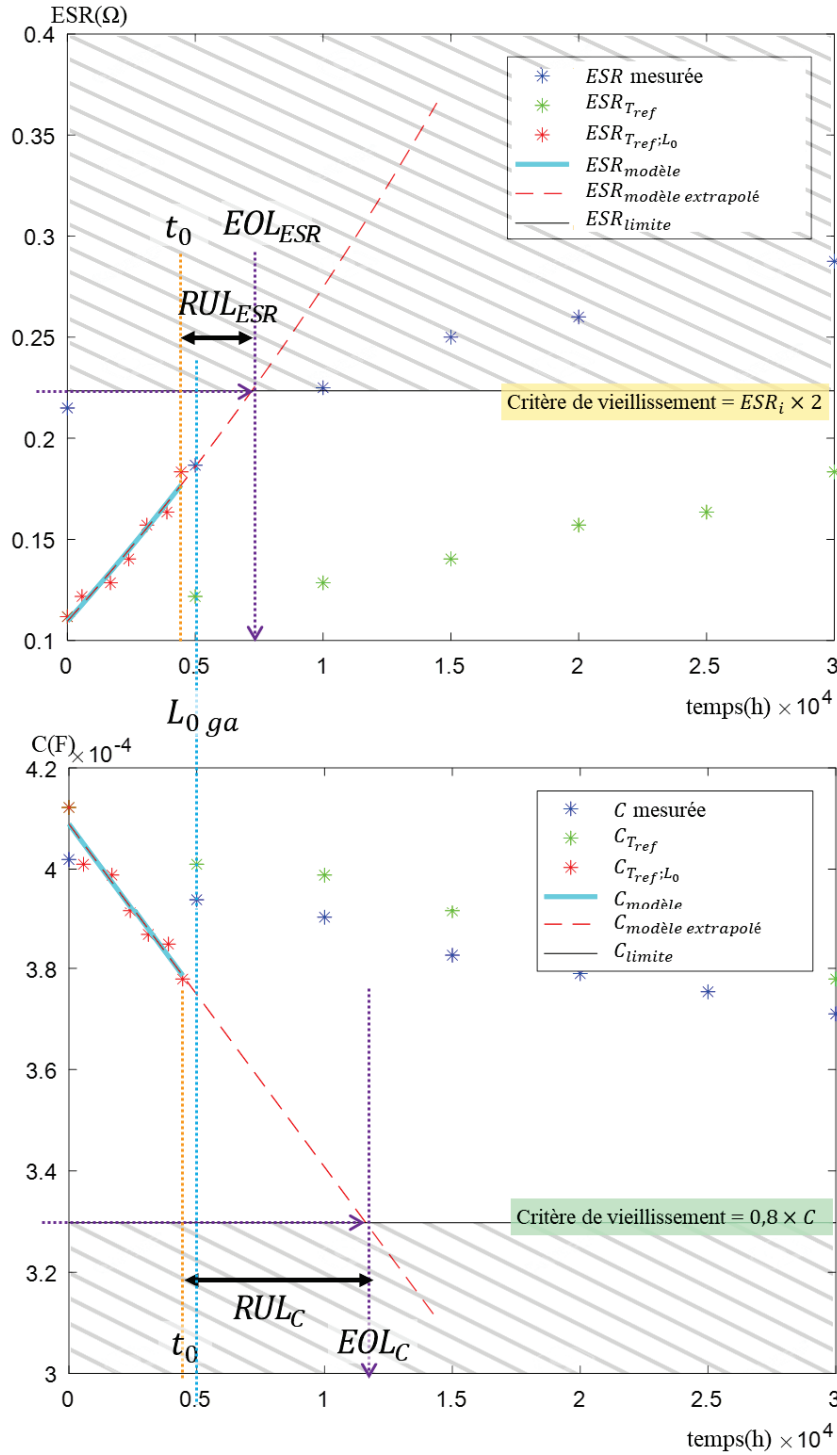


Figure 5.26 Estimation de la durée de vie restante suivant chaque indicateur de vieillissement

Les condensateurs ont été remplacés après une durée totale de fonctionnement $L_{x\ tot} = t_x - 0 = 30\ 000\ h$. Nous avons trouvé grâce à notre système de surveillance que cela était équivalent à un $L_{o\ tot} = 4500\ h$ et que les condensateurs étaient supposés être à 10% de leur état de santé garanti par le fabricant (500 h restant de $L_{0\ ga}$ (T_0, V_0, I_{RMS0}) = 5000h). Notre système a prouvé que l'état de santé de ces condensateurs est de 38% et qu'ils pouvaient encore fonctionner pour 2800 heures supplémentaires dans les conditions extrêmes, soit un gain de :

$$\begin{aligned} \text{Gain} &= \\ &= \frac{\text{durée d'exploitation des condensateurs en suivant notre système de surveillance}}{\text{durée d'exploitation des condensateurs en suivant une maintenance systématique}} \quad (5.30) \end{aligned}$$

$$= \frac{EOL_0(T_0, V_0, I_{RMS0})}{L_{o\ tot}} = \frac{7400\ h}{4500\ h} = 1.6$$

Le gain en durée de service n'est donc pas négligeable. L'utilisateur pourrait réduire ses nombres de maintenances de 30% (Environ, 3 maintenances classiques pourraient être remplacées par 2 si notre système de surveillance est adopté). C'est un gain non seulement financier mais aussi écologique sachant que les condensateurs pourraient servir davantage.

5.6.2. Validation à partir des essais de vieillissement accéléré des condensateurs effectués dans le variateur de vitesse

5.6.2.1. Description de la maquette expérimentale

Le prototype a été présenté dans le chapitre 4. Le variateur alimente une machine asynchrone. Le but est ici de faire vieillir le module des condensateurs de l'Altivar ATV930 en récupérant en permanence les données de ESR , C , T_x , V_x , I_{RMSx} et t_x

Le module des condensateurs à l'intérieur de l'ATV930 est composé de 6 condensateurs reliés comme représentés sur la Figure 5.27.

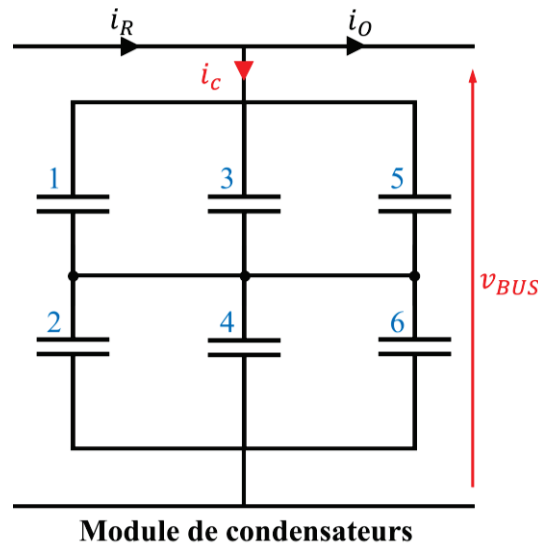


Figure 5.27 Architecture du module des condensateurs dans l'Altivar ATV930

Les condensateurs ont les caractéristiques géométriques et électriques suivantes (Tableau 5.8) :

Caractéristiques	Fabricant D
Forme	Cylindrique
Dimensions	Diamètre : 35 mm Hauteur : 60 mm
Capacité à 20 °C ($\pm 10\%$)	1000 μ F
Plage de température de fonctionnement (θ)	-25 / 105 °C (θ_0)
Tension nominale (V_0)	400 V
Courant efficace permmissible (I_{RMS0} à 120 Hz)	10 A
Max courant de fuite I_L (V_0 , 5min, 20°C)	1.5 mA
Max ESR (120Hz, 20°C)	160m Ω
Max impédance Z (20kHz, 20°C)	140 m Ω
Load Life (θ_0, V_0, I_{RMS0})	5000h $\left(\begin{array}{l} \Delta C \leq \pm 20\% \text{ à } 120\text{Hz} \\ \Delta ESR \leq 200\% \text{ à } 120\text{Hz} \\ I_L \leq \text{max courant fuite spécifié} \end{array} \right)$
Shelf Life (θ_0)	2000h $\left(\begin{array}{l} \Delta C \leq \pm 20\% \text{ à } 120\text{Hz} \\ \Delta ESR \leq 200\% \text{ à } 120\text{Hz} \\ I_L \leq \text{max courant fuite spécifié} \end{array} \right)$
E_a n R_{th}	Le fabricant n'ayant pas fourni ces données, les valeurs sont prises par défaut : $E_a = 0.5\text{eV}$; $n = 3$; $R_{th} = 3^\circ\text{C/W}$

Tableau 5.8 Caractéristiques géométriques et électriques des condensateurs du module

Le condensateur équivalent aura les caractéristiques suivantes (Tableau 5.9) :

Caractéristiques	Module de 6 condensateurs
Capacité à 20 °C ($\pm 10\%$)	(3 éléments en parallèle, 2 en série) 1500 μ F
Plage de température de fonctionnement (θ)	-25 / 105 °C (θ_0)
Tension nominale (V_0)	(400V $\times$ 2) 800 V
Courant efficace permmissible (I_{RMS0} à 120 Hz)	(10A $\times$ 3) 30 A

Tableau 5.9 Caractéristiques électriques équivalent du module de condensateur

La mesure de la valeur de capacité et de l'ESR du module à 20°C a donné :

$$C_{mes\ 20^\circ\text{C}} = 1410\ \mu\text{F} \text{ et } ESR_{mes\ 20^\circ\text{C}} = 42\ \text{m}\Omega$$

La mesure de la valeur de capacité et de l'ESR du module à 30°C a donné :

$$C_{mes\ 30^\circ\text{C}} = 1451\ \mu\text{F} \text{ et } ESR_{mes\ 30^\circ\text{C}} = 37.5\ \text{m}\Omega$$

Pour pouvoir émuler un vieillissement accéléré des condensateurs dans le variateur ATV930 tout en gardant ce dernier fonctionnel, des colliers chauffants ont été mis en place sur chacun des condensateurs et des thermocouples ont été ajoutés pour contrôler la température surfacique des condensateurs (Figure 5.28). Ces colliers permettent d'amener les condensateurs à des températures plus élevées que celles obtenues lors d'un fonctionnement normal de l'ATV930. De cette manière, nous sommes capables de faire vieillir les condensateurs de manière accélérée dans un vrai équipement fonctionnel sans dégrader les autres composants de l'équipement. Notons que nous considérons que le vieillissement est identique pour tous les condensateurs donc qu'ils subissent les mêmes contraintes électriques et thermiques

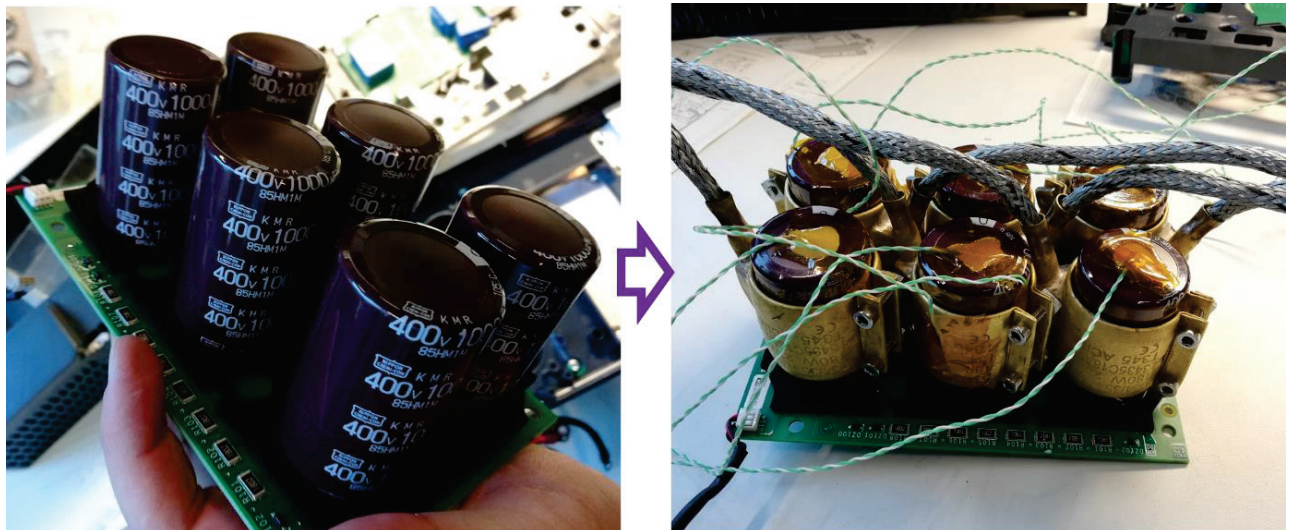


Figure 5.28 Revêtement des condensateurs par des colliers chauffants et ajout de thermocouples

De nouveaux dispositifs ont par ailleurs été ajoutés (Tableau 5.10) :

Constituant	Descriptif et caractéristiques
Un régulateur de température (face avant) et un commutateur (face arrière)	Ils permettent d'asservir la température des 6 colliers grâce à une régulation en tension (Figure 5.29, Figure 5.30).
Deux disjoncteurs	Ils permettent de couper l'alimentation en cas de surchauffe imprévue des condensateurs et en cas de dysfonctionnement de l'Altivar (Figure 5.29).

Tableau 5.10 Nouveaux constituants pour effectuer le vieillissement accéléré du module de condensateurs

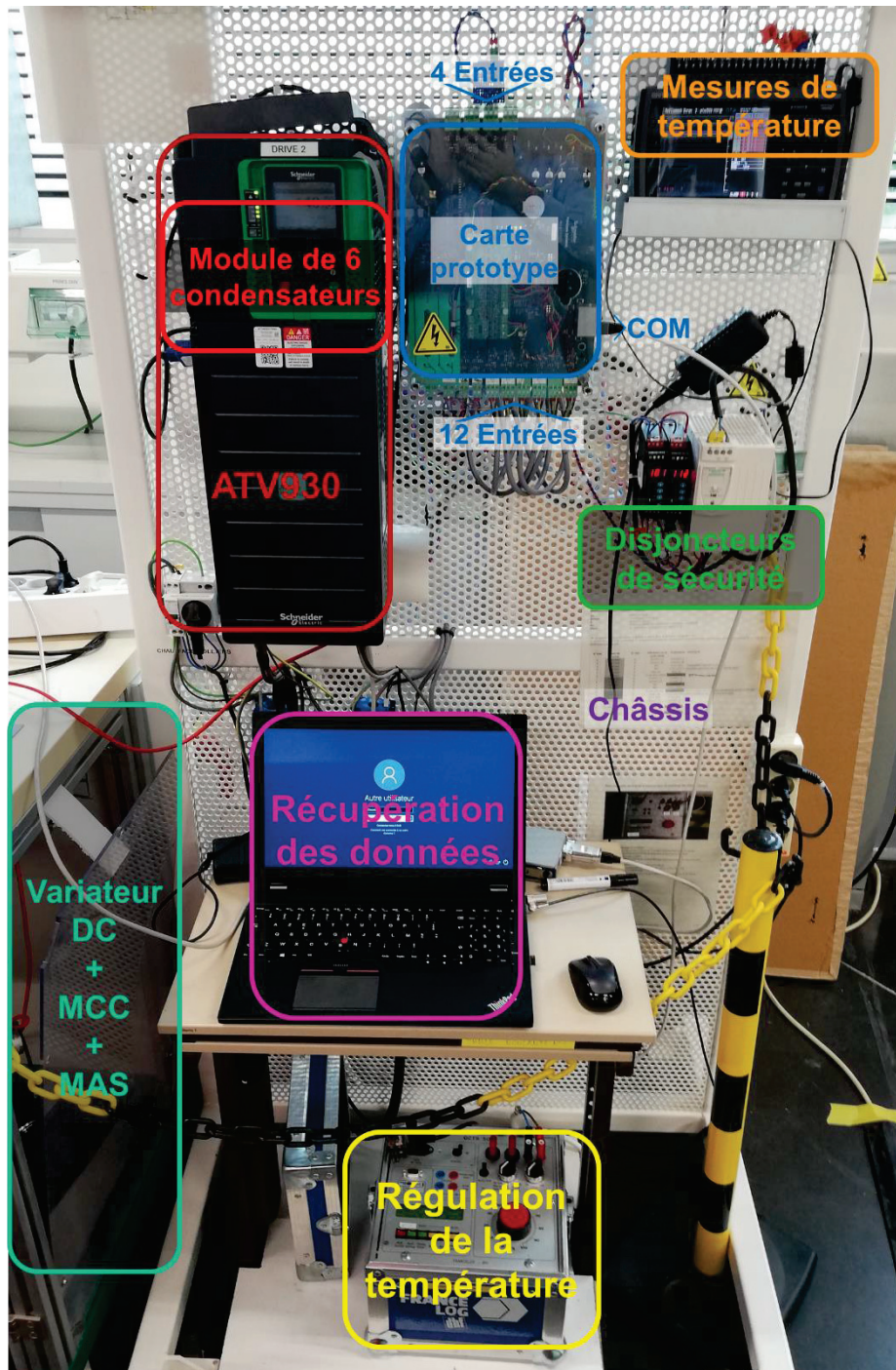


Figure 5.29 Face avant du banc de vieillissement

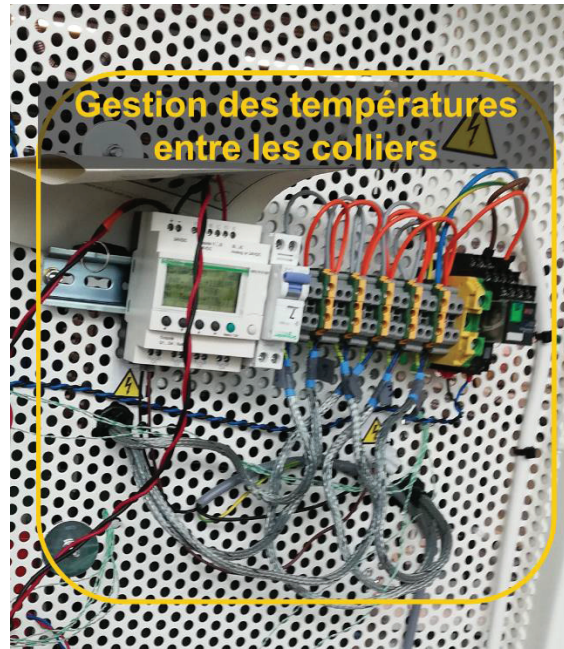


Figure 5.30 Face arrière du banc de vieillissement

5.6.2.2. Présentation de l'essai de vieillissement et des conditions de mesure

Le vieillissement a été effectué pendant 1915 h. Durant cette période de fonctionnement, les conditions de vieillissement et de mesure ont été changées 2 fois. Nous expliquerons ci-dessous pour quelles raisons celles-ci peuvent être différentes. Les trois phases de fonctionnement et de mesure sont résumées dans le Tableau 5.11 :

Durée de la phase	Conditions de vieillissement	Conditions de mesure	Constituants en jeu
L_{x1} = 1265h	$(\theta_{x1}, V_{x1}, I_{RMSx1})$ = (95°C, 550V, 0A)	$(\theta_{x1}^{mes}, V_{x1}^{mes}, I_{RMSx1}^{mes})$ = (50°C, 550V, 30A)	• Les colliers actifs • L'ATV930 actif • Pas de charge
L_{x2} = 386h	$(\theta_{x2}, V_{x2}, I_{RMSx2})$ = (95°C, 550V, 30A)	$(\theta_{x2}^{mes}, V_{x2}^{mes}, I_{RMSx2}^{mes})$ = (70°C, 550V, 30A)	• Les colliers actifs • L'ATV930 actif • Charge active
L_{x3} = 264h	$(\theta_{x3}, V_{x3}, I_{RMSx3})$ = (105°C, 800V, 0A)	$(\theta_{x3}^{mes}, V_{x3}^{mes}, I_{RMSx3}^{mes})$ = (105°C, 800V, 30A)	• Les colliers actifs • L'ATV930 actif • Charge en mode freinage

Tableau 5.11 Trois conditions de vieillissement du module et trois conditions de mesure de ESR et C

La première phase représente un vieillissement en floating des condensateurs où seules la température et la tension affectent le vieillissement des composants. La deuxième phase de

vieillissement est effectuée avec le variateur chargé par un moteur asynchrone. Il permet ainsi de contraindre les condensateurs avec un courant. Durant ces deux premières phases, la tension aux bornes du module de condensateurs est inférieure à la tension nominale. L'Altivar ATV930 possède la fonction de freinage récupératif (réinjection de puissance au réseau). Durant la troisième phase de vieillissement, afin d'atteindre la tension nominale des condensateurs, l'option de freinage récupératif a été utilisée. Le démarrage et le freinage d'une machine asynchrone ont été automatisés de manière à garder la tension du bus DC à 800V correspondant à la tension nominale du module des condensateurs.

Durant chaque phase de vieillissement, plusieurs mesures ont été réalisées. Pour effectuer les mesures de ESR et de C, il est nécessaire d'alimenter l'Altivar (pour mettre les condensateurs sous tension) et il faut brancher la charge (pour avoir du courant qui circule dans les condensateurs). Durant la première phase, les conditions de mesures sont différentes des conditions de vieillissement (charge non alimentée). En effet, en raccordant la charge lors de la période de mesure, les ventilateurs de l'ATV930 se déclenchent automatiquement faisant décroître la température ambiante des condensateurs de 45°C. Lors de la deuxième phase, un capot a été inséré sur le module pour limiter le refroidissement par convection des condensateurs, ce qui a réduit l'écart entre la température lors du vieillissement et celle durant la mesure. Durant la troisième phase, nous avons pu désactiver le système de ventilation ce qui a permis une température de vieillissement et de mesures identiques. Le Tableau 5.12 présente les différentes mesures de ESR et de C réalisées à différents temps de vieillissement. Les mesures ont été ajustées à $ESR_{T_{ref}}$ et $C_{T_{ref}}$ grâce à la connaissance des conditions de mesure et grâce à l'identification des paramètres $\beta_{esr1}, \dots, \beta_{c1}$ des équations (2.36) et (2.37) :

Choix : $\theta_{ref} = 30^\circ C$

Identification :

$$\beta_{esr1} = 0.65$$

$$\beta_{esr2} = 0.665$$

$$\beta_{esr3} = 47^\circ C$$

$$\beta_{c1} = 0,950$$

$$\beta_{c2} = 0,00167 / ^\circ C$$

Durée	Temps total	Mesures		Ajustement	
dL_x (h)	ΣdL_x (h)	ESR (m Ω)	C (μ F)	$ESR_{T_{ref}}$ (m Ω)	$C_{T_{ref}}$ (μ F)
0	0	37,5	1451	36,4	1451
110	110	32,0	1499	38,1	1453
31	141	33,5	1501	37,5	1449
18	159	33,0	1497	35,2	1445
116	275	31,0	1493	34,1	1450
22	297	30,0	1498	35,2	1453
145	442	31,0	1501	36,4	1454
164	606	32,0	1502	37,0	1448
163	769	32,5	1496	38,7	1452
165	934	34,0	1500	36,4	1447
164	1098	32,0	1495	35,2	1454
46	1144	31,0	1502	34,1	1450
121	1265	30,0	1498	36,8	1454
24	1289	32,4	1502	36,3	1435
21	1310	29,0	1531	37,5	1437
23	1333	30,0	1533	36,3	1434
25	1358	29,0	1530	37,5	1430
68	1426	30,0	1525	38,1	1434
15	1441	30,5	1530	38,8	1444
18	1459	31,0	1540	38,8	1448
26	1485	31,0	1545	37,5	1439
166	1651	30,0	1535	39,4	1441
93	1744	31,5	1537	38,8	1440
72	1816	28,0	1620	37,4	1444
99	1915	27,0	1625	39,2	1431

Tableau 5.12 Mesure de ESR et de C équivalent puis ajustement au même référentiel d'environnement de mesure

La Figure 5.31 représente les valeurs issues des mesures de l'ESR et de C et celles de $ESR_{T_{ref}}$ et $C_{T_{ref}}$ après ajustement. Notons que la température de référence choisie est ici de 30°C (contrairement à l'exemple du §5.6.1 où la température de référence choisie était égale à θ_0). ESR est donc supérieure et C inférieure à leurs valeurs mesurées. T_{ref} (ou θ_{ref}) a été changé pour montrer que le choix de ce dernier n'affecte pas le bon fonctionnement de l'algorithme.

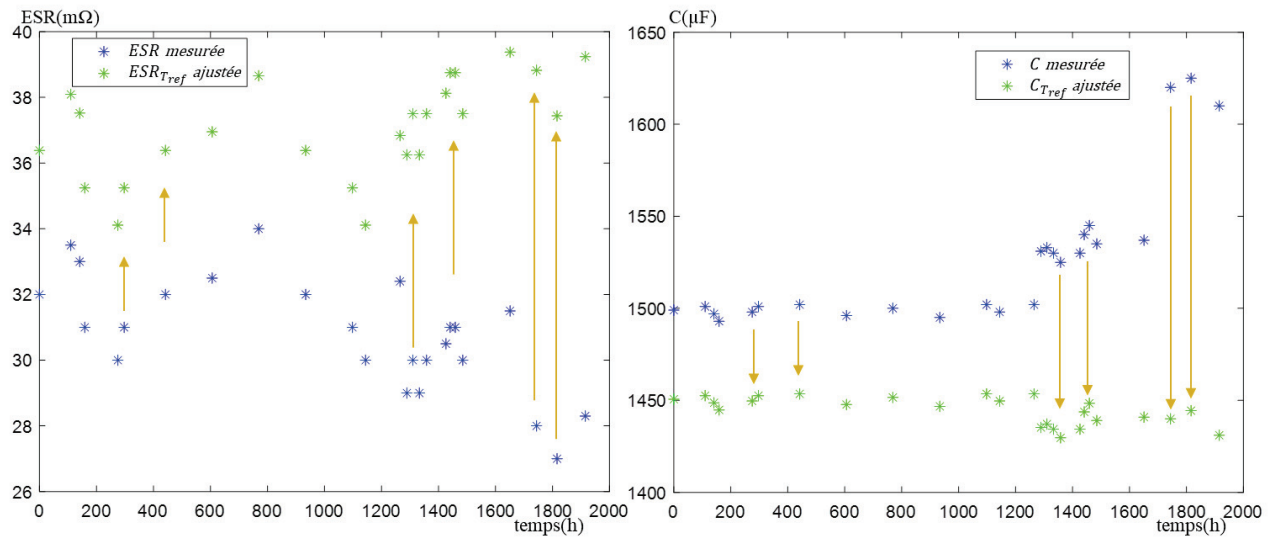


Figure 5.31 Ajustement des conditions de mesures de ESR et C

Une fois les mesures ajustées selon la température de référence choisie, la compression du temps se fait en transformant les conditions réelles de vieillissement (θ_x, V_x, I_{RMSx}) aux conditions extrêmes supportées par les condensateurs (θ_0, V_0, I_{RMS0}). Notons que les températures en °C doivent être transformées en K pour le calcul de K_{TI} . Le Tableau 5.13 résume les valeurs des facteurs multiplicateurs/diviseurs ainsi que la nouvelle échelle de temps compressé.

Durée actuelle	Temps total actuel	Facteurs multiplicateurs /diviseurs		Durée compressée	Temps total compressé
dL_x (h)	ΣdL_x (h)	K_{TI}	K_V	dL_0 (h)	ΣdL_0 (h)
0	0	1,52	3,08	0	0
110	110	1,52	3,08	23,5	23
31	141	1,52	3,08	6,64	30
18	159	1,52	3,08	3,85	34
116	275	1,52	3,08	24,8	59
22	297	1,52	3,08	4,71	64
145	442	1,52	3,08	31	95
164	606	1,52	3,08	35,1	130
163	769	1,52	3,08	34,9	165
165	934	1,52	3,08	35,3	200
164	1098	1,52	3,08	35,1	235
46	1144	1,52	3,08	9,85	245
121	1265	1,52	3,08	25,9	271
24	1289	1	3,08	7,80	279
21	1310	1	3,08	6,82	285
23	1333	1	3,08	7,47	293
25	1358	1	3,08	8,12	301
68	1426	1	3,08	22,1	323
15	1441	1	3,08	4,87	328
18	1459	1	3,08	5,85	334
26	1485	1	3,08	8,45	342
166	1651	1	3,08	54	396
93	1744	1	1	93	489
72	1816	1	1	72	561
99	1915	1	1	99	660

Tableau 5.13 Compression du temps selon les conditions de vieillissement

La Figure 5.32 représente cette compression de temps correspondant au déplacement horizontal vers la gauche des points verts aux points rouges.

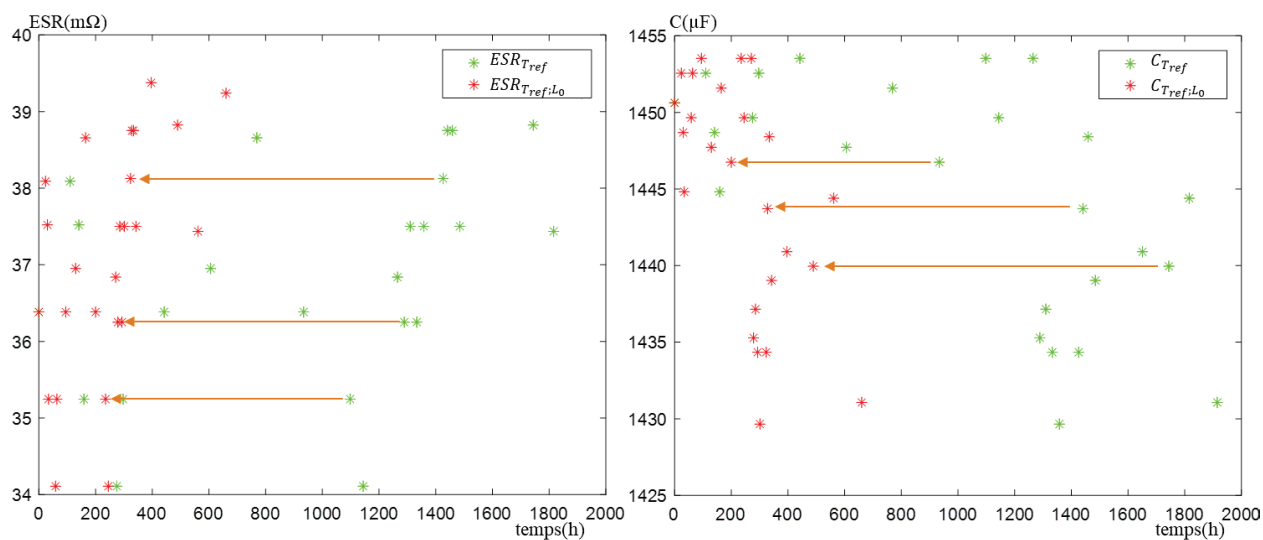


Figure 5.32 Compression du temps suivant les conditions de fonctionnement

À ce stade, il est possible de lancer notre algorithme d'optimisation Levenberg-Marquardt pour trouver les paramètres optimaux $\alpha_{\text{esr1 opt}} \dots \alpha_{\text{c2 opt}}$ des modèles d'évolution des indicateurs de vieillissement aux conditions extrêmes.

Ceux-ci ont pour valeurs :

$$\alpha_{\text{esr1 opt}} = 13.79 \text{ m}\Omega$$

$$\alpha_{\text{esr2 opt}} = 22.14 \text{ m}\Omega$$

$$\alpha_{\text{esr3 opt}} = 2.02 \text{ e} - 4 \text{ h}^{-1}$$

$$\alpha_{\text{c1 opt}} = 1451 \text{ }\mu\text{F}$$

$$\alpha_{\text{c2 opt}} = -0,0271 \text{ }\mu\text{F/h}$$

La Figure 5.33 montre le modèle (en turquoise) construit par rapport à chacun des indicateurs.

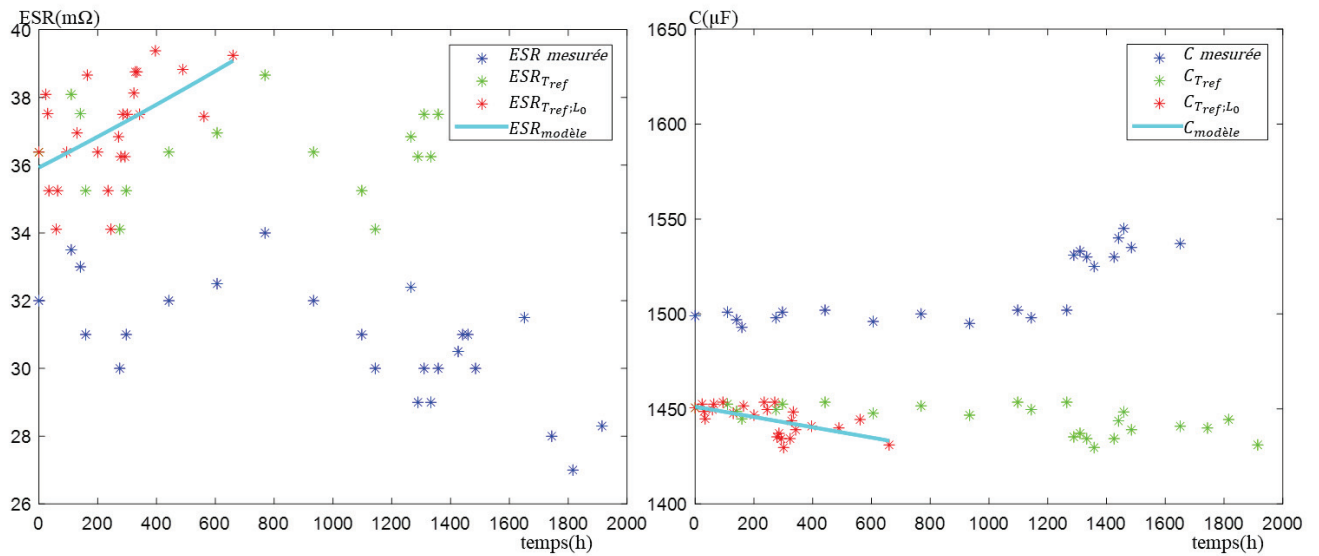


Figure 5.33 Construction du modèle de vieillissement pour chaque indicateur

Le modèle est ensuite extrapolé et la courbe qui coupe la limite de durée de vie exigée le plus rapidement définit la durée de vie restante du module de condensateurs (Figure 5.34).

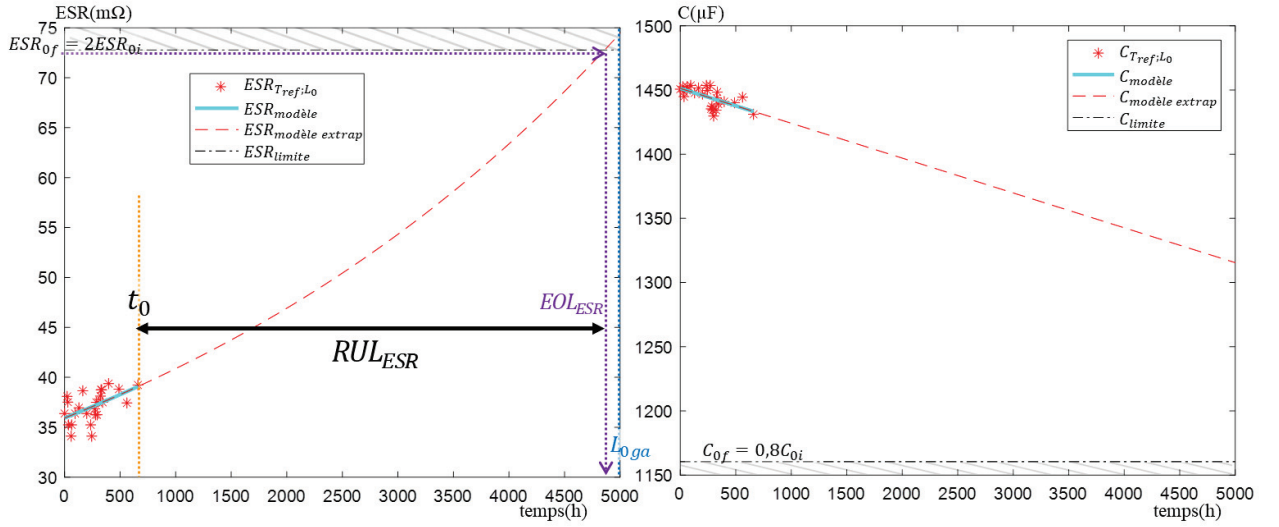


Figure 5.34 Extrapolation des modèles et estimation de la durée de vie restante

La durée de vie restante aux conditions extrêmes est :

$$RUL_0 = RUL_{ESR} = 4200h \quad (5.31)$$

Pour estimer la durée de vie dans les conditions futures prévues, il faut calculer les facteurs K_{TI} et K_V correspondants et les multiplier par RUL_0 . Si le client estime, par exemple, que les conditions futures sont $(\theta_x, V_x, I_{RMSx}) = (50^\circ C, 550V, 30A)$, la valeur de RUL_x sera :

$$RUL_x = RUL_0 \cdot K_{TI} \cdot K_V = 4200h \times 5.8 \times 3.08 = 75000h = 8 \text{ ans } 6 \text{ mois} \quad (5.32)$$

Les résultats de simulations et du dispositif expérimental confirment le bon fonctionnement du système de diagnostic et de pronostic. Notre système de surveillance est capable d'estimer, en ligne, la durée de vie restante des condensateurs et leur état de santé.

Conclusion

Les condensateurs électrolytiques font partie des composants dont la durée de vie influence le plus la fiabilité des systèmes électriques. Nous assistons aujourd'hui au développement des technologies permettant d'améliorer la sûreté de fonctionnement et notamment la maintenabilité des convertisseurs statiques d'énergie intégrant des condensateurs électrolytiques.

C'est dans ce cadre que nous avons effectué ces travaux dont l'objectif est de proposer un système de surveillance de l'état de santé et de prédiction de la durée de vie des condensateurs électrolytiques à l'aluminium utilisés dans les convertisseurs. Ce système permet d'assurer la continuité de fonctionnement en proposant une maintenance préventive conditionnelle (maintenance prédictive). Pour respecter les contraintes techniques et économiques de nature industrielle, il doit fonctionner en temps réel en se limitant aux capteurs existants déjà dans le convertisseur considéré.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le contexte général de notre travail en précisant les exigences de fiabilité dans le passé, le présent et les tendances futures. Puis nous avons expliqué le principe, la modélisation et les caractéristiques des condensateurs électrolytiques à l'aluminium. Les utilisateurs des systèmes à base d'électronique de puissance souhaitent savoir à quel moment leur produit risque de tomber en panne. Ceci leur permet de programmer les phases de maintenance et de prévoir les remplacements des composants défectueux. Dans ce sens, nous avons fait un état de l'art sur les systèmes de maintenance préventive conditionnelle (maintenance prédictive) existants des condensateurs électrolytiques en soulignant leurs principaux inconvénients. Enfin, à partir de ces études menées, nous avons présenté le cahier des charges du système temps-réel de surveillance et de prédiction de durée de vie des condensateurs électrolytiques.

Le mémoire de thèse a été divisé en deux grandes parties.

La première partie, composée des chapitres 2 et 3, détaille les différents essais permettant la caractérisation et le vieillissement des condensateurs électrolytiques. D'une part, la caractérisation des condensateurs en fonction de la température a permis d'établir les lois d'évolution en fonction de la température des indicateurs de vieillissement ESR et C. D'autre part, les essais de vieillissement accéléré pour trois températures différentes, trois tensions différentes et deux courants différents ont permis de déterminer les lois d'évolution des indicateurs de vieillissement en fonction du temps, d'évaluer les énergies d'activation ainsi que la fonction d'accélération en tension relatifs à chaque indicateur de vieillissement pour les composants étudiés.

La deuxième partie, composée des chapitres 4 et 5, expose la démarche à suivre pour obtenir un système de prédiction temps-réel de la durée de vie des condensateurs électrolytiques dans un convertisseur d'énergie. Pour atteindre ce but, nous avons commencé par expliquer l'architecture du convertisseur étudié, l'Altivar ATV930. Nous avons détaillé ensuite la méthode permettant de déterminer les indicateurs de vieillissement ESR et C. Le courant traversant les condensateurs a été calculé grâce aux autres capteurs déjà présents dans l'équipement. Nous avons analysé les différents résultats de simulation d'identification de ESR et C par deux méthodes sous Matlab@Mathworks. Ensuite, nous avons développé un dispositif expérimental permettant d'estimer la durée de vie restante des condensateurs. Puis, nous avons détaillé la conception des différentes cartes électroniques en précisant leurs interactions, expliqué la programmation de la carte à base de DSP et décrit l'algorithme de vieillissement des condensateurs implémenté sur un PC qui s'appuie sur les lois d'évolution des paramètres. Ce programme récupère les données fournis par le DSP, calcule les paramètres d'entrée

nécessaires au système de prédiction en temps réel et évalue la durée de vie restante des condensateurs. Cette évaluation s'améliore au fur et à mesure du fonctionnement du convertisseur. Le calcul des indicateurs de vieillissement et l'estimation de durée de vie des condensateurs n'impactent pas le fonctionnement du convertisseur. Nous avons démontré l'efficacité du système de maintenance et de prédiction proposé d'une part en utilisant les données relatives aux condensateurs récupérées des produits « alimentation sans interruption » installés chez les clients de Schneider Electric et d'autre part en exploitant les données de vieillissement du prototype mis en place. Nous avons détaillé les résultats expérimentaux en mettant l'accent sur les contraintes rencontrées. À la fin de cette thèse, nous pouvons conclure que la simulation et les résultats expérimentaux de la méthode proposée pour les condensateurs électrolytiques donnent des résultats encourageants qui ont fait l'objet de plusieurs publications, à savoir un brevet international [131], un congrès international [132] (et deux revues internationales prévues).

L'étude et la compréhension de la fiabilité des composants qui constituent le convertisseur a montré l'intérêt d'une maintenance préventive conditionnelle qui permet d'augmenter la disponibilité du système. Il serait nécessaire de mener ce type d'étude sur l'ensemble des composants contribuant aux défaillances des convertisseurs tels que par exemple les modules de puissance. Si la maintenance préventive conditionnelle émerge aujourd'hui, c'est qu'il est possible via le suivi des signaux électriques et thermiques de remonter, avec des ressources numériques adéquates, aux indicateurs de vieillissement (comme ESR et C) annonciateurs d'une défaillance ou une panne à venir. La baisse des coûts de l'Internet des objets « IoT », du « Cloud » et du « Big Data Analytics » rend accessible cette nouvelle approche avec un retour d'investissement court, souvent de quelques années. Avec l'IoT, est apparu de nouveaux types de capteurs sans fil et sans alimentation, très simple à installer. Chaque signal et chaque événement survenu au cours de fonctionnement peut être analysé par l'« Analytics », cerveau du système opérant sur un ensemble de méga-données [133], [134]. Ce cerveau détecte les dérives de fonctionnement. Il est capable par apprentissage de détecter en amont une panne à venir et possiblement de faire une rétroaction de contrôle de l'équipement. Avec des méthodes de « Machine Learning », le système apprend les vieillissements ou défaillances déjà survenus et peut repérer au fil du temps de nouveaux modes de défaillance grâce au Cloud qui peut regrouper les données d'un ensemble de parcs de convertisseurs. Le grand nombre de données récupérées sur plusieurs convertisseurs, peut permettre aussi de calculer les paramètres d'entrée potentiellement non donnés par le constructeur, comme par exemple l'énergie d'activation E_a , l'exposant n , à l'aide de la méthode décrite au chapitre 3 du mémoire.

La maintenance préventive conditionnelle améliore la disponibilité des installations. Les investissements liés à la maintenance préventive conditionnelle ont représenté mondialement 9 milliards de dollars en 2016 [135]. Avec un taux de croissance annuelle de 22%, elle se repend très vite dans l'industrie.

ANNEXES

Annexe A : Les sous-ensembles du banc et leurs constituants

Le banc expérimental utilisé dans le prototypage possède deux sous-ensembles différents : mécanique et électrique.

Le sous-ensemble électrique comporte :

Constituant	Descriptif et caractéristiques
L'Altivar ATV930	L'ATV930 représente le produit sous essai. Il est instrumenté par des capteurs permettant de valider notre méthode d'identification de ESR et C et le bon fonctionnement de l'algorithme d'estimation de la durée de vie restante (Chapitre 5) lors du fonctionnement normal du convertisseur. Le variateur contrôle la vitesse de la MAS en boucle ouverte lors des essais. Sa console permet de faire le réglage nécessaire et d'attribuer les valeurs nominales des paramètres de la MAS ainsi que d'afficher les différentes grandeurs électriques d'entrée et de sortie du variateur.
La machine asynchrone (MAS)	C'est une machine (réf. : LSMV160LUR-T) couplée en étoile et adaptée au calibre de l'ATV930. Sa plaque signalétique indique : • Puissance nominale : 15kW • Tension et fréquence nominales du réseau : 400V, 50Hz • Intensité nominale : 27.4A • Facteur de puissance nominal : 0.86 • Vitesse de rotation nominale : 1466tr/min
Le variateur DC	C'est un convertisseur 4 quadrants à refroidissement à air (réf. : MP 75A4R), il est commandé en couple par une source de tension extérieure. Il permet à la MCC de produire un couple résistant qui correspond à la consigne de tension fournie. Sa plaque signalétique est : Côté réseau : • Puissance nominale : 27kW • Nombre de phase d'alimentation : 3 • Tension et fréquence d'alimentation : 24V (-20%) à 480V (+10%), 48 à 65Hz • Intensité nominale réseau : 67A • Côté entraînement : • Intensité de sortie permanente : 75A • Intensité d'excitation : 8A
La machine à courant continu (MCC)	La MCC (réf. : LSK 1324 S05) est à excitation indépendante. Celle-ci est fournie par le variateur DC. Les principales caractéristiques de cette machine sont : • Puissance nominale : 18kW • Tension nominale d'induit : 440V • Intensité nominale d'induit : 49A • Tension nominale d'inducteur : 180/360V • Intensité nominale d'inducteur : 3.6/1.8A • Vitesse de rotation nominale : 1510tr/min

Tableau 0.1 Constituants de l'ensemble électrique

Le sous-ensemble mécanique, est constitué de :

Constituant	Descriptif et caractéristiques
Le bâti	Il sert comme support mécanique pour les machines MAS et MCC. Il est équipé de 4 roues et un ventilateur pour évacuer la chaleur générée par les machines lors des tests.
Le châssis	Il est utilisé comme un support pour tenir l'Altivar ATV930.
L'accouplement mécanique	Il permet d'aligner l'axe de rotation de l'ensemble tournant. Il a pour objectif aussi de coupler mécaniquement la MAS à la MCC tout en s'adaptant aux différences de diamètre des arbres. Il permet le montage / démontage de la MAS et de la MCC.

Tableau 0.2 Constituants de l'ensemble mécanique

L'Altivar ATV930 est équipé d'une carte électronique avec un microcontrôleur numérique qui reçoit les mesures des capteurs, contrôle les IGBT, asservie la MAS, surveille la température du convertisseur et coupe l'alimentation en cas de défaut électrique ou thermique, etc. Toutefois, nous n'avons pas voulu utiliser cette carte électronique pour récupérer et analyser les mesures des capteurs. En effet, la carte numérique embarquée présente plusieurs fonctions qui pourraient être altérées en cas de modification inappropriée. C'est pourquoi, nous avons créé notre propre carte d'interface, d'acquisition, de calcul et de communication. Pour récupérer les grandeurs mesurées, les capteurs déjà présents ont été dupliqués, sans modifier l'architecture du variateur. L'insertion des capteurs a été faite de la manière suivante :

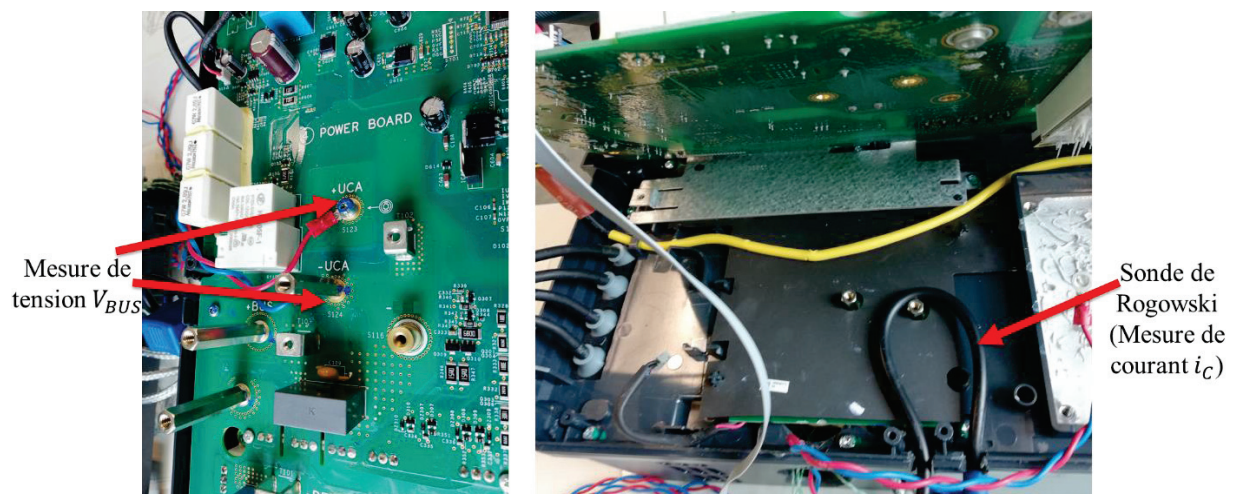


Figure 0.1 Photos d'insertion de quelques capteurs ajoutés

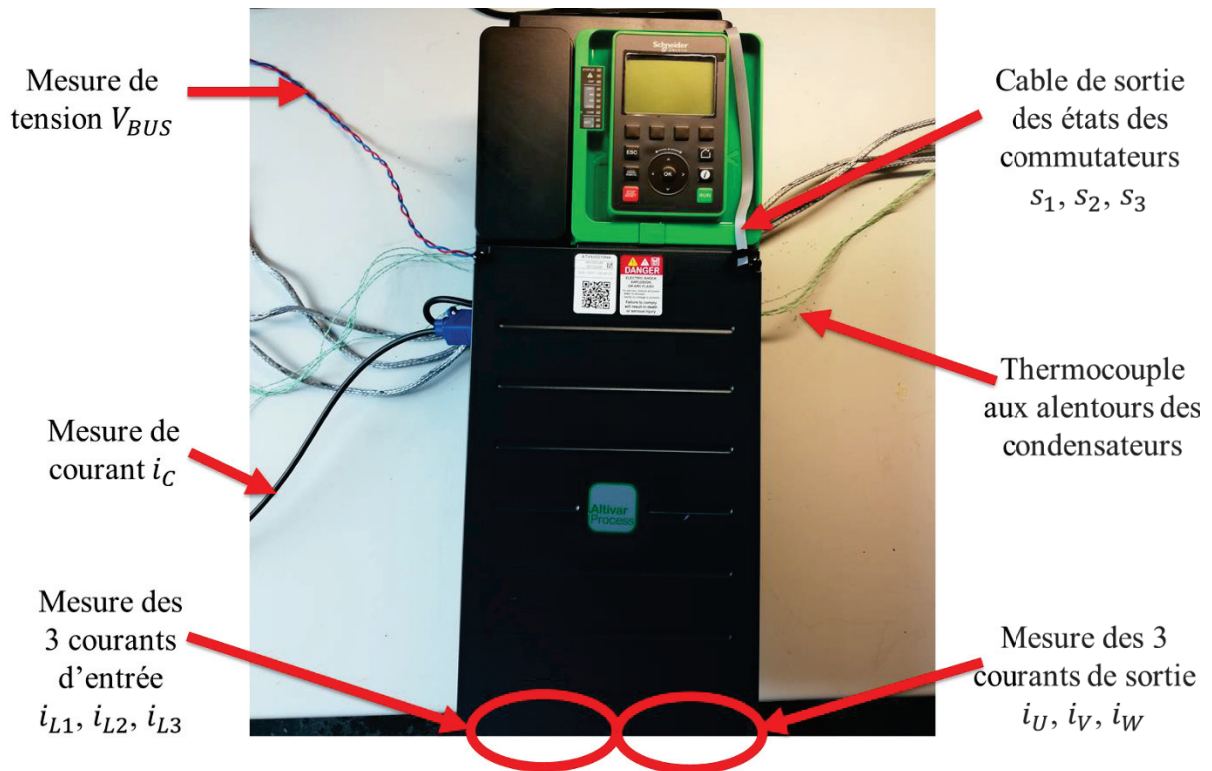


Figure 0.2 L'Altivar ATV930 avec les capteurs dupliqués

Un capteur de courant pour mesurer i_C a été ajouté afin de comparer ce signal avec celui du courant i_C calculé grâce à la démarche proposée au §4.2.

À propos des capteurs de mesure :

- Les 6 signaux de commande digitaux (s_1 jusqu'à s_6) sortants de la carte du microcontrôleur de l'ATV930 et dirigés vers les « drivers » des IGBT sont récupérés sur la carte d'interface avec un niveau de tension 0-3V . Afin d'isoler notre carte par rapport au variateur, nous utilisons des optocoupleurs.
- Pour la mesure de la tension du bus DC, une isolation de l'ordre de 1000V est prévue.
- Pour la mesure des courants, des capteurs de type LEM de réf. LF 205-S/SP3 sont utilisés.
- Pour la mesure de la température, un thermocouple de type K avec un conditionneur de réf. ARDETEM TPI4001AR sont employés. Le conditionneur dispose d'une sortie analogique isolée et programmable en tension entre 0 et 10V. Dans notre cas d'étude, nous avons programmé une plage de température entre 0 et 120°C et une plage de tension de sortie entre 0-3V.

Annexe B : Les différentes étapes de calcul de ESR et de C par la « méthode par système d'équations »

Les différents chronogrammes liés aux étapes pour arriver aux estimations de ESR et de C avec la méthode 1 sont donnés ci-dessous :

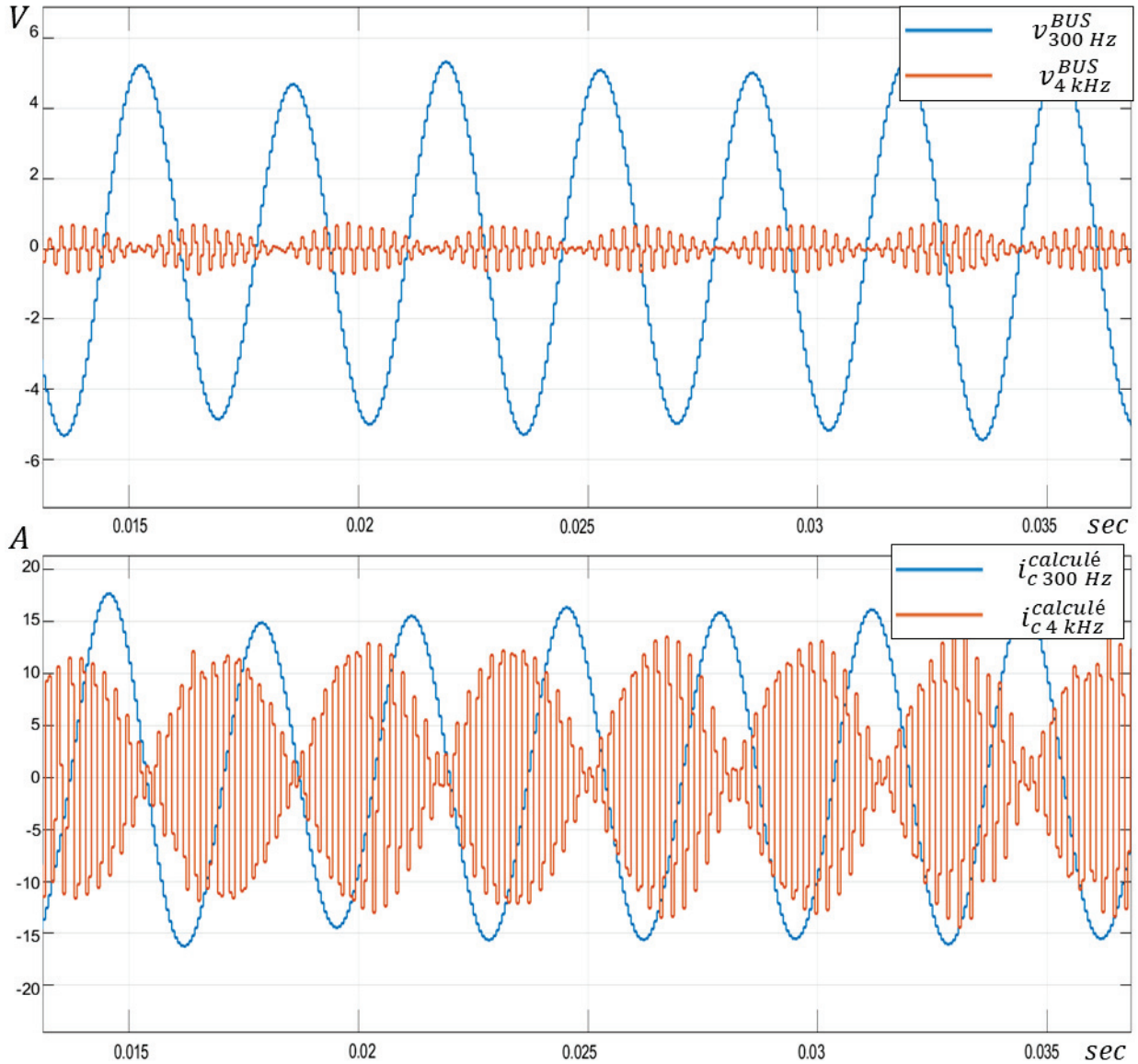


Figure 0.3 Extraction des formes d'onde des harmoniques à 300 Hz et à 4 kHz du courant et de la tension du module des condensateurs

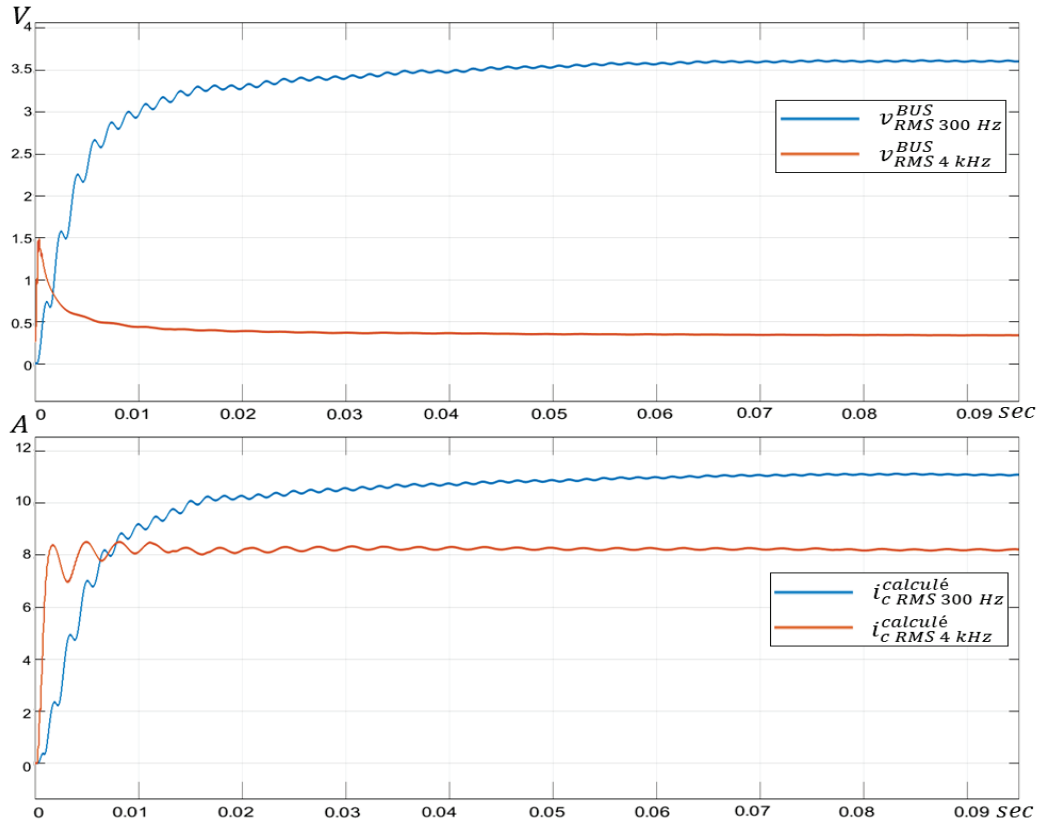


Figure 0.4 Calcul des valeurs RMS des harmoniques à 300 Hz et à 4 kHz du courant et de la tension du module des condensateurs

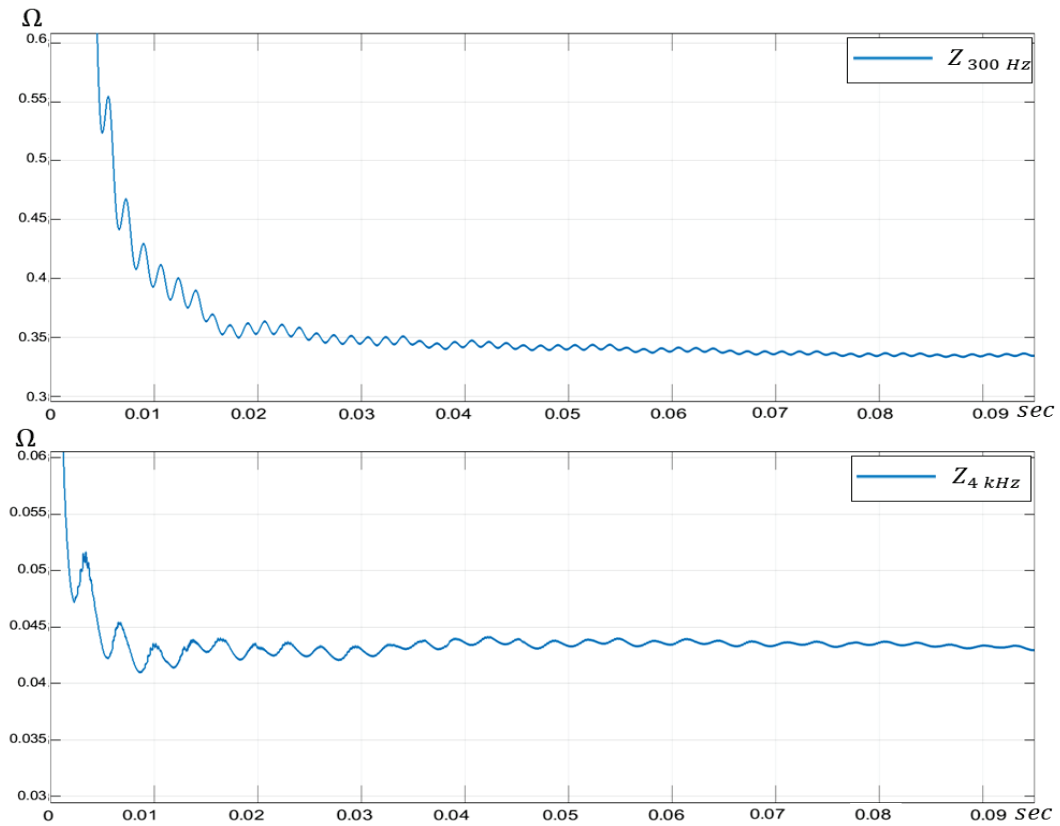


Figure 0.5 Calcul de l'impédance des condensateurs à 300 Hz et 4 kHz du module des condensateurs afin de déterminer ESR et C

Bibliographie

- [1] M. Watson, C. Byington, D. Edwards, et S. Amin, « Dynamic Modeling and Wear-Based Remaining Useful Life Prediction of High Power Clutch Systems\copyright », *Tribol. Lubr. Technol.*, vol. 61, n° 12, p. 38, 2005.
- [2] N. Patin, *Electronique de puissance pour l'industrie et les transports 5: Circuits de mesure, protections et stockage d'énergie*, vol. 5. ISTE Group, 2015.
- [3] H. Wang *et al.*, « Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics », *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 2, n° 1, p. 97–114, 2013.
- [4] P. Sun, C. Gong, X. Du, Q. Luo, H. Wang, et L. Zhou, « Online condition monitoring for both IGBT module and DC-link capacitor of power converter based on short-circuit current simultaneously », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, n° 5, p. 3662–3671, 2017.
- [5] K. Abdennadher, P. Venet, G. Rojat, J.-M. Rétif, et C. Rosset, « A real-time predictive-maintenance system of aluminum electrolytic capacitors used in uninterrupted power supplies », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, n° 4, p. 1644–1652, 2010.
- [6] H. A. H. Soliman, « Condition Monitoring of Capacitors for DC-link Application in Power Electronic Converters », Aalborg Universitetsforlag, 2017.
- [7] E. Farjah, H. Givi, et T. Ghanbari, « Application of an Efficient Rogowski Coil Sensor for Switch Fault Diagnosis and Capacitor ESR Monitoring in Nonisolated Single-Switch DC #8211;DC Converters », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, n° 2, p. 1442–1456, févr. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2552039.
- [8] K. Hasegawa, S. Nishizawa, et I. Omura, « ESR and capacitance monitoring of a dc-link capacitor used in a three-phase PWM inverter with a front-end diode rectifier », *Microelectron. Reliab.*, vol. 88, p. 433–437, 2018.
- [9] N. Patin, R. Cousseau, E. Monmasson, L. Idkhajine, et C. Forgez, « Modélisation électrique et thermique des condensateurs électrolytiques en vue de l'analyse de leur vieillissement dans un contexte de traction électrique », 2014.
- [10] D. J. DeVoto, J. Major, A. Gupta, et O. P. Yadav, « A Review of Degradation Behavior and Modeling of Capacitors », National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2018.
- [11] P. Venet, « Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie », thesis, Université Claude Bernard - Lyon I, 2007.
- [12] M. L. Gasperi, « Life prediction model for aluminum electrolytic capacitors », in , *Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96*, 1996, vol. 3, p. 1347–1351 vol.3, doi: 10.1109/IAS.1996.559241.
- [13] J. Renwick, C. S. Kulkarni, et J. R. Celaya, « Analysis of electrolytic capacitor degradation under electrical overstress for prognostic studies », in *Proceedings of the Annual conference of the prognostics and health management society*, 2015.
- [14] R. Jano et D. Pitica, « Accelerated ageing tests of aluminum electrolytic capacitors for evaluating lifetime prediction models », *Acta Tech. Napoc.*, vol. 53, n° 2, p. 36, 2012.
- [15] J. Celaya, C. Kulkarni, G. Biswas, S. Saha, et K. Goebel, « A model-based prognostics methodology for electrolytic capacitors based on electrical overstress accelerated aging », 2011.
- [16] D. Zhou, H. Wang, F. Blaabjerg, S. K. K\ a er, et D. Blom-Hansen, « Degradation effect on reliability evaluation of aluminum electrolytic capacitor in backup power converter », in *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia)*, 2017, p. 202–207.
- [17] Y. Yu, T. Zhou, M. Zhu, et D. Xu, « Fault diagnosis and life prediction of dc-link aluminum electrolytic capacitors used in three-phase ac/dc/ac converters », in *2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, 2012, p. 825–830.
- [18] B. Sun, X. Fan, C. Qian, et G. Zhang, « PoF-simulation-assisted reliability prediction for electrolytic capacitor in LED drivers », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, n° 11, p. 6726–6735, 2016.

- [19] V. N. A. Naikan et A. Rathore, « Accelerated temperature and voltage life tests on aluminium electrolytic capacitors: A DOE approach », *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 33, n° 1, p. 120–139, 2016.
- [20] C. Kulkarni, G. Biswas, X. Koutsoukos, J. Celaya, et K. Goebel, « Experimental studies of ageing in electrolytic capacitors », VANDERBILT UNIV NASHVILLE TN DEPT OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, 2010.
- [21] H. M. Pang et P. M. Bryan, « A life prediction scheme for electrolytic capacitors in power converters without current sensor », in *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010, p. 973–979.
- [22] P. Venet, F. Perisse, M. H. El-Husseini, et G. Rojat, « Realization of a smart electrolytic capacitor circuit », *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 8, n° 1, p. 16–20, janv. 2002, doi: 10.1109/2943.974353.
- [23] J. Ertl, K. Edelmöser, F. Zach, et J. W. Kolar, *A novel method for on-line monitoring and managing of electrolytic capacitors of DC voltage link PWM converters*. Citeseer, 2006.
- [24] K. Abdennadher, « Etude et Elaboration d'un système de Maintenance Prédictive Pour les condensateurs et les Batteries Utilisés dans les Alimentations sans Interruptions (ASI) », PhD Thesis, PhD thesis, Université de LYON 1, 2010.
- [25] A. Lahyani, « Surveillance et diagnostic d'état des condensateurs électrolytiques dans les convertisseurs statiques », PhD Thesis, Lyon 1, 1998.
- [26] F. Perisse, « Etude et analyse des modes de défaillances des condensateurs électrolytiques à l'aluminium et des thyristors, appliquées au système de protection du LHC (Large Hadron Collider) », PhD Thesis, Université Claude Bernard-Lyon I, 2003.
- [27] H. S. Chung, H. Wang, F. Blaabjerg, et M. Pecht, *Reliability of power electronic converter systems*. Institution of Engineering and Technology, 2015.
- [28] P. O'Connor et A. Kleyner, *Practical reliability engineering*. John Wiley & Sons, 2012.
- [29] W. Denson, « The history of reliability prediction », *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 47, n° 3, p. SP321–SP328, 1998.
- [30] M. G. Pecht et F. R. Nash, « Predicting the reliability of electronic equipment », *Proc. IEEE*, vol. 82, n° 7, p. 992–1004, 1994.
- [31] U. S. of A. D. of Defense, *Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment: MIL-HDBK-217F: 2 December 1991*. Department of defense, 1991.
- [32] U. (US) D. of Defense, *Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment*. US Department of Defense, 1986.
- [33] M. White, « Microelectronics reliability: Physics-of-failure based modeling and lifetime evaluation », Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space ..., 2008.
- [34] K. Chatterjee, M. Modarres, J. B. Bernstein, et D. Nicholls, « Celebrating fifty years of physics of failure », in *2013 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2013, p. 1–6.
- [35] K. Chatterjee, M. Modarres, et J. B. Bernstein, « Fifty years of physics of failure », *J Rel Inf Anal Cent.*, vol. 20, n° 1, p. 1–5, 2012.
- [36] J. G. McLeish, « Enhancing MIL-HDBK-217 reliability predictions with physics of failure methods », in *2010 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2010, p. 1–6.
- [37] L. E. Bechtold, « Reliability predictions to support a design for reliability program », in *2011 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2011, p. 1–4.
- [38] Schneider Electric et S. Catherineau, « Les 5 enjeux de l'industrie du futur », *rev3 - la 3ème révolution industrielle en Hauts-de-France*, 02-mars-2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://rev3.fr/les-5-enjeux-de-lindustrie-du-futur-selon-serge-catherineau/>. [Consulté le: 23-déc-2019].
- [39] Schneider Electric, « Schneider Electric: la «smart factory» attendue au tournant sur les usages et le ROI », *Place de l'IT*, 14-août-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://placedelit.com/schneider-electric-smart-factory-usages-roi/>. [Consulté le: 23-déc-2019].
- [40] « Maintenance prédictive, fiabilité, disponibilité des équipements », *MPS Maintenance Predictive Services*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.mps-maintenance.fr/maintenance-predictive/>. [Consulté le: 30-nov-2019].

- [41] M. Pecht et A. Dasgupta, « Physics-of-failure: an approach to reliable product development », *J. IES*, vol. 38, n° 5, p. 30–34, 1995.
- [42] H. Wang, M. Liserre, et F. Blaabjerg, « Toward reliable power electronics: Challenges design tools and opportunities », *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, n° 2, p. 17–26, 2013.
- [43] L. M. Moore et H. N. Post, « Five years of operating experience at a large, utility-scale photovoltaic generating plant », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 16, n° 3, p. 249–259, 2008.
- [44] O. Ondel, E. Boutleux, et P. Venet, « A decision system for electrolytic capacitors diagnosis », in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, 2004, vol. 6, p. 4360–4364 Vol.6, doi: 10.1109/PESC.2004.1354771.
- [45] ZVEI Robustness Validation Working Group, Éd., *Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/ Electronic Modules*. Frankfurt, 2008.
- [46] U. Choi, S. Member, F. Blaabjerg, K. Lee, et S. Member, « Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, n° 5, p. 2517–2533, 2015.
- [47] M. Ouhab, « Estimation de durée de vie restante de modules de puissance en fonctionnement dans des convertisseurs industriels », PhD Thesis, Paris Saclay, 2017.
- [48] W. J. Sarjeant *et al.*, « Capacitors—past, present, and future », in *Handbook of Low and High Dielectric Constant Materials and Their Applications*, Elsevier, 1999, p. 423–491.
- [49] C. HANTOUCHE, « Condensateurs de puissance », *Tech. Ing. Génie Électr.*, vol. 9, n° D4710, p. D4710–1, 1996.
- [50] G. Mouriès, *Condensateurs utilisés en électronique de puissance*. Ed. Techniques Ingénieur, 1995.
- [51] P. Venet, A. Lahyani, G. Grellet, et A. Ah-Jaco, « Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method », *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 5, n° 1, p. 71–83, janv. 1999.
- [52] F. Perisse, P. Venet, G. Rojat, et J.-M. Rétif, « Simple model of an electrolytic capacitor taking into account the temperature and aging time », *Electr. Eng.*, vol. 88, n° 2, p. 89–95, 2006.
- [53] A. Lahyani, P. Venet, G. Grellet, et P.-J. Viverge, « Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switchmode power supply », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, n° 6, p. 1199–1207, 1998.
- [54] A. Komatsu et T. Ogawara, « Electrolytic solution for electrolytic capacitor and electrolytic capacitor using the same », sept-2001.
- [55] A. EPCOS, *Aluminum Electrolytic Capacitors-General technical information, Application Note*. 2009.
- [56] E. TDK, « Aluminum Electrolytic Capacitors, General technical information », 2016.
- [57] Nichicon, « General Description of Aluminum Electrolytic Capacitors », <https://www.nichicon.co.jp/english/products/pdf/aluminum.pdf>, 2013.
- [58] R. Cousseau, « Contribution à la modélisation et à l'étude du vieillissement des condensateurs électrolytiques aluminium dédiés à des applications à hautes températures », PhD Thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2015.
- [59] Normes de la C.E.I., « Condensateurs fixes utilisés dans les équipements électroniques – Partie 4 : Condensateurs à l'aluminium à électrolyte solide ou non solide. Choix des méthodes d'essai et règles générales », in *CEI 384-4*, Première édition., 1977.
- [60] Normes de la C.E.I., « Condensateurs fixes utilisés dans les équipements électroniques – Partie 1 : Spécification générique », in *CEI 60384-1*, Troisième édition., 1999.
- [61] C. S. Kulkarni, *A physics-based degradation modeling framework for diagnostic and prognostic studies in electrolytic capacitors*. Vanderbilt University, 2013.
- [62] C. S. Kulkarni, J. R. Celaya, K. Goebel, et G. Biswas, « Physics based electrolytic capacitor degradation models for prognostic studies under thermal overstress », 2012.
- [63] A. Albertsen, « Electrolytic capacitor lifetime estimation », *Jianghai Eur. GmbH*, 2010.
- [64] A. Shrivastava *et al.*, « Detection of capacitor electrolyte residues with FTIR in failure analysis », *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 25, n° 2, p. 635–644, 2014.
- [65] A. Shrivastava, « Reliability Evaluation of Liquid and Polymer Aluminum Electrolytic Capacitors », 2014, doi: 10.13016/M2390P.

- [66] A. M. Imam, D. M. Divan, R. G. Harley, et T. G. Habetler, « Electrolytic capacitor failure mechanism due to inrush current », in *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 2007, p. 730–736.
- [67] H. Wang et F. Blaabjerg, « Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters #x2014;An Overview », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, n° 5, p. 3569-3578, sept. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2308357.
- [68] Exxelia, « Exxelia Electrolytic Aluminum Capacitors technical data ». .
- [69] I.-I. E. Commission, « IEC 60068-1 », 2013.
- [70] M. Makdessi, « Modélisation, vieillissement et surveillance de l'état de santé des condensateurs films utilisés dans des applications avioniques », phdthesis, Université Claude Bernard - Lyon I, 2014.
- [71] N. Patin, R. Cousseau, et E. Monmasson, « Ageing test bench for electrolytic capacitors in the context of electric vehicles #x2014;Electrical and thermal modeling from real-time identification viewpoint », in *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2014, p. 1-8, doi: 10.1109/CISTEM.2014.7076998.
- [72] R. Cousseau, N. Patin, E. Monmasson, et L. Idkhajine, « A methodology for studying aluminum electrolytic capacitors wear-out in automotive cases », in *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013, p. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2013.6631846.
- [73] J. R. Celaya, C. Kulkarni, S. Saha, G. Biswas, et K. Goebel, « Accelerated aging in electrolytic capacitors for prognostics », in *2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2012, p. 1-6, doi: 10.1109/RAMS.2012.6175486.
- [74] D. J. Groebel, A. Mettas, et F.-B. Sun, « Determination and interpretation of activation energy using accelerated-test data », in *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No. 01CH37179)*, 2001, p. 58–63.
- [75] R. Shukla, M. W. Ahmad, N. Agarwal, et S. Anand, « Accelerated ageing of aluminium electrolytic capacitor », in *Proc. 7th Nat. Power Electron. Conf.*, 2015, p. 1–5.
- [76] P. Tobias, « 8.1.4. What is “physical acceleration” and how do we model it? », 2003. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr14.htm>. [Consulté le: 13-sept-2019].
- [77] R. Cousseau, *Contribution à la modélisation et à l'étude du vieillissement des condensateurs électrolytiques aluminium dédiés à des applications à hautes températures*. Compiègne, 2015.
- [78] A. Dehbi, W. Wondrak, Y. Ousten, et Y. Danto, « High temperature reliability testing of aluminum and tantalum electrolytic capacitors », *Microelectron. Reliab.*, vol. 42, n° 6, p. 835-840, juin 2002, doi: 10.1016/S0026-2714(02)00021-5.
- [79] G. E. Rhoades et A. W. H. Smith, « Expected life of capacitors with nonsolid electrolyte », in *34th Component Conf. Proc.*, 1984, p. 156–161.
- [80] R. W. Macnamee, « Electrolytes for electrolytic capacitors », 4522737, 11-juin-1985.
- [81] « DIN IEC 60384-4 - 1991-05 - Beuth.de ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.beuth.de/en/standard/din-iec-60384-4/1688313>. [Consulté le: 11-déc-2019].
- [82] J. Both, « Leakage current properties of modern electrolytic capacitors », *BC Compon. Aug*, vol. 30, 2001.
- [83] A. Albertsen Jianghai, « Electrolytic capacitor lifetime estimation », *Jianghai Eur. GmbH*, 2010.
- [84] Kemet, « Kemet Aluminum Electrolytic Capacitors General information ». 2018.
- [85] NCC, « Nippon Chemi-con AEC guide 2019 ». 2019.
- [86] A. R. Khandebharad, R. B. Dhumale, S. S. Lokhande, et S. D. Lokhande, « Real time remaining useful life prediction of the electrolytic capacitor », in *2015 International Conference on Information Processing (ICIP)*, 2015, p. 631-636, doi: 10.1109/INFOP.2015.7489460.
- [87] R. S. Alwitt et R. G. Hills, « The Chemistry of Failure of Aluminum Electrolytic Capacitors », in *Third Annual Symposium on the Physics of Failure in Electronics*, 1964, p. 93-107, doi: 10.1109/IRPS.1964.362282.
- [88] R. Alwitt et R. Hills, « The Chemistry of Failure of Aluminum Electrolytic Capacitors-2 », *IEEE Trans. Parts Mater. Packag.*, vol. 1, n° 2, p. 28-34, sept. 1965, doi: 10.1109/TPMP.1965.1135396.

- [89] W. Nelson, « Analysis of Accelerated Life Test Data - Part I: The Arrhenius Model and Graphical Methods », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-6, n° 4, p. 165-181, déc. 1971, doi: 10.1109/TEI.1971.299172.
- [90] G. Alcicek, H. Gualous, P. Venet, R. Gallay, et A. Miraoui, « Experimental study of temperature effect on ultracapacitor ageing », in *2007 European conference on power electronics and applications*, 2007, p. 1–7.
- [91] G. C. Montanari, G. Mazzanti, et L. Simoni, « Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, n° 5, p. 730–745, 2002.
- [92] J. Drillkens, Y. Yurdagel, J. Kowal, et D. Sauer, « Maximizing the lifetime of electrochemical double layer capacitors et given temperature conditions by optimized operating strategies », *ESSCAP Bordx.*, 2010.
- [93] D. Linzen, S. Buller, E. Karden, et R. W. De Doncker, « Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, n° 5, p. 1135–1141, 2005.
- [94] P. Spanik, M. Frivaldsky, et A. Kanovsky, « Life time of the electrolytic capacitors in power applications », in *2014 ELEKTRO*, 2014, p. 233-238, doi: 10.1109/ELEKTRO.2014.6848893.
- [95] F. Salameh, « Méthodes de modélisation statistique de la durée de vie des composants en génie électrique », PhD Thesis, 2016.
- [96] S. G. Parler Jr et P. C. Dubilier, « Deriving life multipliers for electrolytic capacitors », *IEEE Power Electron. Soc. Newsl.*, vol. 16, n° 1, p. 11–12, 2004.
- [97] S. G. Parler, « Thermal modeling of aluminum electrolytic capacitors », in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*, 1999, vol. 4, p. 2418-2429 vol.4, doi: 10.1109/IAS.1999.799180.
- [98] H. S. Endicott, B. D. Hatch, et R. G. Sohmer, « Application of the Eyring Model to capacitor aging data », in *Annual Report 1962 Conference on Electrical Insulation*, 1962, p. 47-50, doi: 10.1109/EIC.1962.7466672.
- [99] A. Bengt-Erik, *Life-Limiting Factors in Electrolytic Capacitors*. RIFA Electrolytics, 2001.
- [100] B.-E. Alvsten, *Electrolytic capacitors: theory and application*. RIFA Electrolytics, 1995.
- [101] J. J. Moré, « The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory », in *Numerical analysis*, Springer, 1978, p. 105–116.
- [102] A. Ranganathan, « The levenberg-marquardt algorithm », *Tutorial LM Algorithm*, vol. 11, n° 1, p. 101–110, 2004.
- [103] H. Yu et B. M. Wilamowski, « Levenberg-marquardt training », *Ind. Electron. Handb.*, vol. 5, n° 12, p. 1, 2011.
- [104] K. Harada, A. Katsuki, et M. Fujiwara, « Use of ESR for deterioration diagnosis of electrolytic capacitor », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 8, n° 4, p. 355-361, oct. 1993, doi: 10.1109/63.261004.
- [105] J. A. Jones et J. A. Hayes, « The parametric drift behavior of aluminum electrolytic capacitors: An evaluation of four models », *1st Eur. Capacit. Resist. Technol. Proc.*, p. 171–179, 1987.
- [106] K. Harada et A. Katsuki, « Deterioration diagnosis of electrolytic capacitor in a buck-boost converter », in *PESC'88 Record., 19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1988, p. 1101–1104.
- [107] Agilent technologies, *Precision Impedance Analyser Agilent 4294A*, Third Edition. Agilent technologies Service Manual, 2003.
- [108] L. Cathey et K. A. Joyner, « Investigation of the Dissipation Process in Electrolytic Capacitors », *Act. Passive Electron. Compon.*, vol. 6, n° 2, p. 49–53, 1980.
- [109] P. Patenaude et P. Mathieu, « Agrandissement – Lexique de mathématique », *Scolab*, 2008. [En ligne]. Disponible sur: <https://lexique.netmath.ca/agrandissement/>.
- [110] V. Casacanta, J. Pollack, et C. Sung, « Identification of halogens in the positive tab corrosion of aluminum electrolytic capacitors and study of corrosion products », in *CARTS-CONFERENCE-*, 1995, p. 170–170.
- [111] R. L. MaSaitis, A. J. Muller, R. L. Opila, L. A. Psota-Kelty, et S. Daoud, « Characterization and reliability of electrolytic capacitors exposed to halogenated solvents », in *1992 Proceedings 42nd Electronic Components & Technology Conference*, 1992, p. 611–616.

- [112] F. Perisse, P. Venet, et G. Rojat, « Behavioral study on the reliability of electrolytic capacitors of various manufacturers », 2002.
- [113] G. Muriset, « Influence of the impurities in the foil, electrolyte and paper in the electrolytic capacitor », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 99, n° 7, p. 285–288, 1952.
- [114] H. Wang et F. Blaabjerg, « Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters—An Overview », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, n° 5, p. 3569–3578, sept. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2308357.
- [115] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, et P. Tavner, « An industry-based survey of reliability in power electronic converters », in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, p. 3151–3157, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316356.
- [116] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, et P. Tavner, « An industry-based survey of reliability in power electronic converters », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, n° 3, p. 1441–1451, 2011.
- [117] N. Agarwal, M. W. Ahmad, et S. Anand, « Quasi-Online Technique for Health Monitoring of Capacitor in Single-Phase Solar Inverter », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, n° 6, p. 5283–5291, 2018.
- [118] U. M. Choi, F. Blaabjerg, et F. Iannuzzo, « Advanced power cyler with intelligent monitoring strategy of IGBT module under test », *Microelectron. Reliab.*, vol. 76, p. 522–526, 2017.
- [119] H. Soliman, H. Wang, et F. Blaabjerg, « A review of the condition monitoring of capacitors in power electronic converters », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, n° 6, p. 4976–4989, 2016.
- [120] X.-S. Pu, T. H. Nguyen, D.-C. Lee, K.-B. Lee, et J.-M. Kim, « Fault diagnosis of DC-link capacitors in three-phase AC/DC PWM converters by online estimation of equivalent series resistance », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, n° 9, p. 4118–4127, 2012.
- [121] M. Makdessi *et al.*, « Lifetime estimation of high-temperature high-voltage polymer film capacitor based on capacitance loss », *Microelectron. Reliab.*, vol. 55, n° 9-10, p. 2012–2016, 2015.
- [122] H. Wang, D. A. Nielsen, et F. Blaabjerg, « Degradation testing and failure analysis of DC film capacitors under high humidity conditions », *Microelectron. Reliab.*, vol. 55, n° 9-10, p. 2007–2011, 2015.
- [123] K. Hasegawa, K. Tsuzaki, et S. Nishizawa, « DC-bias-voltage dependence of degradation of aluminum electrolytic capacitors », *Microelectron. Reliab.*, vol. 83, p. 115–118, 2018.
- [124] J. W. Kolar et S. D. Round, « Analytical calculation of the RMS current stress on the DC-link capacitor of voltage-PWM converter systems », *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 153, n° 4, p. 535–543, 2006.
- [125] A. G. Abo-Khalil et D.-C. Lee, « DC-link capacitance estimation in AC/DC/AC PWM converters using voltage injection », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, n° 5, p. 1631–1637, 2008.
- [126] V. Leite, H. Teixeira, A. J. Cardoso, et R. Araujo, « A simple ESR identification methodology for electrolytic capacitors condition monitoring », in *Proceedings of 20th International Congress & Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management.(COMADEM 2007)*, 2007.
- [127] E. A. Wan et R. Van Der Merwe, « The unscented Kalman filter for nonlinear estimation », in *Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000. AS-SPCC. The IEEE 2000*, 2000, p. 153–158.
- [128] K. Abdennadher, P. Venet, G. Rojat, J. M. Retif, et C. Rosset, « Kalman filter used for on line monitoring and predictive maintenance system of aluminium electrolytic capacitors in UPS », in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, p. 3188–3193, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316418.
- [129] « PLECS | Plexim ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.plexim.com/plecs>. [Consulté le: 24-déc-2019].
- [130] « MATLAB - Le langage du calcul technique - MATLAB & Simulink ». [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html>. [Consulté le: 22-déc-2019].
- [131] A. El Hayek, P. Venet, G. Clerc, M. Wang, R. Mitova, et A. Sari, « Estimation of the Remaining Useful Life of capacitors », EP19305671.0.
- [132] A. El Hayek, P. Venet, R. Mitova, M.-X. Wang, G. Clerc, et A. Sari, « Aging laws of electrolytic capacitors », 2018.
- [133] T. H. Davenport, « Competing on analytics », *Harv. Bus. Rev.*, vol. 84, n° 1, p. 98, 2006.

- [134] P. Russom, « Big data analytics », *TDWI Best Pract. Rep. Fourth Quart.*, vol. 19, n° 4, p. 1–34, 2011.
- [135] « Pourquoi la maintenance prédictive va révolutionner l’industrie ? » [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sicara.fr/parlons-data/2018-03-21-maintenance-predictive>. [Consulté le: 23-déc-2019].