



HAL
open science

Analyse du vieillissement, estimation de la durée de vie et méthode de surveillance de l'état de santé des condensateurs à film métallisé.

Claire Rochefort

► To cite this version:

Claire Rochefort. Analyse du vieillissement, estimation de la durée de vie et méthode de surveillance de l'état de santé des condensateurs à film métallisé.. Energie électrique. Université Claude Bernard - Lyon I, 2024. Français. NNT : 2024LYO10183 . tel-04842431

HAL Id: tel-04842431

<https://theses.hal.science/tel-04842431v1>

Submitted on 17 Dec 2024

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.



**THESE de DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1**

**Ecole Doctorale N° 160
Electronique, Electrotechnique, Automatique**

Discipline : Génie Electrique

Soutenue publiquement le 16/10/2024, par :
Claire Rochefort

**Analyse du vieillissement, estimation
de la durée de vie et méthode de
surveillance de l'état de santé des
condensateurs à films métallisés**

Devant le jury composé de :

Mme. Bord-Majek, Isabelle	Maître de Conférences, HDR - Université de Bordeaux	Rapportrice
M. Patin, Nicolas	Professeur des Universités - Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
M. Maussion Pascal	Professeur des Universités - Université de Toulouse	Président du jury- Examineur
Mme. Mitova, Radoslava	Dr. Ingénieur de recherche – Schneider Electric	Co-encadrante industrielle
M. Joubert, Charles	Professeur des Universités - Université Claude Bernard Lyon 1	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	Invité - Co-directeur
M. Sari, Ali	Professeur des Universités - Université Claude Bernard Lyon 1	Invité - Co-directeur
M. Talbert, Thierry	Maître de Conférences, HDR - Université de Perpignan	Invité
M. Wang, Miao-Xin	Dr. Ingénieur de recherche – Schneider Electric	Invité – Co-encadrant industriel

Résumé

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

Résumé :

Très largement utilisés, les condensateurs à films métallisés sont une cause commune de panne des systèmes d'électronique de puissance. Leur défaillance peut engendrer des risques d'explosion et d'incendie. Outre l'enjeu de sécurité, l'étude des défaillances est justifiée par les enjeux économiques relatifs à la maintenance des systèmes. L'objectif est de prédire l'évolution du vieillissement pour estimer la durée de vie utile restante et d'anticiper les pannes soudaines.

A ce jour, les lois de vieillissement les plus utilisées nécessitent d'effectuer préalablement des essais de vieillissement accéléré afin d'identifier leurs paramètres et de permettre leur extrapolation. Ces paramètres varient grandement selon les différentes séries de condensateurs et leurs fabricants. Ces lois sont donc coûteuses à exploiter et non robustes. D'autres lois sont basées sur des processus stochastiques ou sur les mécanismes de défaillance. Il reste cependant à évaluer leur robustesse et leur portée prédictive. Enfin, si des dispositifs sont mis en place pour diminuer l'occurrence des défaillances catalectiques et leurs impacts, des accidents subsistent. Il reste nécessaire de prévenir ce type de défaillance catalectique indépendamment des spécificités internes et de l'historique du condensateur.

Afin de répondre à ces problématiques, des travaux ont été menés en collaboration avec Schneider Electric dans le cadre d'un contrat CIFRE.

Plusieurs essais de vieillissement accéléré ont été effectués sur un total de 111 condensateurs provenant de fabricants différents. Une première campagne de test s'est focalisée sur un vieillissement dans des conditions fixes en tension alternative et en température. La seconde a ajouté la contrainte de l'humidité. Des analyses post-mortem ont montré que les différentes campagnes de vieillissement conduisaient à la prévalence d'un type de mécanisme de défaillance spécifique. La première campagne a mis en évidence les effets des auto-cicatrisations et la seconde, ceux de la corrosion.

Grâce à ces résultats, des modélisations de l'évolution de la capacité selon ces deux mécanismes ont pu être établies. Ces dernières ont été validées par les données au regard de lois existantes. Une première modélisation de la dégradation de la résistance de métallisation sous l'effet d'auto-cicatrisations a également été proposée.

En parallèle, un grand nombre d'emballlements thermiques de condensateurs ont pu être constatés. Grâce à des relevés d'indicateurs de santé, mesurés en temps réel, une étude approfondie du processus a pu être réalisée. Des signes précurseurs du claquage thermique ont été mis en évidence. Il devient ainsi possible de détecter précocement les emballlements et d'agir pour prévenir leurs dégâts. Sur ce principe, une méthode générique de prévention des risques de claquages thermiques a été proposée. Sa faisabilité a été démontrée et évaluée expérimentalement.

Mots clés : Condensateurs à films métallisés, loi de vieillissement, estimation de l'état de santé, durée de vie utile restante, maintenance prévisionnelle, mécanisme de défaillance, emballlement thermique, sûreté de fonctionnement

Abstract

Title: Ageing analysis, lifetime estimation and health monitoring methods of metallized film capacitors

Summary:

Widely used, the metallized film capacitors are a common cause of electronic system failure. Some of their failures can lead to serious accidents and severe damage to their surroundings, such as explosions or fires. In addition to these safety issues, the failures analysis is justified by the economic issues related to the maintenance of these systems. The objective is to estimate the remaining useful lifetime and to prevent the sudden failures.

Nowadays, the most used ageing laws require performing preliminary ageing tests to identify their parameters and enable their extrapolation. These parameters strongly depend on the series and the manufacturer of the capacitor itself. For these reasons, these ageing laws are costly to use and not robust. Other types of laws based on stochastic processes and related to failure mechanisms are emerging. However, their robustness and predictive capability need to be evaluated. Finally, even if measures are implemented to reduce the occurrence of catastrophic failures, risks persist. There is a need to prevent these types of failures without solely relying on the internal characteristics and the background of the capacitors.

To address these issues, this work was carried out in collaboration with Schneider Electric as part of a CIFRE contract.

Several accelerated ageing tests were carried out on a total of 111 capacitors from different manufacturers. The first test campaign focused on ageing under fixed conditions of alternating voltage and temperature, while the second added the additional constraint of humidity. Post-mortem analysis revealed that the different ageing campaigns led to the prevalence of a specific type of failure mechanism. The first campaign highlighted the effects of self-healing, and the second, those of corrosion.

Based on these results, models of the capacitance evolution according to these two mechanisms were established. These were validated by the data in comparison to some existing laws. A first model based on the metallization resistance degradation due to self-healing effects was also proposed.

Simultaneously, a large number of thermal runaways on capacitors were observed. Through real-time health indicator measurements, an in-depth study of the process was conducted. Early signs of thermal breakdown were identified. These results enable the early detection of thermal runaway and the implementation of damage prevention measures. Based on this principle, a generic method for preventing the risk of thermal breakdown was proposed. Its feasibility has been demonstrated and experimentally evaluated.

Key words: Metallized film capacitor, ageing law, state of health estimation, predictive maintenance, remaining useful lifetime, failure mechanism, thermal runaway, dependability

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement d'un long travail de recherche mené en collaboration avec le laboratoire Ampère du site de l'Université Claude Bernard de Lyon 1 et l'équipe « Power Conversion » de Schneider Electric à Grenoble.

Cette aventure aurait été sensiblement différente sans le support des personnes qui m'ont entourées et que je tiens à remercier.

D'abord, je voudrais remercier mes encadrants académiques : M. Pascal VENET pour son encadrement, sa franchise incontestable et ses conseils pragmatiques qui m'ont évité quelques écueils ainsi que M. Guy CLERC pour la pertinence de ses remarques et sa réactivité exceptionnelle. Je remercie aussi M. Ali SARI.

Ensuite, je voudrais remercier mes encadrants industriels : Mme Radoslava MITOVA et M. Miao-Xin WANG pour leur disponibilité, leur expertise et leur regard critique.

Ensuite, je voudrais exprimer ma gratitude à M. Pascal BEVILACQUA et M. Younes ZITOUNI du laboratoire Ampère pour respectivement la programmation de l'acquisition des mesures en temps réel et une importante partie du câblage du banc d'essai en température, tension et humidité.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à M. Philippe KREMER, M. Pierre-Yves BOYER et M. Olivier SALANSON de l'équipe « Power Conversion » de Schneider Electric pour leur travail respectif quant à la réalisation et le débogage des circuits imprimés de mesure du déphasage, la programmation de la remontée des mesures et la mise en place des interconnexions du banc d'essai de validation des méthodes de prévention d'emballement.

Leur aide a été nécessaire et précieuse.

Certains résultats obtenus ont permis le dépôt du brevet EP 23306366, je souhaite en conséquence remercier les ingénieurs brevets qui ont été présents tout au long du processus : M. Fabian LIEB pour la rédaction du document ainsi que M. Jérôme MOUNEY pour son support administratif et juridique.

Évidemment, cette thèse n'aurait pu aboutir sans les retours pertinents des rapporteurs M. Nicolas PATIN et Mme. Isabelle BORD-MAJEK. Je tiens à les remercier, ainsi que M. Pascal MAUSSION, M. Charles JOUBERT et M. Thierry TALBERT de m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury et d'évaluer ces travaux.

Je voudrais aussi remercier mes collègues pour tous ces moments de partage. Du côté d'Ampère, il faut citer mes co-bureaux pour leur contagieuse bonne humeur et leur grande ouverture d'esprit, et ceux des bureaux voisins pour leur écoute, leur patience et leurs conseils fort avisés. Du côté de Schneider, je tiens à remercier mon équipe pour leur bienveillance et leur gentillesse.

Enfin, je voudrais remercier mes proches, ma famille et mes amis pour leur support matériel et émotionnel.

Cette thèse ayant été riche en enseignements, je voudrais finir par en partager un dernier pour les doctorants de passage :

*« Ayez confiance en vos capacités. »
(Elles pourraient vous surprendre.)*

Table des matières

Introduction	9
Chapitre 1 Présentation des condensateurs à films métallisés	12
1.1 Généralités sur les condensateurs	12
1.1.1 Principe.....	12
1.1.2 Types de condensateurs et leurs applications.....	15
1.1.3 Circuit électrique équivalent	17
1.2 Présentation des condensateurs à films métallisés	19
1.2.1 Structure interne.....	19
1.2.2 Types de diélectriques	21
1.3 Méthodes de caractérisation	23
1.3.1 Caractérisation fréquentielle.....	23
1.3.2 Caractérisation en tension DC.....	25
1.4 Processus de défaillance	26
1.4.1 Indicateurs d'état de santé	27
1.4.2 Défaillances par dérive	27
1.4.2.1 L'auto-cicatrisation	27
1.4.2.2 La corrosion	29
1.4.2.3 La fragilisation du diélectrique.....	30
1.4.3 Facteurs et interdépendance des mécanismes de défaillance	31
1.4.3.1 Facteurs de défaillance	31
1.4.3.2 Interactions entre les mécanismes de défaillance	32
1.4.4 Défaillances catalectiques.....	32
1.4.4.1 Types de claquages.....	32
1.4.4.2 Claquages localisés.....	33
1.4.4.3 Emballement thermique	34
1.4.5 Modes de défaillance	35
Conclusion	37
Chapitre 2 L'enjeu de la sûreté de fonctionnement autour des condensateurs à films métallisés	38
2.1 Exigences de sûreté de fonctionnement.....	38
2.1.1 Définitions des termes	38
2.1.2 De l'impact des défaillances des condensateurs à films métallisés sur la sûreté de fonctionnement des systèmes.....	39
2.1.3 Contraintes inhérentes aux dispositifs de surveillance	40
2.2 Méthodes de surveillance en ligne de l'état de santé d'un condensateur	41
2.2.1 Suivi de la capacité	41

2.2.2	Suivi conjoint de l'ESR et de la capacité	42
2.2.3	Circuit de détection de défaut	44
2.3	Pronostic de la durée de vie utile restante	45
2.3.1	Définitions des types de méthode	45
2.3.2	Modèles basés sur les facteurs de défaillance	46
2.3.3	Modèles basés sur les mécanismes de défaillance	49
2.3.4	Modèles stochastiques	50
2.3.5	Modèles non-paramétriques	55
2.4	Outils préventifs des défaillances catalectiques et leurs conséquences	56
2.4.1	Etat de l'art de l'étude des claquages électroniques et thermiques	56
2.4.2	Solutions industrielles	57
Conclusion		59
Chapitre 3 Essais de vieillissement accélérés en tension et température		60
3.1	Détermination des conditions des essais	60
3.1.1	Etat de l'art des essais de vieillissement par dérive.....	60
3.1.2	Cahier des charges.....	61
3.2	Caractérisations initiales des condensateurs en essais	62
3.2.1	Appareils de mesure, précision et répétabilité	63
3.2.2	Identification de l'ESR.....	65
3.2.3	Caractéristiques des condensateurs en essais	66
3.3	Banc de vieillissement	67
3.4	Résultats expérimentaux.....	67
3.4.1	Evolution des indicateurs de vieillissement.....	67
3.4.2	Analyse post-mortem	70
3.4.2.1	Défaillances par dérive	70
3.4.2.2	Défaillances catalectiques.....	72
3.5	Modélisation de l'impact de l'auto-cicatrisation	74
3.5.1	Hypothèses	74
3.5.2	Modélisations	75
3.5.2.1	Modélisation de la capacité.....	75
3.5.2.1	Modélisation de la résistance de la métallisation.....	77
3.6	Evaluation du modèle de vieillissement par auto-cicatrisation	78
3.6.1	Ajustement avec les données de vieillissement en température et tension	79
3.6.2	Comparaison avec les modèles existants	81
3.6.3	Extrapolation à visée prédictive	83
Conclusion		86

Chapitre 4	Essais de vieillissement accélérés en tension, température et humidité.....	87
4.1	Détermination des conditions des essais.....	87
4.1.1	Etat de l'art des essais menant à des emballements.....	87
4.1.2	Cahier des charges.....	87
4.1.2.1	Observations d'emballements à la suite de contraintes usuelles.....	87
4.1.2.2	Récupération de données de vieillissement par dérive.....	88
4.1.2.3	Suivi des indicateurs de vieillissement.....	89
4.1.2.4	Mise en sécurité.....	89
4.2	Présentation du banc d'essai.....	90
4.3	Mesures des indicateurs de vieillissement.....	91
4.3.1	Mesures de la résistance d'isolement.....	91
4.3.2	Adaptation du procédé de réalisation des caractérisations périodiques.....	92
4.3.3	Mesures en temps réel.....	95
4.4	Résultats expérimentaux relatifs aux défaillances catalectiques.....	96
4.4.1	Inspections visuelles.....	96
4.4.2	Motif caractéristique d'un emballement thermique.....	97
4.4.3	Disparités entre emballements thermiques.....	100
4.4.4	Indicateurs d'emballement.....	102
4.4.4.1	Limites de la mesure de la température.....	102
4.4.4.2	Limites de la mesure du courant.....	103
4.4.4.3	Validation des mesures de déphasage et de puissance active.....	104
4.4.5	Variations des éléments du schéma équivalent.....	105
4.4.5.1	Variation de la résistance d'isolement.....	105
4.4.5.2	Variation de la résistance de métallisation.....	107
4.4.5.3	Variation de la capacité.....	109
4.5	Interprétation du phénomène d'emballement.....	110
4.6	Autres observations.....	111
4.7	Discussion sur la prédictibilité d'un emballement.....	112
4.8	Résultats expérimentaux relatifs aux défaillances par dérive.....	113
4.8.1	Résultats des caractérisations périodiques.....	113
4.8.2	Dégradation de la capacité en temps réel.....	116
4.8.3	Analyse post-mortem.....	119
4.9	Discussion sur le phénomène de corrosion.....	121
4.10	Modélisation de l'impact de la corrosion.....	121
4.10.1	Hypothèses.....	121
4.10.2	Modélisation de la capacité.....	123

4.11	Evaluation du modèle de vieillissement par corrosion	125
4.11.1	Ajustement avec les données de vieillissement en tension, température et humidité	125
4.11.2	Extrapolation à visée prédictive	127
4.11.3	Comparaison avec les modèles existants	129
4.11.3.1	Comparaison entre les ajustements.....	129
4.11.3.2	Comparaison entre les prédictions	133
4.12	Généralisation du modèle de vieillissement	134
	Conclusion.....	136
	Chapitre 5 Méthodes de prévention des défaillances catalectiques par claquage thermique.....	138
5.1	Principe de la méthode de prévention	138
5.1.1	Détection précoce	138
5.1.2	Seuils limites des indicateurs d'emballement	138
5.2	Principe général des mesures des indicateurs.....	141
5.3	Propositions de circuits analogiques de mesure de déphasage	142
5.3.1	Contraintes	142
5.3.2	Méthode des triggers de Schmitt	142
5.3.3	Méthode basée sur l'association transistor / optocoupleur	144
5.3.4	Méthode mixte	145
5.4	Validation expérimentale des circuits dans le cadre d'un emballement.....	148
5.4.1	Résultats expérimentaux sur une impédance connue.....	148
5.4.2	Résultats expérimentaux dans le cadre d'un emballement de condensateur	150
5.4.2.1	Validation du principe de la méthode de prévention	151
5.4.2.2	Validation des méthodes de mesure proposées	151
5.5	Analyse critique des différentes méthodes	153
	Conclusion.....	154
	Conclusion générale	155
	Références.....	158
	Table des figures.....	165
	Table des tableaux	168
	Table des abréviations	169
	Annexes.....	170

Introduction

L'énergie électrique est une énergie facilement et rapidement transportable, modulable, aisément convertible dans de grandes quantités, accessible économiquement et qui n'émet pas de gaz à effet de serre lors de sa consommation. Selon les modes, sa production peut, elle aussi, être décarbonée. Ces qualités en font une énergie d'avenir sur laquelle reposent tous les scénarios de la transition énergétique pour faire face au changement climatique. Cependant, elle possède l'inconvénient de ne pas être une énergie primaire. Sa conversion entraîne inévitablement des pertes. Dans un souci d'économie d'énergie, il y a un enjeu à réduire les pertes, dues à son utilisation, au strict minimum. Un autre enjeu lié à son utilisation est la sécurité. Invisible et inodore, l'électricité peut être létale pour l'être humain.

Par ailleurs, pour être utilisée sous différentes formes (alternatif ou continu) et à différents niveaux de tensions et de courant, l'utilisation de convertisseurs statiques d'énergie est primordiale. Ceux-ci sont soumis à d'autres contraintes que leur fonctionnalité première. La première est la limitation de leurs pertes intrinsèques. La seconde est leur capacité à ne pas engendrer d'accidents. Une troisième contrainte commence à faire son apparition, de pair avec l'épuisement des ressources matérielles : la nécessité d'économiser l'énergie ainsi qu'une prise de conscience environnementale plus marquée. On voit apparaître la notion d'éco-conception et d'économie circulaire [1]. En particulier, il faut optimiser le cycle de vie des produits [2], [3]. Les systèmes doivent durer plus longtemps et être réparables. Ainsi de nouvelles normes et réglementations commencent à apparaître exigeant des fabricants qu'ils soient capables de donner une estimation de la durée de vie de leur produit [4], [5].

L'étude des durées de vie des composants était déjà en soi une discipline essentielle à prendre en compte lors de la conception des systèmes en ce qu'elle contribuait à leur robustesse. Avec l'émergence de ces nouvelles problématiques, elle devient désormais incontournable.

L'analyse du vieillissement permet d'identifier les faiblesses de chaque composant et d'y remédier. Pour les fabricants, il s'agit d'acquérir un retour d'expérience sur la conception afin de proposer des composants plus résistants. Pour les utilisateurs, il s'agit de ne sélectionner que les composants les plus robustes ou d'optimiser leurs conditions de fonctionnement. Dans tous les cas, l'espérance de vie des composants répondant à leurs contraintes fonctionnelles, doit être allongée. Les baisses de rendement dues au vieillissement sont aussi réduites.

L'étude des défaillances peut permettre d'estimer la durée de vie restante et d'anticiper les pannes. Cela contribue à assurer la sûreté de fonctionnement des systèmes. Les coûts humains et matériels relatifs à leur maintenance, aux arrêts de fonctionnement et aux accidents sont alors réduits. L'intérêt économique y est majeur pour tous les acteurs, qu'ils soient industriels ou sociaux. La disponibilité opérationnelle est, en outre, un gage de qualité très recherché.

Sous tous ces aspects, l'étude des durées de vie permet une meilleure gestion de l'utilisation des composants et une optimisation des ressources. Pour l'entreprise partenaire de cette thèse, à savoir Schneider Electric, un enjeu de l'étude du vieillissement est de développer des systèmes de suivi des indicateurs de santé en ligne capables d'analyser les données collectées afin de donner une estimation de la durée de vie utile restante et de prévoir les défaillances soudaines de leurs produits. L'intérêt premier est de vendre un nouveau service au client. Il pourra ainsi optimiser ses opérations de

maintenance et la performance de son produit. Un second intérêt est de gagner des parts de marché en garantissant les produits les plus robustes.

Aux contraintes inhérentes à la mise en place d'un outil prédictif capable d'estimer la durée de vie utile restante d'un produit, il faut donc rajouter les contraintes concurrentielles. Il y a une forte tendance du marché à développer des systèmes dit « intelligents ». Ils doivent être « connectés » et pilotable ou capable de s'autogérer. Derrière ces systèmes se cache l'implémentation de capteurs et d'unités de calculs pour traiter les données. Dans un objectif de compétitivité, il y a une demande de réduction du nombre de composants additionnels (circuits électroniques et capteurs), de l'espace mémoire nécessaire et des ressources de calculs.

Parmi les composants de base de l'électronique de puissance sujets aux défaillances, il y a les condensateurs et, plus particulièrement, les condensateurs à films métallisés. Très largement utilisés par les industriels, ils se retrouvent notamment dans les convertisseurs de puissance. Plus spécifiquement, les produits de Schneider Electric concernés sont les condensateurs de correction de facteur de puissance de la gamme Varplus, les alimentations sans interruption (ASI) et les variateurs de vitesse. Les condensateurs à films métallisés sont utilisés dans ces convertisseurs en tant que filtre d'entrée pour éliminer les interférences électromagnétiques et/ou en tant que filtre de sortie pour filtrer la tension découpée par les onduleurs. A travers leur fonction principale de filtrage, ils contribuent à limiter les pertes des systèmes. Leur défaillance soudaine peut mener à des conséquences désastreuses, allant de l'explosion aux départs de feu. La fréquence des pannes, leur potentielle gravité et l'insuffisance des solutions existantes pour y remédier justifient l'étude de leur vieillissement.

Un premier verrou scientifique se situe aux niveaux des lois de vieillissement. Les plus utilisées nécessitent d'effectuer au préalable des essais de vieillissement accélérés afin d'identifier leurs paramètres et de permettre leur extrapolation. Les coefficients empiriques de ses lois sont coûteux à obtenir et ne sont pas robustes à un changement de contraintes ou de fabricants. Un deuxième verrou est le caractère imprévisible des défaillances soudaines.

Afin de répondre à toutes ces problématiques, cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un contrat CIFRE entre Schneider Electric et le laboratoire Ampère, UMR CNRS 5005.

Il s'agit en premier lieu d'approfondir les connaissances actuelles sur le processus de dégradation des condensateurs à films métallisés. Ensuite, il s'agit d'évaluer les méthodes existantes pour estimer leur durée de vie restante en fonctionnement et d'en proposer de plus robustes. Enfin, une étude doit être menée sur la prédiction et la prévention des défaillances soudaines.

Le principe des condensateurs à films métallisés et leurs mécanismes de défaillances sont décrits dans le premier chapitre. Il sert de base pour définir tous les termes. Le second détaille les enjeux et les verrous scientifiques autour de l'étude de leur vieillissement. Il comporte un état de l'art des méthodes de surveillance des indicateurs de santé, des méthodes de prédiction de la durée de vie restante et des solutions mises en place pour assurer la sécurité de fonctionnement.

Les troisième et quatrième chapitres présentent les essais de vieillissement accéléré qui ont été menés ainsi que les résultats obtenus. Le troisième chapitre se focalise sur les conséquences d'un vieillissement avec des conditions de tension alternative et température fixes. Une loi de vieillissement basée sur la modélisation de l'impact des auto-cicatrisations sur la capacité et la résistance de métallisation est présentée. Le

quatrième chapitre présente les conséquences d'un vieillissement en conditions de tension alternative, température et humidité. Une loi de vieillissement basée sur la modélisation de l'impact de la corrosion sur la capacité est présentée. Les deux modèles sont évalués au regard des lois existantes et de leur portée prédictive.

Le quatrième chapitre comporte une étude sur les défaillances catalectiques par claquage thermique. Le phénomène est suivi et analysé. Des indicateurs précurseurs sont mis en lumière. Ils donnent lieu à une méthode de prévention des dégâts occasionnés par les claquages thermiques présentée dans le chapitre cinq.

Chapitre 1 Présentation des condensateurs à films métallisés

1.1 Généralités sur les condensateurs

1.1.1 Principe

Un condensateur est un composant électronique composé de deux armatures conductrices constituant (hors condensateurs électrolytiques) les électrodes, séparées par un matériau diélectrique. Un diélectrique est un isolant polarisable : un matériau non-conducteur qui possède la propriété d'acquies des dipôles électrostatiques et de les orienter en présence d'un champ électrique. Cette propriété donne aux condensateurs leurs fonctionnalités. Elle leur permet de stocker des charges électriques et d'être utilisés entre autres dans des applications de filtrage.

Les dipôles électrostatiques sont formés par un changement de la répartition des charges électriques au sein du matériau, appelé polarisation. Physiquement, la polarisation peut être électronique, atomique, interfaciale ou dite d'orientation. Elle se caractérise respectivement par la déformation des nuages électroniques, le déplacement des atomes au sein de la structure moléculaire du diélectrique, le déplacement de charges électriques à l'interface des domaines du matériau de conductivité et permittivité différentes, ou bien la réorientation de dipôles électrostatiques déjà existants. Plusieurs types de polarisation peuvent cohabiter au sein d'un même matériau [6].

La fréquence d'orientation des dipôles électrostatiques est limitée au temps minimum nécessaire à leur polarisation. Au-delà, l'alignement des dipôles ne sera plus assez rapide pour suivre les changements de polarité de la tension. Cette fréquence maximale dépend directement du type de polarisation du diélectrique. Au niveau des ordres de grandeurs cette fréquence est aux alentours de 10^{15} Hz pour la polarisation électronique, 10^{12} Hz pour la polarisation atomique, 10^5 Hz pour la polarisation d'orientation et 10^{-1} à 10^{-2} Hz pour la polarisation interfaciale [6].

Le retard de polarisation dû à l'orientation des dipôles se nomme la relaxation diélectrique. Parfois le terme équivalent « d'absorption diélectrique » est utilisé. Une mesure indirecte de la relaxation diélectrique est le pourcentage de la tension originelle qu'un condensateur peut retrouver après une brève décharge, les dipôles ne s'étant pas complètement dépolarisés [7].

La sensibilité d'un milieu face à un champ électrique est quantifiée par une grandeur appelée permittivité. Dans un milieu isotrope, c'est une grandeur scalaire. Plus elle est haute, plus la répartition des charges électriques du milieu est impactée par l'apparition d'une tension. Par défaut, dans le vide, elle est fixe et vaut ϵ_0 . Dans un milieu isotrope et linéaire, l'induction électrique ou déplacement électrique \vec{D} produit par un champ électrique \vec{E} ainsi caractérisée par la permittivité selon l'équation suivante :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (1-1)$$

avec ϵ_r la permittivité relative du milieu.

En supposant que le champ électrique appliqué sur le diélectrique est effectivement le champ électrique local ressenti par chaque dipôle électrostatique [8], ϵ_r la permittivité relative du milieu est directement liée à sa polarisabilité selon l'équation suivante [9] :

$$\epsilon_r = 1 + \frac{A}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (1-2)$$

A étant un coefficient de proportionnalité lié à la densité des molécules au sein du diélectrique, n le nombre de type de polarisation et α_i la polarisabilité du matériau selon un type i de polarisation. La permittivité relative d'un matériau dépend donc de la fréquence.

On appelle susceptibilité diélectrique noté χ le terme $\frac{A}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \alpha_i$ afin de définir la polarisation \vec{P} dans un milieu diélectrique linéaire et isotrope par la relation suivante :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1-3)$$

Dans un milieu anisotrope, χ et ϵ_r sont des tenseurs [10].

On distingue les diélectriques dits linéaires, paraélectrique et ferroélectrique selon la relation qui relie \vec{P} à \vec{E} [9], [11]. Après, une première excitation, en absence d'un champ électrique, les diélectriques ferroélectriques présenteront une polarisation rémanente [12] à la différence des autres.

La polarisabilité des diélectriques est la propriété leur permettant de maintenir une tension même après la disparition de sa source. Cette tension est cependant limitée par la rigidité diélectrique de l'isolant. La rigidité diélectrique est définie comme la valeur maximale de tension qu'il peut supporter sans devenir lui-même conducteur.

Ainsi lorsqu'on applique un champ électrique aux bornes des armatures d'un condensateur, les molécules, voire les atomes, constituants du diélectrique se polarisent en direction du champ. Cette polarisation induit à son tour un champ électrique inverse dans le diélectrique permettant de stocker des charges électriques dans les armatures. Ces charges sont de valeurs opposées d'une armature à l'autre.

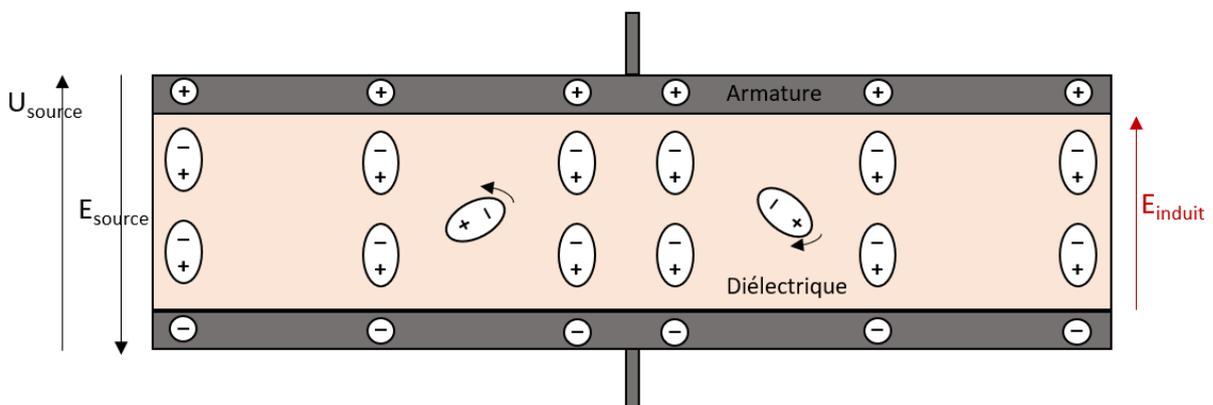


Figure 1-1 : Mécanisme de polarisation au sein d'un condensateur

Si le champ électrique initial disparaît, sans chemin conducteur pour les évacuer, les charges restent piégées. La polarisation est entretenue au sein du diélectrique. Le condensateur reste chargé. Au contraire, si un chemin conducteur lie les deux armatures,

les charges s'évacuent : le condensateur se décharge. En conséquence, le diélectrique se dépolarise.

La nature isolante du diélectrique bloque les courants continus quand les courants alternatifs passent du fait de sa polarisation. Les déplacements des charges électriques sont transmis d'une armature à l'autre et non les charges elles-mêmes.

Les condensateurs sont caractérisés par une grandeur appelé capacité C . Il s'agit d'une mesure de leur aptitude à stocker des charges électriques q en fonction de la tension U à leurs bornes. Elle s'exprime selon l'équation ci-dessous :

$$C = \frac{q}{U} \quad (1-4)$$

D'où :

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt} \quad (1-5)$$

i étant le courant traversant le condensateur.

La capacité est également fonction de la géométrie du condensateur. Deux d'entre elles sont présentées sur la figure ci-dessous :

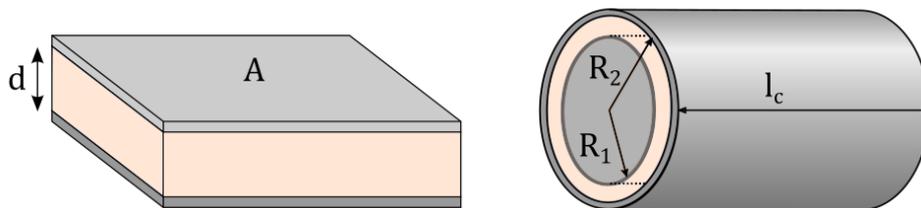


Figure 1-2 : Condensateur plat et condensateur cylindrique

Pour un condensateur à armatures plates, la capacité dépend de la surface des électrodes A , de la distance entre-elles d , de la permittivité du vide ϵ_0 et de la permittivité relative du diélectrique ϵ_r selon l'équation ci-dessous :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1-6)$$

Pour un condensateur cylindrique, la capacité est dépendante de la permittivité du diélectrique $\epsilon_0 \epsilon_r$, du rapport entre les rayons des deux électrodes R_1/R_2 et de la longueur du cylindre l_c selon l'équation suivante :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{2 \pi l_c}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (1-7)$$

Comme la différence $R_2 - R_1$, correspondant à d , la distance entre électrodes, est petite devant R_1 , l'équation (1-7) peut être approximée par l'équation (1-6) en utilisant le développement limité suivant :

$$\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = \ln\left(1 + \frac{R_2 - R_1}{R_1}\right) \approx \frac{R_2 - R_1}{R_1} \quad (1-8)$$

L'énergie électrostatique stockée par le biais des charges électriques E_{stock} s'exprime selon l'équation ci-dessous :

$$E_{\text{stock}} = \frac{1}{2} C U^2 \quad (1-9)$$

1.1.2 Types de condensateurs et leurs applications

Les condensateurs se différencient selon la nature de leur diélectrique. Leurs caractéristiques les amènent à les spécialiser selon le type d'application recherché [12]. Les plus utilisés industriellement sont les condensateurs films, les condensateurs électrolytiques et les condensateurs céramiques. Cependant, il est aussi possible de trouver des condensateurs au mica, verre, papier voire à air [13].

Les ordres de grandeurs de leurs principales caractéristiques sont présentés dans le tableau 1-1 [14]. La figure 1-3 présente la gamme de capacité selon les niveaux de tensions pour chacune de ces technologies.

Condensateur	Diélectrique	Permittivité relative ϵ_r , à 1 kHz et 20°C	Rigidité diélectrique (kV/mm)	Facteur de pertes $\tan\delta$ à 1 kHz ($\times 10^{-3}$)	Résistivité ρ ($\Omega.cm$)	Température maximum d'utilisation T_{max} (°C)	Epaisseur minimum (μm)	
Céramique, mica, verre	Mica	6-8	200-240	0.5-2	10^{15} - 10^{16}	250	8-10	
	Verre	7-20	300-400	10-20	10^{13} - 10^{14}	400	50-300	
	Céramique	6-25000	3-150	0.1-20	10^7 - 10^{13}	85-300	2-300	
Film	Papier	2-6	60	0.5-10	10^7	105	5-14	
	Plastique	PET	3.3	295	4-5	10^{17}	125	0.7
		PEN	3	470	6	10^{18}	135	1.2
		PP	2.2	300	0.1	10^{15}	110	3
		PPS	3.1	300	0.5	10^{16}	175	1.2
Electrolytique	Oxyde d'alumine	10	700	100	10^9	105	1.4 nm/V	
	Oxyde de tantale	27	800	10-100	10^9	175	1.4 nm/V	

Tableau 1-1 : Ordre de grandeur de différentes caractéristiques des types de condensateur [13], [14]

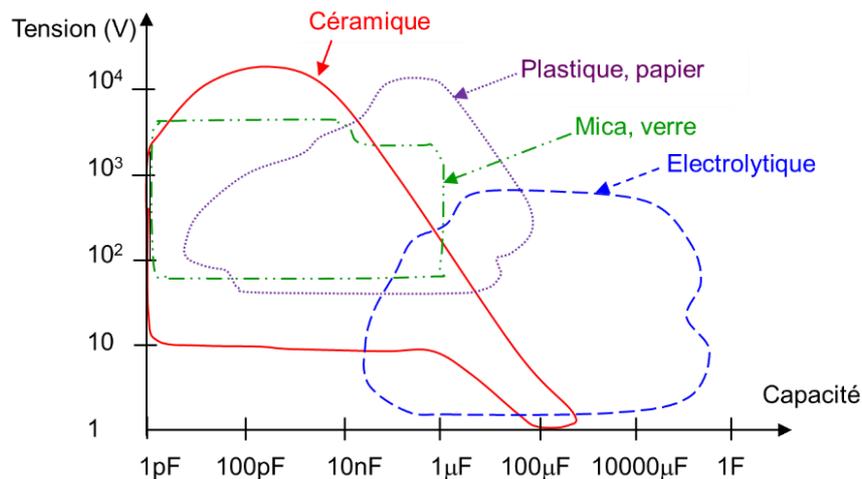


Figure 1-3 : Gamme de capacité et tension selon les types de condensateurs [13]

Les condensateurs électrolytiques sont des condensateurs dont une électrode est composée d'une armature métallique et d'un électrolyte. La seconde est constituée d'une armature métallique, souvent du tantale ou de l'aluminium. Le diélectrique est formé par réaction chimique entre cette dernière et l'électrolyte lors d'une première mise sous tension [15]. Ce sont donc des condensateurs polarisés ne fonctionnant que sous une tension strictement positive. La faible épaisseur de leur diélectrique leur permet d'obtenir des valeurs élevées de capacité par unité de volume. Leur résistance interne comporte la résistance de l'électrolyte. De fait, elle est relativement plus élevée que les autres types de condensateur et leurs pertes sont plus importantes. Ils sont utilisés majoritairement pour lisser des tensions de bus DC, dans les applications demandant un fort stockage d'énergie transitoire comme les alimentations à découpages par exemple [16]. Les condensateurs électrolytiques sont sensibles à la température et à la tension.

Les condensateurs dont le diélectrique est de la céramique, ont un faible coût, une petite taille et une aptitude à garder leur comportement capacitif jusqu'à de hautes fréquences. Ils peuvent être séparés en deux classes : les céramiques avec un comportement diélectrique linéaire, typiquement de diélectrique COG et les céramiques avec un comportement diélectrique non-linéaire (généralement ferroélectrique), typiquement de diélectrique X5R, X7R ou X8R (cf. annexe A) [17], [10]. Les premiers sont très stables en température et en fréquence. Leurs pertes sont faibles. De ce fait, ils sont utilisés dans les circuits requérant une faible variation de la capacité dans le temps : typiquement les filtres à bande passante stable, les circuits oscillants. Les seconds, du fait de leur nature ferroélectrique ont une haute permittivité mais de fortes pertes diélectriques et une capacité dépendante de la température et de la tension. On les utilise plutôt sous de faibles tensions pour filtrer, coupler ou découpler [12].

Ils sont très sensibles aux contraintes mécaniques [10].

Les condensateurs films ont un diélectrique constitué d'un film plastique, souvent du polyester ou du polypropylène. Leurs électrodes sont constituées de métaux tel que le zinc ou l'aluminium. Leur capacité est stable en fréquence. Ils possèdent de faibles pertes.

On peut distinguer deux grandes catégories de condensateurs films selon l'épaisseur de leurs électrodes : les condensateurs à films et feuilles et les condensateurs à films métallisés. Les premiers sont constitués de feuilles métalliques posées sur des films plastiques. Les seconds sont constitués de films plastiques sur lesquelles a été déposée

une fine couche de métal par projection. La technologie des premiers leur permet de supporter de plus forts courants grâce à la plus faible résistance de leurs électrodes. Les seconds sont plutôt utilisés sous de fortes tensions pour leur fiabilité accrue. La faible épaisseur de leur métallisation entraîne des propriétés d'auto-cicatrisation (cf. 1.4.2).

De ce fait, les condensateurs films sont plutôt utilisés en tant que filtre sous de hautes tensions AC. Par exemple, on les retrouve dans les filtres d'entrée de redresseur et sortie d'onduleur ou dans des bancs de correction de facteur de puissance.

Ils peuvent cependant aussi être utilisés dans des circuits résonants, des applications de filtrage, en tant que « snubber » pour limiter les pertes à la commutation des transistors, pour stocker de l'énergie et la restituer sur du court terme ou en tant que pont diviseur [7], [18].

1.1.3 Circuit électrique équivalent

En pratique un condensateur n'est jamais idéal. Il possède des pertes et la polarisation de son diélectrique est limitée en fréquence. Il faut donc en tenir compte dans sa représentation pour prédire son comportement.

Le terme d'ESR (Equivalent Series Resistance) est usuellement employé pour représenter toutes les pertes. Il représente la résistance série équivalente du condensateur et constitue la partie réelle de l'impédance complexe. Toutes les fuites dues aux inductances parasites sont regroupées par l'ESL qui constitue l'inductance série équivalente.

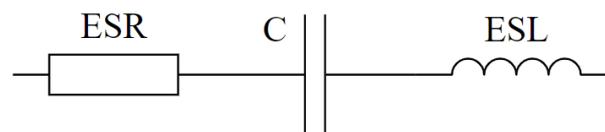


Figure 1-4 : Circuit électrique équivalent normalisé d'un condensateur

La partie imaginaire ou réactance X_s du condensateur est caractérisée par l'équation ci-dessous :

$$X_s(\omega) = ESL \omega - \frac{1}{C \omega} \quad (1-10)$$

ω étant la pulsation électrique de la tension aux bornes du composant.

La fréquence de résonance du condensateur est définie comme la fréquence à laquelle sa partie inductive compense sa partie capacitive. Le courant est alors maximum. Elle est égale à $\frac{1}{2\pi\sqrt{ESL C}}$. Au-delà, le composant devient majoritairement inductif.

L'ESR du condensateur représente les pertes répertoriées ci-dessous.

Premièrement, il y a des pertes dues à la résistance même de son diélectrique R_{is} .

Ensuite, il y a des pertes dues à la polarisation du diélectrique. Elles peuvent être représentées par des circuits RC connectés en parallèle [18]. Chaque circuit $R_{pol} C_{pol}$ correspond alors à un type de polarisation présent dans le diélectrique. Chaque capacité C_{pol} comprend uniquement la permittivité liée à la polarisation considérée et est associée avec une résistance R_{pol} pour caractériser une constante de temps. La seule exception est

la capacité associée au vide C_{vide} . Sa résistance R_{pol} est nulle. La capacité réelle C du condensateur devient donc la capacité équivalente de toutes les capacités C_{pol} en parallèle et de C_{vide} .

Enfin, il y a les pertes dues à la résistance des électrodes et de leurs connexions R_s . Ces dernières possèdent une inductance L . L'effet de peau peut être représenté par une résistance R_l parallèle à cette dernière.

Un condensateur idéal dissipe une énergie purement réactive. Pour caractériser les pertes, une grandeur appelée facteur de pertes $\tan \delta$ est définie selon l'équation ci-dessous :

$$\tan \delta = \frac{ESR}{X_s} = \frac{1}{\tan(\varphi)} \quad (1-11)$$

où φ est le déphasage du courant par rapport à la tension du condensateur.

Le facteur de pertes $\tan \delta$ du condensateur contient à la fois le facteur de pertes par polarisation $\tan \delta_a$, le facteur de pertes lié à la résistance des électrodes $\tan \delta_s$ et le facteur de perte lié à la résistance du diélectrique $\tan \delta_p$ [13], [19].

Un circuit électrique équivalent est représenté sur la figure ci-dessous pour un condensateur avec un type de polarisation donné.

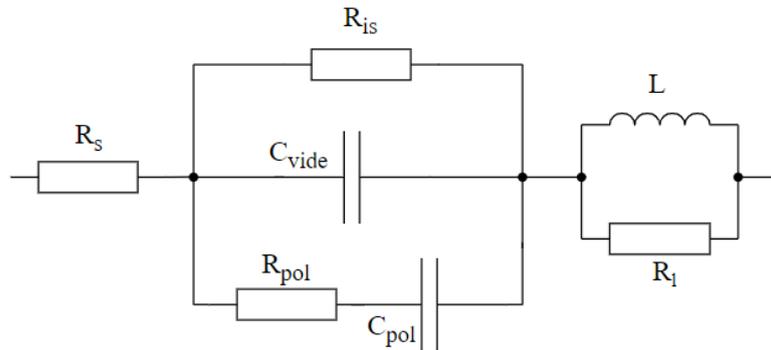


Figure 1-5 : Circuit électrique équivalent d'un condensateur

En considérant la figure 1-5, l'ESR dépend de la pulsation ω selon l'équation ci-dessous :

$$ESR(\omega) = R_s + \frac{R_{is} (1 + \omega^2 \tau_{pol} f(\omega))}{(1 + (\omega f(\omega))^2) (1 - \tau_{pol} R_{is} C_{vide} \omega^2)} + \frac{R_l (L \omega)^2}{R_l^2 + (L \omega)^2} \quad (1-12)$$

$$\text{Avec } f(\omega) = \frac{R_{is} C + \tau_{pol}}{(1 - \tau_{pol} R_{is} C_{vide} \omega^2)}, \quad \tau_{pol} = C_{pol} R_{pol}$$

$$\text{Par ailleurs : } C = C_{vide} + C_{pol}$$

A très basse fréquence (inférieure au Hz), l'ESR est représentative de la résistance du diélectrique R_{is} . A fréquence plus haute, l'impact de R_{is} sur l'ESR devient rapidement négligeable. L'effet de peau n'intervient qu'à de très hautes fréquences (après quelques

centaines de kHz). Ces ordres de grandeurs de fréquence sont donnés à titre indicatif. Ces valeurs varient avec la taille du condensateur (épaisseur et longueur des électrodes, des connectiques et du diélectrique). Ainsi aux fréquences intermédiaires, l'ESR tend vers la formule suivante (cf. figure 1-5) :

$$ESR(\omega) = R_s + \frac{\tau_{pol} \frac{C_{pol}}{C^2}}{1 + \left(\tau_{pol} \omega \frac{C_{vide}}{C} \right)^2} \quad (1-13)$$

L'impact des pertes par polarisation sur l'ESR dépend alors des fréquences de polarisation. En ne considérant qu'un type de polarisation, selon l'équation (1-13), la résistance induite est égale à une constante $\tau_{pol} \frac{C_{pol}}{C^2}$ jusqu'aux alentours de la fréquence de cette polarisation. Au-delà de cette fréquence, les pertes tendent vers 0. Selon le type de matériau diélectrique, la constante $\tau_{pol} \frac{C_{pol}}{C^2}$ peut être négligeable devant R_s . Il devient alors justifié de pas tenir compte des pertes par polarisation. C'est pourquoi aux fréquences moyennes à hautes, l'ESR est généralement représentative de la résistance de la métallisation. Elle est impactée à très hautes fréquences par l'effet de peau.

Selon le type de condensateur, spécifiquement sa géométrie et la connectique de ses électrodes, des améliorations peuvent être encore apportées au circuit électrique équivalent.

En particulier, le comportement des condensateurs films change au-delà de leur fréquence de résonance. Le couplage inductif entre les électrodes n'est plus négligeable. Il faut aussi considérer la présence de courants de Foucault. Si les champs magnétiques induits par la circulation du courant se compensent au sein du bobinage du fait des symétries, ce n'est pas le cas de ceux produits dans les terminaux (cf. 1.2.1). On observe ainsi l'apparition de boucles de courant à des fréquences spécifiques, dites d'antirésonances.

Le circuit électrique équivalent présenté sur la figure 1-5 ne prend pas non plus en compte l'hétérogénéité réelle de la répartition du champ électrique dans le condensateur. Les variations de la densité de courant, les effets de bords ou encore l'état de l'interface entre le diélectrique et les électrodes sont autant de facteurs non considérés.

Des circuits électriques équivalents comprenant ces phénomènes sont explicités pour les condensateurs à films métallisés dans les thèses de doctorat de M. Makdessi [14] et de C. Joubert [20].

1.2 Présentation des condensateurs à films métallisés

1.2.1 Structure interne

La majorité des condensateurs à films métallisés sont constitués de deux films métallisés superposés qui ont été enroulés sur un mandrin ou sur eux-mêmes. Une illustration de leur structure interne est présentée sur la figure 1-6.

Le film plastique est plus large que le dépôt métallique de telle sorte qu'un bord du film ne comporte pas de métallisation. Les films métallisés sont superposés de telle façon que ce bord sans métallisation soit situé à l'opposé d'un film à l'autre. Ainsi, lors de la

connexion des films aux extrémités de l'enroulement par pulvérisation de métal, les deux électrodes demeurent électriquement séparées. On appelle ce contact au bout du bobinage de films, le « schoopage ». Des fils métalliques y sont soudés pour former les terminaisons du condensateur. Le condensateur obtenu peut être enfin enveloppé d'une résine isolante avant d'être mis en vente sur le marché.

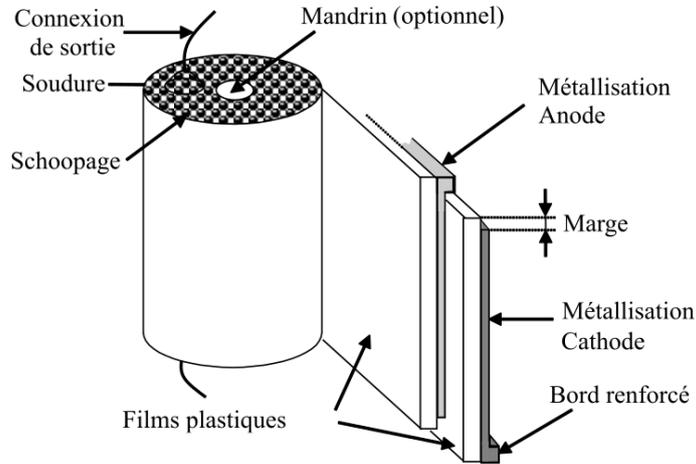


Figure 1-6 : Structure des condensateurs à films métallisés [13]

Typiquement, l'épaisseur du diélectrique des films métallisés est de l'ordre du μm . L'épaisseur de leur métallisation est 1000 fois plus petite, de l'ordre du nm . La composition des électrodes (métallisation des films) est de l'ordre de 90 à 99 % de zinc pour 1 à 10 % d'aluminium.

Il existe des variations de cette structure de base [21]. Par exemple, un film peut être métallisé sur ses deux faces et superposé à un film sans métallisation. Cela permet au condensateur de supporter de plus forts courants [14]. Il y a aussi des films métallisés arrangés de telle façon à former plusieurs condensateurs en série. Pour avoir deux condensateurs en série, un film comportant des bords sans métallisation sur ses deux extrémités est superposé avec un film comportant un espace sans métallisation en son milieu [19]. Cette configuration permet d'augmenter la tenue en tension du condensateur résultant.

Des illustrations de ces structures sont présentées sur la figure 1-7.

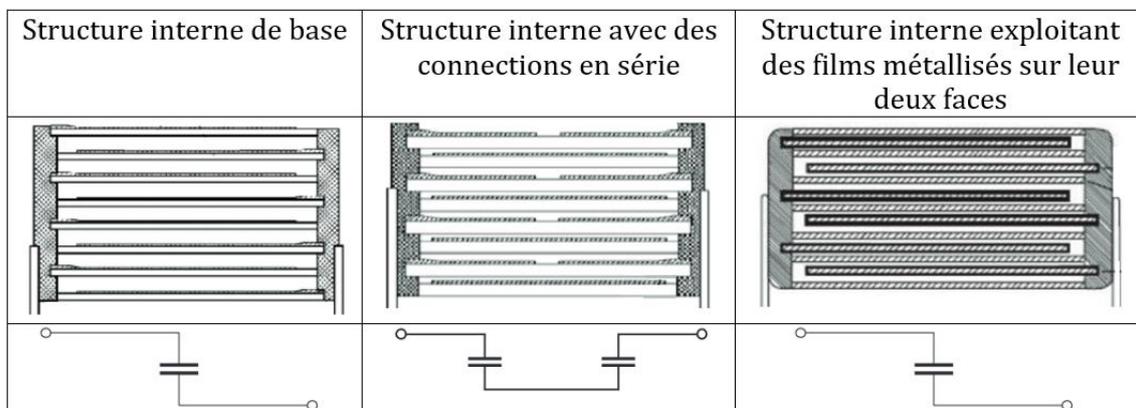


Figure 1-7 : Vue en coupe de différentes structures internes de condensateurs à films métallisés [19], [21]

Certains condensateurs ne sont pas constitués de films bobinés sur eux-mêmes mais d'une association de plusieurs films métallisés posés les uns sur les autres. Ce sont des condensateurs dit empilés (« stacked capacitors ») [19].

L'épaisseur des électrodes peut être hétérogène. Il est courant de trouver des condensateurs avec des bords de métallisation renforcés du côté de leur connexion au schoopage. Le contact y est ainsi amélioré et les forts courants induits par des impulsions de tension sont mieux supportés [14]. Outre, les bords renforcés, il existe aussi des profils d'électrodes en pente.

Également, il existe des électrodes dites « segmentées ». Ce sont des électrodes quadrillées en petites sections reliées les unes aux autres par des micro-fusibles [22]. En cas d'occurrence d'une décharge entre électrodes, la zone d'électrode perdue est limitée à la section touchée. Cette configuration permet d'améliorer la fiabilité des condensateurs. La perte de capacité en cas d'auto-cicatrisation est limitée et le risque de dégénérescence des décharges est réduit.

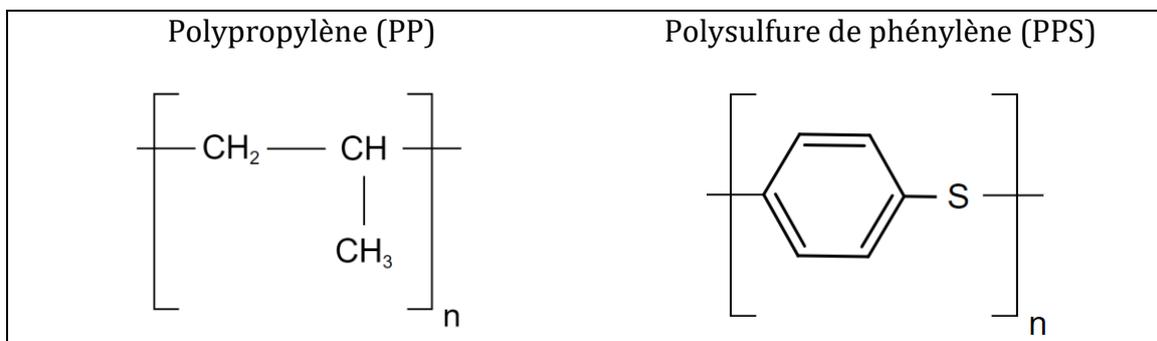
Les fabricants jouent sur ces différents paramètres (la localisation de la métallisation sur les films, leur empilement, la composition et le profil des électrodes) afin de proposer des séries de condensateurs adaptées aux profils de missions recherchés.

Le procédé de fabrication typique a été décrit en détail dans la thèse de M. Makdessi [14].

1.2.2 Types de diélectriques

Les plastiques sont des matériaux constitués de polymères liés ensemble par liaison de Van der Waals. Un polymère est une macromolécule : une molécule composée d'une succession d'une molécule unité, liées entre elles par liaisons covalentes. Cette molécule unité répétitive est appelée un monomère. Dans le cas des plastiques, le monomère est une molécule organique : elle contient au moins un atome d'hydrogène associé chimiquement à un atome de carbone. Par réactions chimiques, d'autres éléments peuvent se fixer sur cet atome de carbone.

Les plastiques les plus utilisés en tant que film diélectrique dans les condensateurs sont le polypropylène (PP), le polysulfure de phénylène (PPS) ou du polyester sous la forme de polytéréphtalate d'éthylène (PET) ou de polynaphtalate d'éthylène (PEN). La structure chimique de leurs monomères est représentée sur la figure 1-8.



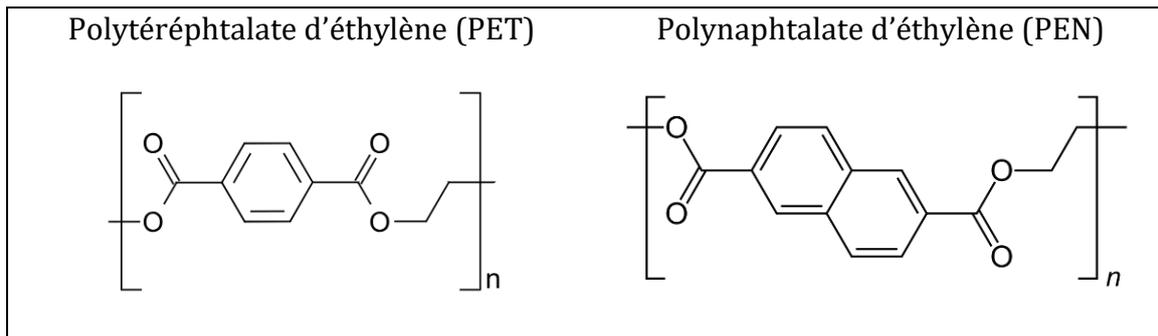


Figure 1-8 : Structures chimiques des plastiques utilisés en tant que diélectrique [23]

Les polymères peuvent présenter une polarité intrinsèque, c'est à dire posséder naturellement des dipôles électrostatiques [6], on parle alors de polymères polaires. En l'absence d'excitation électrique, la polarisation du diélectrique demeure tout de même nulle à l'échelle macroscopique car les polarisations des polymères se compensent [11].

Le PET (polyester) est un polymère polaire à cause de son asymétrie et de la présence de l'oxygène dans son monomère.

Les polymères polaires présentent une plus haute permittivité mais également de plus fortes pertes diélectriques et une moins bonne tenue en fréquence. La polarisation électronique et atomique induite par le champ électrique vient se rajouter à la polarisation induite par l'orientation des dipôles électrostatiques existants. Cependant, la réorientation des dipôles à un coût en énergie et en temps. Les pertes augmentent et la fréquence de résonance diminue [14].

Les polymères polaires sont aussi plus instables en température. L'agitation moléculaire provoquée par l'élévation de température fournira l'énergie pour rompre certaines liaisons chimiques. Leurs dipôles existants en seront affectés et avec eux, leur permittivité. Dans le cas du PET, l'orientation des dipôles sera facilitée et sa permittivité augmentera. Au contraire, l'agitation moléculaire ralentira la polarisation des polymères apolaires. Leur capacité diminuera avec la température [14].

Enfin, les polymères polaires présentent en général un taux d'absorption de l'humidité plus important. Les molécules d'eau étant polaires, elles réagissent plus facilement avec d'autres molécules polaires.

Ainsi, on comprend que le polypropylène, polymère apolaire, est intéressant pour ses faibles pertes diélectriques, sa stabilité en fréquence et en température et son hydrophobie. Le PET aura pour lui une plus grande capacité par unité de volume.

Une raison majeure de l'utilisation des autres polymères au détriment du polypropylène est sa tenue en température, la plus faible de toutes. Sa température de fusion varie entre 150 et 175°C [14].

Afin d'augmenter les propriétés des diélectriques, des traitements existent. Il s'agit d'opérations visant à augmenter leur cristallinité. Pratiquement, il s'agit d'orienter les polymères dans des directions choisies en étirant les films à une certaine vitesse sous une certaine température dans des directions précises [24]. En conséquence, leur résistance thermique, leur résistance mécanique et leur imperméabilité s'accroît. La majorité des films polypropylène sont orientés bi-axialement (BOPP) [25].

L'influence de la température et de l'humidité sur un diélectrique est quantifiée par les fabricants à l'aide de coefficients. Ils représentent respectivement la variation de capacité

sous deux températures distinctes par rapport à la capacité mesurée à 20 °C et la variation relative de la capacité pour un changement de 1% d'humidité relative à température constante [19]. Les ordres de grandeurs des caractéristiques des différents polymères sont détaillés dans le tableau 1-2 [14], [21], [26].

Leur comportement en fonction de la température et fréquence est détaillé dans de nombreux cahiers techniques de fabricants [19], [26], [27].

	PP	PET	PEN	PPS
Permittivité relative (1 kHz)	2,2	3,3	3	3
Facteur de pertes (1 kHz) (%)	0,05	0,5	0,4	0,05
Rigidité diélectrique (V/ μm)	400	280	300	220
Constante de temps ($\text{M}\Omega \times \mu\text{F}$ (s))	100 000	25 000	25 000	-
Relaxation diélectrique (%)	0,01	0,2	1,2	0,02
Coefficient en température ($10^{-6}/\text{K}$)	-250	+600	+200	-
Coefficient en humidité ($10^{-6}/\%RH$)	40-100	500-700	700-900	-
Absorption d'humidité (%)	0,01	0,4	-	-
Température minimum (°C)	-55	-55	-55	-55
Température maximum (°C)	105	125	125	125
Température de fusion (°C)	178	254	266	283

Tableau 1-2: Comparaison des propriétés de différents diélectriques

1.3 Méthodes de caractérisation

La caractérisation consiste à déterminer les propriétés d'un composant. Elle est obtenue par l'étude de son comportement sous différentes contraintes. En pratique, pour un condensateur, elle consiste en la mesure de son impédance.

Effectuée sous différentes fréquences, elle permet d'identifier les différents éléments constitutifs de son circuit électrique équivalent.

Effectuée sous des contraintes en température, humidité ou tension, elle permet d'en quantifier les influences sur les éléments pré-identifiés.

Effectuée au cours du temps, elle permet de décrire l'effet du vieillissement.

Avoir connaissance des caractéristiques d'un composant est utile à différentes étapes de son cycle de vie. Cela permet en outre de valider la conception, d'améliorer les procédés de fabrication, de permettre un dimensionnement des systèmes, ainsi que de suivre son état de vieillissement.

1.3.1 Caractérisation fréquentielle

Une méthode très commune de caractérisation est de soumettre le composant à une excitation en tension de faible amplitude U_{exc} sur une plage de fréquences et d'en mesurer le courant sortant I_{mes} . Selon la nature du composant, il peut être plus pertinent d'effectuer l'excitation avec du courant et de mesurer la tension. Les signaux sont ensuite exploités pour déterminer son impédance.

Les circuits électriques permettant d'effectuer cette mesure sont multiples. Parmi les méthodes les plus utilisées, il y a celle par pont de mesure d'impédance, la méthode de résonance, les mesures par méthode I-V ou RF I-V, la méthode de l'analyseur de réseau ou la méthode de mesure par pont auto-équilibré [28]. Les circuits les plus pertinents pour une application dépendront de la précision dans la gamme de fréquence souhaitée. Jusqu'à 120 MHz, la mesure par pont auto-équilibré semble la plus adaptée d'après les fabricants [29].

Afin de séparer la partie réelle de la partie imaginaire, il est commun d'effectuer une démodulation cohérente en quadrature (IQ) [30]. La méthode repose sur les propriétés orthogonales du cosinus et du sinus pour séparer le déphasage φ de la composante temporelle du signal mesuré [31]. En pratique, le signal mesuré est multiplié à la fois par un signal synchronisé en fréquence et en phase et par un signal synchronisé en fréquence et en quadrature de phase. A titre illustratif, une possibilité de ce calcul est proposée ci-dessous :

$$\text{Soit } I_{\text{mes}}(t) = I_{\text{max}} \cos(\omega t - \varphi) \text{ et } U_{\text{exc}}(t) = U_{\text{max}} \cos(\omega t) \quad (1-14)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{\text{mes}}(t) U_{\text{exc}}(t) = \frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}}}{2} [\cos(\varphi) + \cos(2\omega t - \varphi)] \\ I_{\text{mes}}(t) U_{\text{exc}}(t - \frac{\pi}{2\omega}) = \frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}}}{2} [\sin(\varphi) + \sin(2\omega t - \varphi)] \end{cases}$$

Un filtre passe-bas permet ensuite d'isoler la composante continue des deux signaux obtenus. Il s'agit ici des termes $\frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}}}{2} \cos(\varphi)$ et $\frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}}}{2} \sin(\varphi)$. Il suffit ensuite d'appliquer la racine carrée à la somme des carrés des composantes continues pour remonter jusqu'au module de l'impédance et de leur appliquer la fonction arctan pour obtenir la phase. Le détail des équations est explicité ci-dessous :

$$\begin{cases} |Z| = \frac{U_{\text{max}}^2}{2 \sqrt{\left(\frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}} \cos(\varphi)}{2}\right)^2 + \left(\frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}} \sin(\varphi)}{2}\right)^2}} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{\frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}} \sin(\varphi)}{2}}{\frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}} \cos(\varphi)}{2}}\right) \end{cases} \quad (1-15)$$

La méthode est récapitulée sur le schéma bloc ci-dessous :

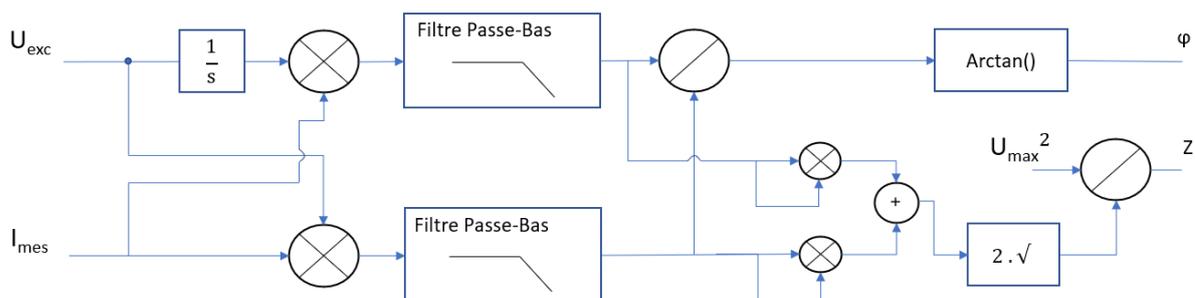


Figure 1-9 : Schéma bloc du principe de détection synchrone

Il convient de rappeler que l'amplitude du signal d'excitation U_{\max} est connue.

Pour un condensateur le comportement capacitif prédomine, en particulier à basse fréquence. Sa partie réelle est négligeable devant sa partie imaginaire.

Or plus φ tends vers $-\frac{\pi}{2}$, plus $\tan(\varphi)$ tends vers $-\infty$, plus les erreurs de mesure impactent sensiblement la valeur du déphasage obtenue avec la fonction arctan, et avec, l'ESR. Des imprécisions sont donc à prévoir sur certaines gammes de fréquences avec cette méthode.

Afin de s'affranchir de l'impédance des connectiques sur la mesure de tension et gagner en précision, la mesure se fait via la méthode des 4 points. Le courant est mesuré via le circuit d'alimentation quand la tension est mesurée au plus près des bornes du composant. Le principe est illustré sur la figure ci-dessous :

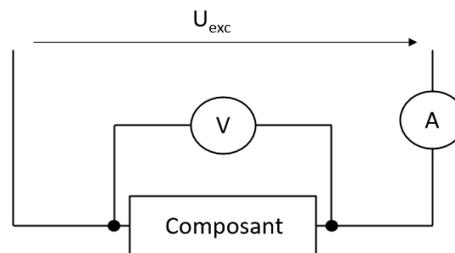


Figure 1-10 : Principe d'une mesure 4-points

L'impédance du circuit de mesure de tension doit être très élevée de manière que le courant y circulant soit négligeable face au courant généré par la tension d'excitation [32]. Le courant reste affecté par la résistance des fils. C'est pourquoi il est nécessaire de calibrer l'appareil à chaque mesure afin d'effectuer une compensation.

1.3.2 Caractérisation en tension DC

La résistance d'isolement du condensateur est obtenue avec l'application d'une tension DC. Selon le temps d'exposition, le courant mesuré sera composé d'une combinaison du courant de charge capacitive, du courant d'absorption et du courant de fuite [33].

Le courant de charge capacitive est le courant correspondant à la charge de la capacité C_{vide} d'un condensateur.

Le courant d'absorption est le courant correspond au retard de l'orientation des dipôles électrostatiques. Son temps de stabilisation dépend des constantes de temps des différentes polarisations. Il comprend également la décharge des charges électriques piégées dans les impuretés du diélectrique. Leur constante de polarisation est de l'ordre de celle de la polarisation interfaciale [8], [10]. Ainsi, le courant d'absorption peut nécessiter plusieurs minutes avant d'être négligeable.

Le courant de fuite est enfin le courant traversant le diélectrique, dit courant de conduction. Il est stable dans le temps. Il est uniquement dû à la résistance du diélectrique R_{is} .

Ces courants étant très faibles, la mesure est très sensible aux perturbations.

Les courants de fuite dus aux contaminants superficiels peuvent s'ajouter au courant de fuite traversant le diélectrique. Dans le cas de condensateurs, il peut s'agir du courant traversant leur résine isolante ou leur boîtier. Pour réduire au maximum ces courants

parasites, il est recommandé d'utiliser une borne de garde si la configuration du composant ou du circuit le permet. Il s'agit d'un connecteur qui fera office de shunt, connecté à la surface problématique et à une borne de mesure ou à la terre [33].

Ensuite, des perturbations peuvent venir de l'environnement du circuit de mesure. Les ondes électromagnétiques rayonnées induisent des courants AC résiduels. Il est également recommandé d'éviter la présence de matériaux isolants à proximité du circuit de mesure [34]. Ils peuvent être le siège de champs électriques statiques perturbateurs. Un blindage du circuit de mesure relié à la terre permettra un chemin d'évacuation pour tous ces courants induits qu'ils viennent de la décharge des matériaux isolants ou des émissions rayonnées.

Enfin, il conviendra de vérifier le taux d'émissions conduites de l'appareil de mesure.

Il faut aussi noter que dans le cas d'un condensateur à films métallisés, le chemin le plus court d'une électrode à l'autre n'est pas toujours celui traversant le diélectrique [25]. Le courant de surface I_s peut ne pas être négligeable devant le courant de conduction I_{cd} du diélectrique (cf. figure 1-11).

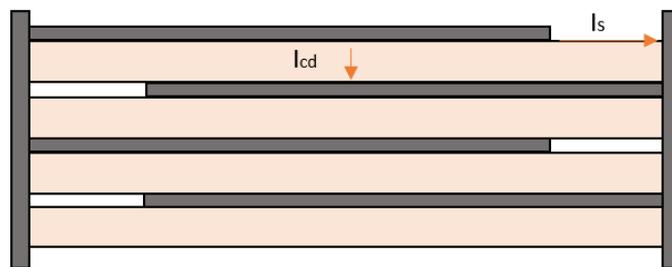


Figure 1-11 : Vue transversale d'un condensateur à films métallisés

Les caractérisations en DC contiennent donc une erreur intrinsèque dont on ne peut s'affranchir.

1.4 Processus de défaillance

Une défaillance est définie comme une perte de fonction du composant. Elle peut être partielle ou totale. On distingue ainsi deux types de défaillances :

- Les défaillances par dérives : des dégradations progressives, graduelles des indicateurs de santé du composant.
- Les défaillances catalectiques : des dégradations soudaines menant à la panne totale du composant.

Le vieillissement est une altération progressive et irréversible des propriétés d'un composant. Il résulte d'une ou de plusieurs défaillances par dérive. Il prend fin avec la panne du composant suite à une dérive trop importante, à une accumulation de défaillances par dérives ou à l'arrivée d'une défaillance catalectique.

L'accroissement du nombre de défaillances par dérives augmente la probabilité d'une défaillance catalectique. Cependant, une défaillance catalectique peut survenir à tout moment de la vie du composant.

1.4.1 Indicateurs d'état de santé

Les condensateurs sont dimensionnés sur la valeur de leur capacité. Elle détermine la fonctionnalité du condensateur. En tant que tel, c'est le premier indicateur de défaillance.

Usuellement, on considère qu'il faut remplacer le condensateur à partir d'une réduction de sa capacité de 5% à 20% de sa valeur initiale en fonction de l'usage [35], [36].

Les autres indicateurs de défaillance caractérisent les pertes du condensateur. Elles déterminent son rendement.

L'indicateur le plus utilisé est l'ESR. Parfois, le facteur de perte $\tan \delta$ lui est préféré.

La fin de vie est usuellement donnée pour un doublement, voire un triplement de sa valeur [14], [21]. Bien que cela ne soit pas toujours indiqué, ces indicateurs sont usuellement considérés pour une fréquence de 1 à 100 kHz [37]. A ces fréquences, l'ESR est généralement représentative de la résistance de la métallisation.

En considérant uniquement la résistance du diélectrique, la fin de vie est admise pour une diminution de 50% à 98,5 % de sa valeur initiale selon les auteurs et les applications [38], [21].

1.4.2 Défaillances par dérive

1.4.2.1 L'auto-cicatrisation

L'auto-cicatrisation est le nom donné à une décharge électrique entre électrodes qui ne s'auto-entretient pas. Ce phénomène est possible grâce à la faible épaisseur des électrodes (~nm) qui font office de fusible. Les défauts du diélectrique s'éliminent d'eux-mêmes.

Les décharges résultent de la présence d'une impureté dans le diélectrique, d'une diminution locale de la rigidité diélectrique ou d'un excès d'énergie dû à une surtension ou à une sur-température [14]. La chaleur générée par la décharge sublime la métallisation au point d'impact. Les impuretés sur son passage sont détruites. Privée d'un chemin conducteur pour l'entretenir, la décharge finit par s'éteindre [35].

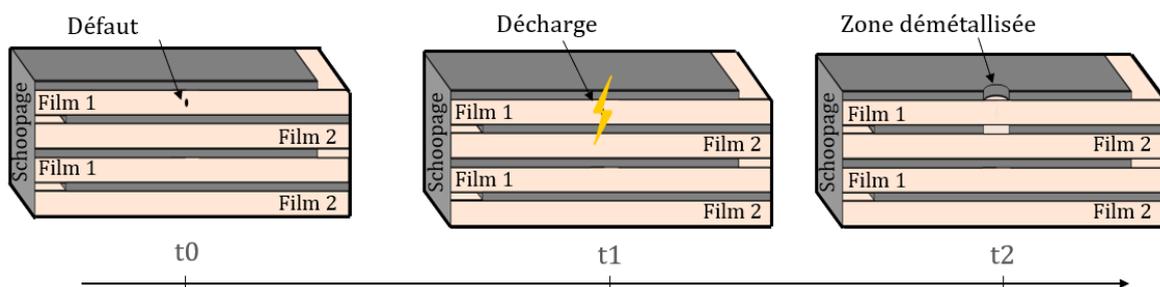


Figure 1-12 : Processus d'auto-cicatrisation

Il arrive cependant que des décharges ne s'éteignent pas d'elles-mêmes et entraînent la panne du composant. La différence réside dans l'énergie dissipée de la décharge, l'état du diélectrique et l'état de la métallisation, notamment son épaisseur. L'énergie dissipée dans une décharge E est donnée par l'équation ci-dessous [39] :

$$E = k \frac{U^{4,7} C}{\beta^{1,8} \alpha(P)} \quad (1-16)$$

U étant la tension appliquée, C la capacité du condensateur, β la résistance surfacique des électrodes, $\alpha(P)$ une fonction dépendante de la pression entre films et k une constante.

Si le phénomène d'auto-cicatrisation permet d'isoler les défauts et d'allonger la durée de vie des condensateurs, il reste un phénomène destructif. L'arc qui se forme détruit localement le diélectrique. Au point d'impact, il provoque la fonte et la rupture des liaisons des chaînes moléculaires. En réaction, le taux de carbone dans le diélectrique, élément conducteur, augmente et des gaz tels que CO, H₂, C₂H₂ et CH₄ se forment [40]. Respectivement, la résistance du diélectrique est diminuée et des impuretés apparaissent. Elles sont la source potentielle d'autres décharges. De plus, la destruction des électrodes au point d'impact diminue la capacité et augmente la résistance de la métallisation.

Visuellement, les auto-cicatrisations laissent des trous symétriques des deux côtés des électrodes. Au microscope optique, la fonte du diélectrique laisse une tache brune au point d'impact. Le phénomène est illustré sur la figure 1-13 et la figure 1-14.

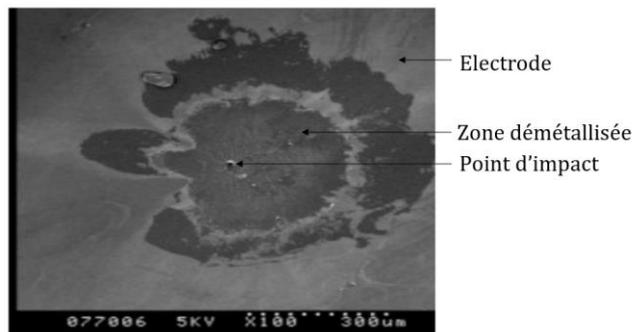


Figure 1-13 : Impact au microscope à balayage électronique d'une auto-cicatrisation [41]

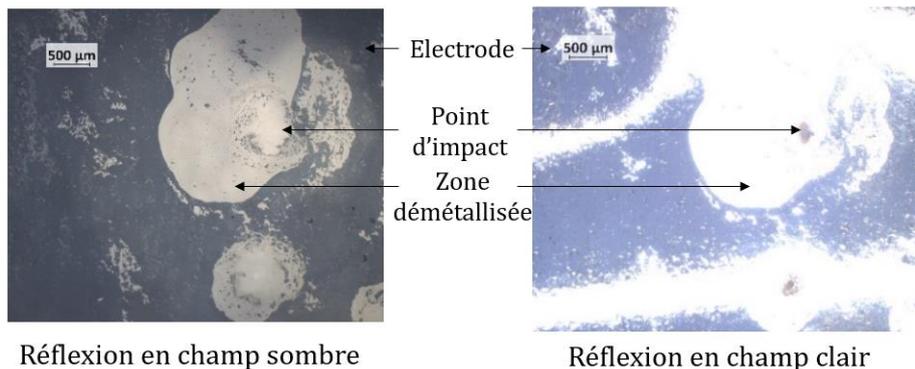


Figure 1-14 : Impact d'une auto-cicatrisation visible à l'aide d'un microscope optique sous deux éclairages différents.

Plusieurs couches de films métallisés peuvent être traversées par une même décharge. La figure 1-15 illustre ce cas de figure. Les deux films métallisés superposés l'un sur l'autre ont été déroulés pour pouvoir présenter toutes les sections traversées par l'auto-cicatrisation.

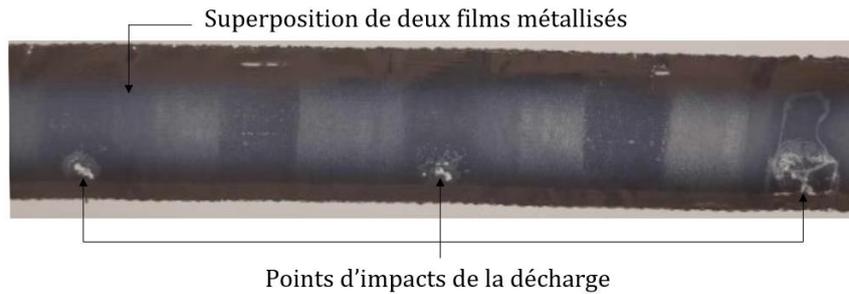
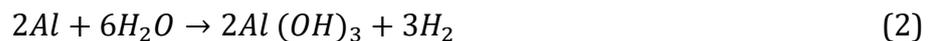


Figure 1-15 : Image d'une auto-cicatrisation ayant traversé plusieurs couches

1.4.2.2 La corrosion

La corrosion est le phénomène d'oxydation des électrodes du condensateur. Principalement composées d'aluminium et de zinc, l'humidité réagit avec ces deux éléments selon les réactions chimiques suivantes [42], [43]:



Ces réactions peuvent comporter des étapes intermédiaires faisant intervenir des ions métalliques tel que les ions Zn^{2+} ou Al^{3+} ainsi que des ions apportés par l'humidité tel que les ions HO^- et H^+

C'est un phénomène renforcé par la présence d'une tension alternative (AC). On le désignera alors sous le nom d'électro-corrosion. La tension AC permet le processus d'électrolyse, et plus particulièrement d'électrolyse de l'eau. Ces réactions caractéristiques sont décrites ci-dessous :



Une tension alternative (AC) appliquée entre les deux électrodes du condensateur va polariser le diélectrique et les interfaces entre l'humidité et la métallisation [43]. Des cellules électrochimiques se forment donc dans ces interfaces où des réactions d'électrolyses sont possibles. Par potentiel standard décroissant, les couples redox impliqués sont O_2/H_2O , O_2/HO^- , H^+/H_2 , Zn^{2+}/Zn , H_2O/H_2 , Al^{3+}/Al .

La tension AC, avec l'électrolyse, accélère la formation des réactifs tels que les ions hydroxydes (HO^-) et le dioxygène par la décomposition des molécules d'eau. Ces réactifs vont soit réagir directement avec les métaux, l'aluminium et le zinc, pour les oxyder soit subir des réactions d'oxydoréduction pour les ioniser en Zn^{2+} et Al^{3+} . Les ions réagiront ensuite avec les ions hydroxyde (HO^-) pour finalement produire les oxydes associés [44]. Si la réduction et l'oxydation des molécules d'eau ou de leur forme ionisée sont facilement

réversibles grâce à l'électrolyse, ce n'est pas le cas de l'oxydation de l'aluminium ou du zinc [43].

La couche de métal oxydé formée ralentit la vitesse de réaction. L'augmentation de son épaisseur réduit l'accès des ions hydroxyde à la métallisation. Cependant, une tension élevée génère une force électromotrice permettant aux ions de traverser la couche de métal oxydé et, ainsi, de continuer le processus de corrosion [45]. Selon la théorie de l'oxydation des métaux de Wagner [46], l'épaisseur d'un oxyde croît proportionnellement à la racine carrée du temps. L'élévation de la température a pour effet d'accélérer le processus de corrosion. Elle affecte la cinétique des réactions en augmentant l'énergie disponible à la mise en contact des réactifs et la rupture des liaisons chimiques.

Sous une tension continue (DC), le processus est ralenti. Dans la bibliographie, on donne le nom de corrosion atmosphérique pour le désigner car la réaction majoritaire est l'oxydation directe du zinc par le dioxygène, les ions hydroxydes étant moins présents [42].

Au contraire de l'auto-cicatrisation, la dégradation de la métallisation est non symétrique et progressive. Une photographie de films métallisés corrodés est présentée sur la figure 1-16. Les zones noires correspondent aux sections non touchées par la corrosion sur les deux films métallisés qui ont été superposés. Au contraire, les zones transparentes correspondent à des surfaces entièrement corrodées sur les deux films.



Figure 1-16 : Photographie de deux films métallisés superposés corrodés

Un film métallisé sain possède une métallisation qui apparaît noire, voire gris foncé. Au fur et à mesure de la corrosion, la métallisation disparaît pour laisser place à des oxydes. Plus le taux de métallisation diminue, plus la section touchée s'éclaircit. Les cellules électrochimiques forment donc des trous dans la métallisation, visibles sous la forme de tâches transparentes s'étendant au fur et à mesure du processus [45]. En résultat, la surface des électrodes diminue. La capacité diminue et la résistance de la métallisation augmente.

1.4.2.3 La fragilisation du diélectrique

Sous l'effet du vieillissement, le diélectrique se dégrade chimiquement. Sa fragilisation est caractérisée par la réorganisation de ses chaînes moléculaires et l'augmentation de ses impuretés.

Des contraintes extérieures telles que les radiations et la température vont apporter l'énergie d'activation nécessaire à la rupture de ses chaînes moléculaires [14]. Le

diélectrique se « dépolymérise ». Sa masse moléculaire diminue, ce qui entraîne une baisse de sa rigidité diélectrique [47].

D'autres mécanismes contribuent à la « dépolymérisation ».

La rupture des liaisons chimiques est une source de formations d'impuretés au sein du diélectrique. Ces impuretés peuvent se présenter sous la forme de gaz, de charges d'espaces ou de radicaux libres. Elles s'ajoutent aux impuretés infiltrées dans le diélectrique provenant de l'extérieur tels que l'humidité, le dioxygène ou des bulles de gaz (air). L'humidité et le dioxygène infiltrés entraînent respectivement l'hydrolyse et l'oxydation des chaînes moléculaires [20]. Plus les impuretés sont instables, plus forte est la probabilité de rapprochement. Par leur nature d'espèces chimiques possédant des électrons non appariés sur leur couche externe, les radicaux libres sont particulièrement instables. Ils réagiront donc au plus vite avec des éléments chimiques à proximité, i.e. le diélectrique. D'autres liaisons chimiques sont rompues. Un cercle vicieux se met en place.

La présence d'impuretés, en elle-même, entraîne l'augmentation de la conductivité au sein du diélectrique et l'apparition de décharges électriques [47]. Leur rigidité diélectrique est souvent inférieure à celle du polymère, créant des zones à risque [48].

Enfin, tous ces phénomènes entraînent une modification de l'organisation spatiale de la structure moléculaire. Des espaces vides entre molécules apparaissent [39]. Plus ces derniers sont conséquents, plus les mécanismes de dégradation s'accélèrent. Ils facilitent la diffusion des impuretés, offrent des espaces pour piéger des charges électriques et favorisent les ionisations. Plus les particules ont d'espace pour accélérer, plus elles acquerront d'énergie cinétique. Leur ionisation, i.e. la formation d'une décharge électrique, est le résultat de la dissipation de trop hautes énergies cinétiques lors des collisions [49].

La température et la tension sont donc des facteurs aggravants. Ils accélèrent les recombinaisons. La tension facilite la circulation des charges électriques et la température augmente la fréquence des interactions. Les deux facteurs augmentent l'énergie cinétique des particules, simplifiant l'ionisation des impuretés. La rigidité diélectrique du film plastique en est réduite, sa conductivité augmente [25].

1.4.3 Facteurs et interdépendance des mécanismes de défaillance

1.4.3.1 Facteurs de défaillance

Les principales contraintes agissant sur le vieillissement des condensateurs à films métallisés sont la température ambiante, le courant, l'humidité, la tension appliquée, la fréquence, ainsi que les contraintes mécaniques.

Tous ces facteurs contribuent à la dégradation du diélectrique.

La tension, le courant et la fréquence déterminent la valeur des pertes. Associés à l'effet de la température ambiante, ils contribuent à l'élévation de la température interne du composant.

L'humidité provoque la corrosion. Sa vitesse de propagation dépend de son taux, de la température du composant ainsi que de l'amplitude et la fréquence de la tension appliquée.

La tension provoque des auto-cicatrisations. L'intensité des décharges dépend de l'état du diélectrique et de la métallisation.

Les facteurs déterminant la robustesse du condensateur face à ces contraintes sont multiples eux-aussi. Certains paramètres permettent de réduire la probabilité d'occurrence d'une défaillance ou de réduire sa cinétique.

Typiquement pour ralentir le phénomène de corrosion, il est possible de jouer sur la composition et la géométrie des électrodes. Une épaisseur plus épaisse est plus robuste à la corrosion. De la même façon que pour ralentir la détérioration du diélectrique et réduire l'avènement des phénomènes d'auto-cicatrisation, il faut améliorer l'imperméabilité du condensateur aux contraintes climatiques extérieures. Cela peut être réalisée par le traitement du diélectrique (cf. 1.2.2), la présence d'une résine isolante, un boîtier plus étanche et la diminution de l'interface d'air entre deux films métallisés. Également, il faut limiter les impuretés importées lors de la fabrication des condensateurs [50]. Lors de l'assemblage et le bobinage des films métallisés, les conditions climatiques et la pression exercée doivent être contrôlées [14].

1.4.3.2 Interactions entre les mécanismes de défaillance

Les facteurs de vieillissement participent donc à plusieurs mécanismes de défaillance. Dès lors, ces mécanismes sont déjà fortement corrélés. Il convient ensuite de rajouter leurs interactions dans l'équation.

Les auto-cicatrisations fragilisent le diélectrique en contribuant à créer des impuretés.

Le vieillissement du diélectrique est un phénomène aggravant tous les autres mécanismes de défaillance. L'humidité se diffuse plus facilement et la rigidité diélectrique du film plastique diminue. La corrosion et les auto-cicatrisations futures en seront aggravées.

Enfin, tous les mécanismes accroissent les pertes du condensateur. La surface des électrodes diminue, la conductivité augmente et les dipôles électrostatiques peuvent avoir plus de difficultés à se polariser. Que les pertes proviennent de la résistance du diélectrique, des résistances de polarisation ou de la résistance des électrodes, toutes se traduisent par des pertes par effet Joule en présence d'une tension. La chaleur dissipée augmente la température interne du condensateur. Tous les mécanismes de vieillissement sont alors amplifiés.

Ces interactions renforcent la gravité et l'intensité des mécanismes de défaillances. Il se forme ainsi un cercle vicieux qui prendra fin avec la défaillance totale du composant.

1.4.4 Défaillances catalectiques

1.4.4.1 Types de claquages

Les défaillances catalectiques se caractérisent dans les condensateurs par un claquage. Un claquage survient quand l'une des limites physiques du matériau est dépassée,

affectant ses propriétés intrinsèques. On peut définir ainsi le claquage comme la rupture du composant.

Pour un condensateur cette rupture peut être d'origine mécanique, thermique ou électronique [6].

Le claquage électronique survient lorsque la tension appliquée n'est plus supportable par le diélectrique. Elle provoque l'ionisation des éléments chimiques le constituant. L'accélération des électrons par le champ électrique est telle que d'autres électrons sont libérés lors de leur collision avec des atomes. Ce phénomène est appelé l'effet d'avalanche. Le diélectrique devient conducteur.

Le claquage thermique survient à la suite du dépassement des limites en température du diélectrique. Au-delà d'une limite, la chaleur absorbée par le matériau excède la chaleur qu'il peut évacuer. Sa structure même se modifie en conséquence, devenant la place d'importantes réactions chimiques. C'est la rupture. Typiquement, elle peut se manifester par la fonte du diélectrique ou d'une explosion avec libération de gaz.

Le claquage mécanique survient à la suite d'une contrainte mécanique excessive. Cette dernière peut provenir d'une surpression externe ou interne. En interne, la surpression peut être causée par la formation de gaz par rupture des liaisons chimiques du diélectrique [51]. Elle peut également être d'origine électrostatique. La pression électrostatique P_e exercée par les électrodes sur le diélectrique est fonction de la tension appliquée U , l'épaisseur e du diélectrique et la permittivité du diélectrique $\epsilon_0 \epsilon_r$ selon l'expression ci-dessous :

$$P_e = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{1}{2} \left(\frac{U}{e} \right)^2 \quad (1-17)$$

La pression P_e tend à diminuer l'épaisseur du diélectrique. Le champ électrique s'en retrouve renforcé rétroagissant sur la pression P_e pour l'augmenter d'autant plus. Dans ce cas la rupture survient quand la résistance à la compression du diélectrique est dépassée.

Il n'est pas exclu qu'un type de claquage puisse en entraîner un autre. Typiquement un claquage électronique peut mener à un claquage thermique qui lui-même peut entraîner un claquage mécanique s'il y a une explosion.

1.4.4.2 Claquages localisés

Des claquages peuvent survenir localement dans le condensateur et ne pas se généraliser à l'intégralité du composant. Selon la zone touchée, les claquages locaux peuvent engendrer des défaillances catalectiques.

Typiquement, une auto-cicatrisation est un claquage local ne menant pas à la panne totale du composant. Cependant, si un claquage local affecte les différentes connexions entre les électrodes du condensateur, une panne en circuit ouvert peut survenir.

Les pertes ne sont pas réparties uniformément. A cause de leur géométrie, le schoopage et les terminaux du condensateur sont des zones privilégiées d'auto-échauffement. La

répartition des champs électromagnétiques à hautes fréquences y induit des fortes densités de courant [20]. Ces zones sont les premières à subir les pics de courants causés par de fortes impulsions de tension [52].

En conséquence, les soudures peuvent se décoller. Les interfaces terminaux/schoopage et schoopage/électrodes sont les plus sensibles. Un couplage thermomécanique ou électrodynamique peut également entraîner l'arrachement des liaisons [13], [18].

1.4.4.3 Emballement thermique

L'emballement thermique est le processus conduisant au claquage thermique sans l'application d'une source externe de chaleur élevée.

L'augmentation de la température menant à la fonte du diélectrique peut avoir plusieurs origines [25].

Elle peut être la résultante de la dégradation progressive du condensateur. Par les différents mécanismes de vieillissement explicités, les pertes augmentent et provoquent l'élévation de la température interne. Cette élévation aura pour effet d'accélérer tous les mécanismes de dégradation. Les pertes en seront augmentées. Un cercle vicieux se met en place. Il prendra fin avec le claquage du condensateur.

La fonte peut également être la conséquence de décharges électriques entre électrodes qui ne se sont pas auto-éliminées. Un arc traversant le diélectrique sur une longue période induit un surchauffement local du diélectrique qui mène à sa fonte. Dans le processus, des impuretés sont créées et les polymères avoisinants sont dégradés par la chaleur. Ces facteurs provoquent l'apparition d'autres décharges et ainsi de suite. La réaction s'auto-entretiendra jusqu'au claquage.

Le danger des films polymères réside dans les gaz produits lors de leur fonte. Ces gaz sont les mêmes que ceux produits lors d'une décharge lors d'une auto-cicatrisation. Ils proviennent identiquement de la rupture des liaisons chimiques des polymères. Cependant, la différence se situe dans la quantité produite qui est beaucoup plus importante pour une fusion. Par ailleurs, avec les conditions de température et pression atteintes, ces gaz peuvent se polymériser pour former d'autres espèces comme le benzène.

Ces gaz sont inflammables. Ils sont dangereux à température ambiante à partir d'une concentration minimum, appelé limite inférieure d'explosivité (LIE). En présence d'une énergie minimale d'inflammation (EMI), la quantité de gaz par volume devient suffisante pour générer un départ de feu. Cette EMI se présente le plus souvent sous la forme d'une flamme ou d'une étincelle électrique. En pratique, ils possèdent aussi une limite supérieure d'explosivité (LSE) au-delà de laquelle, la concentration de gaz est trop importante pour permettre une combustion. Au-delà d'une certaine température appelée point d'auto-inflammation, ces gaz peuvent s'enflammer spontanément sans l'apport d'une EMI.

Afin d'avoir des ordres de grandeurs, les caractéristiques d'inflammabilité pour les différents gaz produits lors de la fonte de polymère sont présentées dans tableau 1-3 [53].

Ainsi deux risques étroitement corrélés peuvent survenir à l'issue d'un emballement thermique : le risque d'explosion et le risque d'incendie [35], [52].

Espèce chimique	EMI (25°C, 1 bar)	LIE dans l'air (25°C, 1 bar)	LSE dans l'air (25°C, 1 bar)	Température d'auto-inflammation
Dihydrogène (H ₂)	17 µJ	4 %	75 %	500 °C
Monoxyde de carbone (CO)	-	12,5 %	74 %	605 °C
Méthane (CH ₄)	300 µJ	5,3 %	15 %	535 °C
Acétylène (C ₂ H ₂)	17 µJ	2,5 %	82%	300 °C
Benzène (C ₆ H ₆)	-	1.3 %	7,9%	498 °C

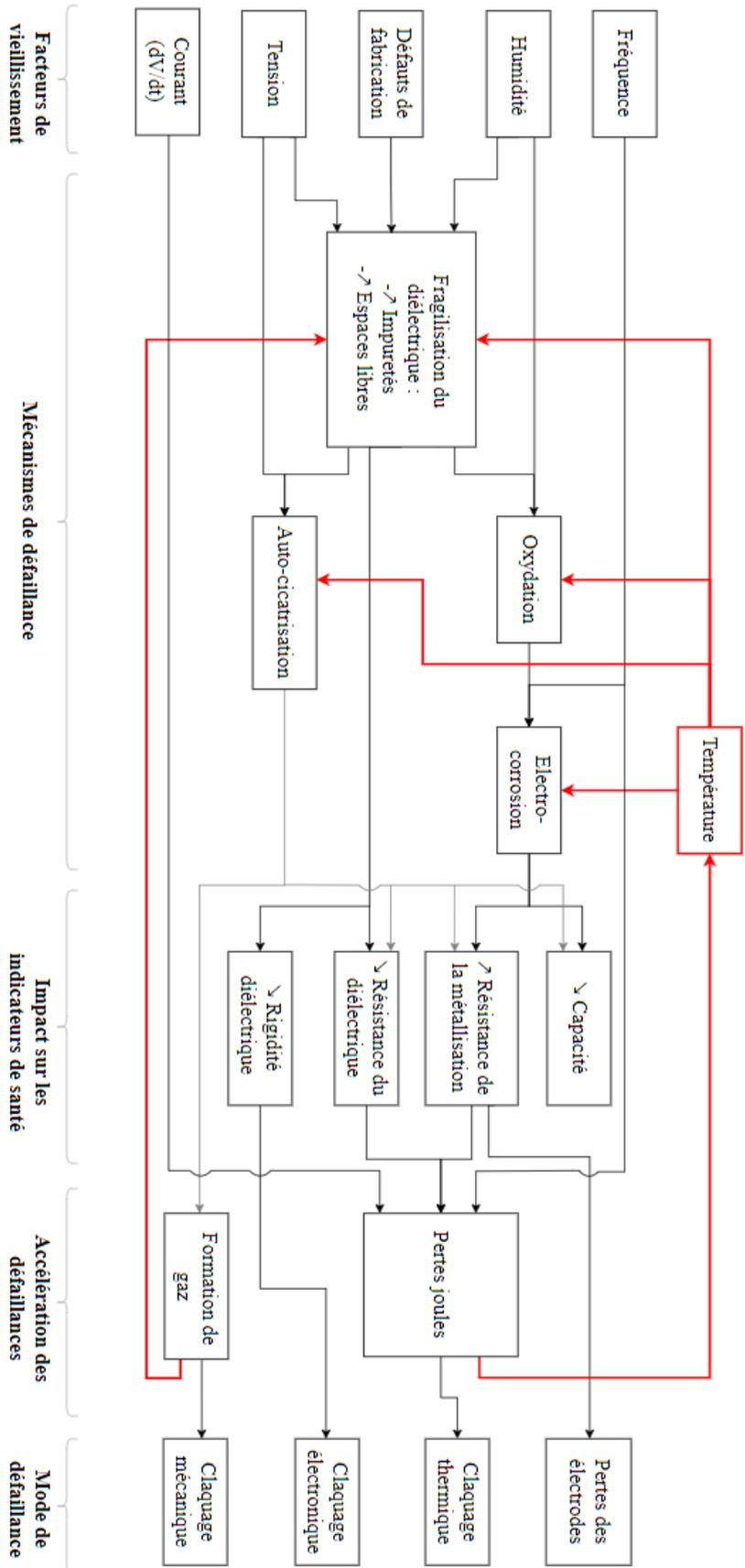
Tableau 1-3 : Grandeurs relatives à l'inflammabilité des gaz produits par la fonte des polymères

1.4.5 Modes de défaillance

La majorité des condensateurs à films métallisés atteignent les seuils usuels de fin de vie sans subir de défaillance catalectique. Au-delà, il peut finir en circuit ouvert par la perte complète de ses électrodes.

En cas de claquage, plusieurs scénarios sont possibles. Dans la littérature, il est communément admis que les claquages thermiques et électroniques mènent à un court-circuit, voir un court-circuit impédant [35], [54]. Ce point sera rediscuté en détail dans la suite du manuscrit. La rupture de ses connectiques provoque quant-à-elle une mort en circuit-ouvert.

Une synthèse du processus de vieillissement est récapitulée sur la figure 1-17.



Conclusion

Ce chapitre clôture la présentation des condensateurs à films métallisés et leurs mécanismes de vieillissement. Plus en détail, le principe et les applications type d'un condensateur ont été explicités. Les condensateurs à films métallisés ont été mis en perspective par rapport aux autres technologies existantes. Leur principal atout est leur stabilité en fréquence et leur tenue en tension. Cela les prédispose aux applications de filtrage à haute tension. Leurs caractéristiques physiques et électriques ont ensuite été décrites. Des méthodes de caractérisation de leurs paramètres ont été présentées.

Dans un second temps, l'état de l'art des processus de défaillance des condensateurs à films métallisés a été établi. Les mécanismes majeurs des défaillances par dérive sont l'auto-cicatrisation, la corrosion et la fragilisation du diélectrique. Ils affectent les indicateurs de santé principaux du condensateur que sont la capacité C , la résistance de la métallisation R_s et la résistance du diélectrique R_{is} . Ils sont dus à diverses contraintes extérieures telles que la température, la tension, le courant, la fréquence et l'humidité. A cause des facteurs partagés de vieillissement et de leur interdépendance, l'impact de chacun des mécanismes sur les indicateurs de santé est complexe à départager. Il s'agit aussi de prendre en compte leurs interactions qui mènent à des cercles vicieux. En pratique, la fin de vie des condensateurs survient avec le dépassement de seuils préétablis de leurs indicateurs de santé ou lors d'un claquage.

Chapitre 2 L'enjeu de la sûreté de fonctionnement autour des condensateurs à films métallisés

2.1 Exigences de sûreté de fonctionnement

2.1.1 Définitions des termes

La sûreté de fonctionnement d'un système est son aptitude à assurer ses fonctions sans occasionner de risques majeurs. Elle regroupe quatre notions : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité [55] :

- La fiabilité est définie comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions opérationnelles données, pendant un intervalle de temps donné. Elle est quantifiée par la probabilité de n'avoir aucune défaillance pendant une durée t donnée.
- La maintenabilité est l'aptitude du système à être maintenu ou réparé dans des conditions opérationnelles données.
- La disponibilité est l'aptitude du système à être en fonctionnement à un instant de temps donné dans des conditions opérationnelles données.
- La sécurité est l'aptitude du système à ne pas engendrer d'accidents dans des conditions opérationnelles données.

La sûreté de fonctionnement d'un système est le gage de sa qualité. C'est la fonction primordiale à assurer pour les fabricants du système, s'ils veulent fidéliser leur clientèle et maintenir leur activité.

Il y a trois approches pour maintenir en état un système : la maintenance corrective, la maintenance préventive et la maintenance prévisionnelle (dénommée aussi « maintenance prédictive » à la suite de la traduction du terme anglais).

La maintenance corrective consiste à remplacer le composant défaillant après la survenue de son défaut. L'arrêt du système n'est pas anticipé et des dommages supplémentaires peuvent être déplorés tant au niveau matériel qu'humain. Dans les applications sensibles, les risques associés à un arrêt imprévu ne sont pas tolérables. Il faut de plus ajouter au temps de réparation un temps de recherche et de localisation du défaut. Des surcoûts sont inévitablement à prévoir.

La maintenance préventive consiste à remplacer un composant après un temps de fonctionnement préétabli. Ce temps est un temps de fonctionnement calculé ou garanti par le fabricant à la suite de tests de robustesse du composant. Dans cette configuration, l'arrêt du système est prévu et son temps est maîtrisé. Cependant, l'état de santé réel du composant n'est pas pris en compte. Sa durée d'utilisation n'est pas optimisée. De plus, la couverture des défauts n'est pas totale puisque cette méthode ne protège que des défaillances dues à l'usure.

La maintenance prévisionnelle consiste à suivre l'état de dégradation du composant afin de programmer au mieux son remplacement. Il s'agit en pratique de mesurer les indicateurs de vieillissement de façon non intrusive afin de déterminer la durée de vie utile restante. Les arrêts peuvent alors être planifiés et les coûts sont optimisés. Tous les

types de défaillances sont couverts. Cette méthode requiert cependant la mise en place de capteurs et une connaissance fine du système. Elle repose sur l'évaluation de la durée de vie utile restante (RUL pour Remaining Useful Life) des composants.

2.1.2 De l'impact des défaillances des condensateurs à films métallisés sur la sûreté de fonctionnement des systèmes

Une étude en 2009 a publié les résultats d'un sondage sur un panel de 56 acteurs de l'industrie de l'électronique de puissance à propos de la fiabilité de leurs systèmes [56]. Les condensateurs, tous types confondus, ont été désignés, par 20 % des sondés, comme un des composants les plus vulnérables, à la deuxième place derrière les semi-conducteurs. D'autres études les présentent comme les composants les moins fiables responsables de 30 % des pannes [57]. Elles ont mené à l'établissement de la figure ci-dessous qui présente la distribution des composants critiques et des sources de stress dans les convertisseurs de puissance.

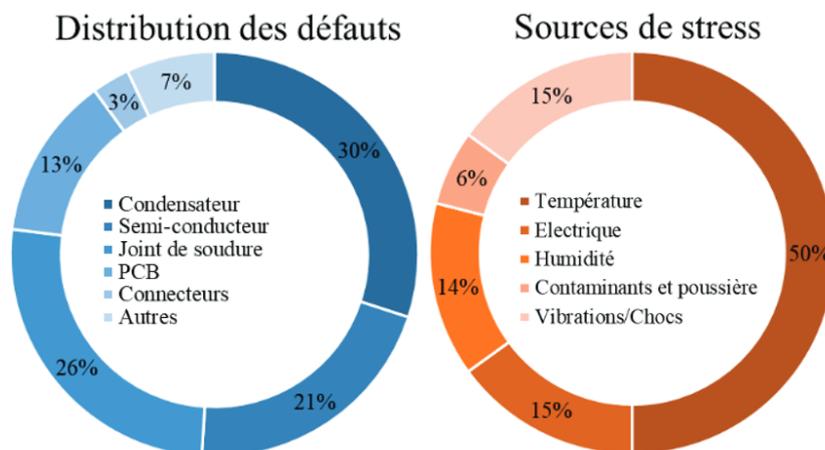


Figure 2-1 : Distribution des défauts et sources de stress dans des convertisseurs de puissance [15], [57]

La perte d'un condensateur entraîne des conséquences plus ou moins critiques selon la fonction qu'il remplit. Elle impacte soit les performances du système dans lequel il est intégré, soit sa durée de vie et peut comporter un risque pour la sécurité des personnes.

Pour un condensateur de filtrage, un défaut occasionnera des contraintes en surtension et harmoniques plus importantes sur les composants en aval. Le vieillissement de ces composants en sera alors accéléré. Pour un condensateur de stockage, une perte partielle de sa capacité entrainera une perte de son efficacité. Sa défaillance totale provoquera la panne du système. Le risque électrique pour les personnes dépendra de l'emplacement du condensateur et du type de défaillance. Par exemple, les condensateurs placés entre la terre et une phase pour filtrer le courant de mode commun ne doivent pas se retrouver en fin de vie en court-circuit.

Ces résultats prouvent la nécessité d'étudier les défaillances par dérive et catalectiques des condensateurs, afin d'améliorer la sûreté de fonctionnement des systèmes où ils sont présents. C'est ainsi l'objectif de l'entreprise partenaire de cette thèse, Schneider Electric.

Pour assurer la disponibilité, la maintenabilité et la fiabilité des systèmes de façon certaine, une maintenance prévisionnelle des condensateurs à films métallisés peut être

mise en place. A cette fin, la connaissance de leur fiabilité intrinsèque est nécessaire. Comme discuté dans le paragraphe précédent, l'optimisation des interventions en termes de temps, de coûts et de main d'œuvre pourrait potentiellement présenter un avantage économique pour les entreprises. Leur maintenabilité intrinsèque n'est pas recherchée, la disponibilité du système où ils sont intégrés sera assurée par leur remplacement. En effet, les condensateurs à films métallisés sont peu coûteux et difficilement réparables.

Enfin, la sécurité du système ne pourra être complètement couverte que si la sécurité intrinsèque des condensateurs à films métallisés est assurée. Ils doivent tomber en panne en circuit ouvert sans occasionner d'autres défauts. Les propriétés d'auto-cicatrisations permettent aux condensateurs à films métallisés d'assurer cette fonction dans la majorité des cas. Cependant le risque d'explosion ou d'incendie subsiste et est inacceptable.

Pour ces raisons, les travaux présentés dans cette thèse se focaliseront sur l'amélioration de la sûreté des condensateurs à films métallisés sur deux points en particulier : leur fiabilité et leur sécurité.

2.1.3 Contraintes inhérentes aux dispositifs de surveillance

Les dispositifs de surveillance des composants ne doivent pas interférer avec le fonctionnement du système. En plus de répondre à leur fonction première de mesure et de détection du défaut, ils doivent répondre aux exigences suivantes :

- Les circuits électroniques et les algorithmes de surveillance ne doivent pas induire de perturbations sur le système. Ils doivent être implémentés en tâche de fond.
- L'impact sur le rendement du système doit être négligeable.
- Les mesures doivent être non intrusives.

Dans un souci de compétitivité au niveau industriel, les coûts doivent être optimisés. En conséquence, d'autres contraintes s'appliquent :

- Il faut chercher à réduire le nombre de composants additionnels au système de base. Par exemple, il s'agit de mutualiser les capteurs et les circuits électroniques déjà présent et/ou les réduire au plus pertinents.
- Un juste équilibre doit être trouvé entre la quantité des mesures et la détection des défauts au niveau des ressources de calcul.
- La réponse apportée à chaque enjeu de sécurité doit être adaptée à la gravité et la probabilité du risque encouru [55].

On cherchera enfin à effectuer les mesures en temps réel pendant le fonctionnement du composant. L'objectif est de donner une prédiction de la RUL à partir des seules données des mesures effectuées (sans tests de vieillissement accélérés).

2.2 Méthodes de surveillance en ligne de l'état de santé d'un condensateur

Pour évaluer l'état de santé d'un condensateur, une des méthodes les plus simples consiste à suivre en temps réel leurs indicateurs de santé. Cependant, une telle méthode peut être coûteuse à mettre en place et complexifier les systèmes. Il est donc parfois préférable de ne détecter que le défaut. Des exemples de ces deux approches seront détaillés dans les alinéas suivants.

Les principes énoncés sont applicables à tous les types de condensateurs, quelle que soit leur technologie. Elles se basent de fait sur leurs caractéristiques électriques principales, à savoir la présence d'une capacité et d'une ESR. La faisabilité est cependant fonction de la technologie du condensateur. La précision nécessaire des mesures dépend des ordres de grandeurs, des caractéristiques des condensateurs et certaines méthodes reposent sur des utilisations spécifiques.

2.2.1 Suivi de la capacité

De nombreuses méthodes existent pour estimer et suivre l'évolution de la capacité C des condensateurs au sein de leur système pendant leur fonctionnement.

La plupart d'entre elles s'appuient sur l'expression du module de l'impédance d'un condensateur parfait :

$$Z(\omega) \approx \frac{1}{C\omega} \quad (2-1)$$

avec ω , la pulsation électrique.

Cette approximation est correcte à basses fréquences, car l'ESR et la partie inductive du condensateur sont alors négligeables devant $\frac{1}{C\omega}$ et C reste stable en fonction de la fréquence. Elle peut s'étendre aux moyennes fréquences selon le type de condensateur.

A l'aide de cette approximation, il suffit d'obtenir le courant traversant le condensateur et la tension à ces bornes sur une durée donnée pour déduire la valeur de la capacité. Les méthodes diffèrent selon la façon dont sont obtenus les signaux de courant et de tension et la manière dont ils sont combinés ensemble pour calculer la capacité. La plupart du temps, elles exploitent à leur avantage la fonctionnalité et l'environnement du condensateur [58].

Selon ces principes, une étude évalue et propose une évaluation de la capacité d'un condensateur de bus DC en amont d'un onduleur [59]. Elle présente au cours de son état de l'art d'autres solutions similaires et leurs degrés de précision associés [59]. Pour citer un autre exemple, le brevet EP 3482486 B1 s'intéresse spécifiquement aux condensateurs en sortie d'une alimentation à découpage [60]. Grâce aux capteurs de tension et de courant placés en sortie pour piloter les cycles de fonctionnement de l'alimentation, la capacité est déduite en utilisant la formule de base $i = C \, dU/dt$ (cf. équation (1-5)).

En considérant le condensateur parfait, d'autres possibilités consistent à exploiter son temps de charge pourvu qu'il soit en série avec une résistance de valeur connue R. La constante de temps correspondant à sa charge à 95% est approximée à 3RC.

Enfin, pour les condensateurs utilisés dans les applications de filtrage, il est possible d'exploiter la connaissance des caractéristiques du filtre (typiquement la fréquence de coupure) pour en déduire leur capacité.

En définitive, la littérature scientifique propose de nombreuses méthodes de mesure de la capacité, faciles à implémenter et peu coûteuse, et ce, quelle que soit la position du condensateur dans son système électronique. Il pourrait être intéressant d'estimer la durée de vie des condensateurs en se basant uniquement sur leur capacité. Etant donné que cette dernière est déjà largement mesurée, une telle méthode nécessiterait peu de modifications des systèmes actuels.

Cependant, la capacité seule ne suffit pas à couvrir tout le spectre des défaillances d'un condensateur. Certaines d'entre-elles, en particulier les défaillances catalectiques, sont intimement liées à sa température interne (cf. paragraphe 1.4.5) [61]. Il faut donc prendre en considération les pertes. L'ESR en est un indicateur privilégié.

Se fier uniquement à la capacité pourrait également entraîner un délai dans la détection des défaillances où elle est impliquée. La corrosion affecte l'ESR en premier lieu (via la résistance de métallisation R_s), avant la capacité. Dans une optique de prédiction de la durée de vie, négliger un signe précurseur revient à diminuer l'horizon de la prédiction.

Enfin, avec l'augmentation de l'ESR causée par le vieillissement, l'approximation de l'équation (2-1) devient de moins en moins justifiée, surtout à moyennes fréquences. Mesurer l'ESR revient à réduire les imprécisions sur la mesure de la capacité.

2.2.2 Suivi conjoint de l'ESR et de la capacité

Pour mesurer l'ESR conjointement avec la capacité, il faut compléter les méthodes précédentes.

En premier lieu, il y a toutes les méthodes de caractérisations fréquentielles développées dans le paragraphe 1.3.1 comme la démodulation cohérente synchrone. Afin de s'assurer de ne recueillir qu'une seule fréquence du signal, des filtres passe-bandes peuvent être rajoutés en amont.

Théoriquement, connaître le courant et la tension sur une même durée suffit pour déduire la capacité et l'ESR [18]. En négligeant l'inductance série du condensateur, les équations sont les suivantes [62] :

$$U(t) = \text{ESR } I_c(t) + U_c(t) \quad (2-2)$$

$$U_c(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t I_c(t) dt + U_c(t_0) \quad (2-3)$$

avec U_c la tension aux bornes de l'élément de capacité C, U la tension aux bornes du condensateur, I_c le courant traversant le condensateur.

La résolution des équations peut se faire en utilisant des méthodes d'identification de systèmes linéaires connues comme les moindres carrés récursifs [15].

En pratique, comme l'ESR est négligeable à basse fréquence devant $\frac{1}{C \omega}$, il faut que le condensateur soit traversé par des ondulations de tensions de moyennes fréquences, une grande précision dans l'acquisition des mesures et une fréquence d'échantillonnage élevée.

En outre, il est implicite qu'il faut considérer les signaux de courant et de tension uniquement sur les gammes de fréquences où l'inductance série du condensateur est négligeable et où la capacité et l'ESR sont constantes.

Au lieu de mesurer l'intégralité de signaux comportant plusieurs fréquences, une autre méthode consiste à ne recueillir que la valeur efficace du courant et de la tension à deux fréquences distinctes et de calculer le module de l'impédance [15]. L'ESR et la capacité sont alors obtenues grâce à la résolution du système d'équation suivant :

$$\begin{cases} Z(\omega_1) = \sqrt{ESR^2 + \frac{1}{(C \omega_1)^2}} \\ Z(\omega_2) = \sqrt{ESR^2 + \frac{1}{(C \omega_2)^2}} \end{cases} \quad (2-4)$$

Les fréquences doivent être choisies dans des domaines de fréquences où l'ESR et la capacité sont stables et en dessous de la fréquence de résonance du condensateur, de manière à négliger son comportement inductif. Il est judicieux de choisir ces fréquences parmi les fréquences présentes naturellement dans le système où se situe le condensateur, comme une fréquence de découpage par exemple.

Si l'impédance est mesurée à la fréquence de résonance des condensateurs à films métallisés, elle sera directement égale à l'ESR. Cependant, la fréquence de résonance varie au cours du vieillissement à cause de la réduction de la capacité. Pour des condensateurs électrolytiques, la plage de fréquence, où l'ESR est stable et peut être approximée à l'impédance Z , est beaucoup plus grande. Elle est de l'ordre de 10 kHz à 100 kHz [15]. Il suffit alors de mesurer les ondulations de courant et de tension à ces fréquences et de les combiner pour en extraire une valeur d'ESR. Une étude explicite cette méthode en détail [63].

Bien que toutes ces méthodes permettent une estimation beaucoup plus fine de l'état de santé des condensateurs, les circuits de mesures sont un peu plus complexes, ce qui entraîne inévitablement un surcoût.

Les méthodes correspondant aux équations (2-2) (en utilisant les moindres carrés récursifs) et (2-4) ont été comparées dans la thèse de doctorat de M. A. El Hayek [15] sur des condensateurs électrolytiques. La méthode de la résolution du système d'équation (2-4) donne de meilleurs résultats, en termes de temps de convergence pour identifier les paramètres, d'erreur d'estimation, de robustesse à la fréquence d'échantillonnage et d'espace mémoire nécessaire.

Les valeurs de résistance de la métallisation des condensateurs à films métallisés étant très faibles (de l'ordre du mΩ), son erreur d'estimation peut rapidement s'élever. La résistance des câbles devient rapidement non négligeable selon la réalisation des mesures de courant et tension. Il y a un enjeu à adapter les méthodes explicitées au besoin de précision.

2.2.3 Circuit de détection de défaut

Si l'objectif est seulement de détecter un défaut, il est possible de s'affranchir des mesures des indicateurs de santé. Cependant, ces méthodes ne permettent pas toujours d'effectuer une maintenance prévisionnelle.

Il y a en premier lieu les méthodes qui s'appuient sur des comparaisons d'état de santé entre condensateurs.

La détection de la mise en défaut d'un condensateur peut se faire selon la variation de tension mesurée à ses bornes. Avec le vieillissement, la tension se modifiera conformément à la variation de l'ESR et de la capacité. Les équations en jeu sont celles présentées par les équations (2-2) et (2-3). En cas de court-circuit, la tension chute brusquement. Le brevet EP 2887077 A1 [64] propose de connecter deux condensateurs en série, chacun étant en parallèle d'une résistance de valeur identique et de surveiller la tension du point milieu. Initialement, les tensions entre les deux condensateurs sont similaires. En cas de défaut d'un condensateur, elles se déséquilibrent : la tension du point milieu varie. Il suffit alors d'une mesure de tension pour détecter un défaut. Le schéma de principe du brevet est affiché sur la figure ci-dessous :

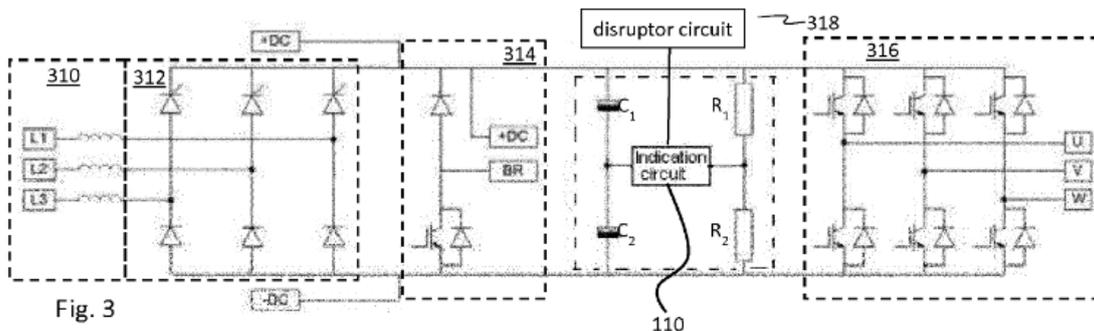


Figure 2-2 : Schéma illustratif du brevet EP 2887077 A1 [64]

Au lieu de comparer les tensions entre condensateurs, des méthodes proposent de comparer les variations de courant. La solution du brevet EP 2676146 B1 [65] compare les déséquilibres de courant entre des bancs de condensateurs connectés en étoile. Le courant est mesuré sur chacune des phases. En l'absence de défaut, les courants sont symétriques. En cas d'un défaut, des asymétries adviennent. Si elles dépassent un certain seuil, l'alarme est donnée.

Il peut être fait de même avec d'autres types de couplages et avec une détection sur la puissance.

Toutefois, toutes ces méthodes supposent que les condensateurs ne vieillissent pas de façon semblable en même temps. Également, comme les principes de détection reposent sur une comparaison entre condensateurs, elles ne permettent de détecter le défaut que d'un condensateur à la fois. Le vieillissement d'un condensateur n'est détecté qu'en comparaison à un autre. L'état de santé réel n'est pas connu. Ces méthodes ne sont vraiment pertinentes que pour détecter les défaillances catalectiques où la variation de la tension est conséquente. Dans le cas où il y a uniquement des défaillances par dérive, le risque de faux négatifs est alors élevé.

Enfin, toutes les méthodes mesurant l'état de santé général d'un banc de condensateur possèdent une imprécision intrinsèque sur l'état réel de chaque condensateur au sein du banc.

Afin de palier à ce désavantage, certaines de ces méthodes rajoutent une comparaison des données mesurées avec leurs valeurs initiales. Une estimation de la capacité ou/et de l'ESR des condensateurs est alors possible.

Le brevet EP 2919024 A1 [66] effectue sa comparaison sur la puissance apparente. Elle est considérée égale à la puissance réactive dissipée par un banc de condensateur triphasé. La valeur réelle de la puissance apparente ($S = 3 V I$) obtenue par des mesures de courant et tension est donc comparée à la valeur initiale théorique pour détecter un défaut ($S=|Q|=3 V^2 C \omega$).

Le brevet WO 2017/071754 A1 [67] explore ces différentes possibilités. Il effectue ces comparaisons à la fois sur la tension, le courant et la puissance active. Les mesures choisies sont celles de la tension à l'entrée d'un module de condensateurs et du courant de sortie.

Les valeurs initiales peuvent être obtenues par d'autres biais que des mesures de courant et tension. Par exemple, l'ESR d'un condensateur électrolytique possède une relation de dépendance avec sa température. Il suffit donc d'une mesure additionnelle de la température d'un condensateur pour remonter jusqu'à la valeur initiale de son ESR. Une comparaison avec la valeur réelle de l'ESR, mesurée grâce aux ondulations de tension, permet alors de connaître la dégradation de l'ESR (ΔESR) à un instant t [63].

Enfin, des méthodes s'appuient directement sur le lien de causalité entre la capacité du condensateur et les performances du système quand il existe.

Ainsi, pour des condensateurs de filtrage, il suffit de surveiller la qualité des signaux de sortie sur la gamme de fréquence adaptée (cf. paragraphe 2.2.1). En cas de réduction de la capacité, la fréquence de coupure des filtres se modifie : des harmoniques ne sont plus filtrées. Il suffit donc de les surveiller pour détecter un défaut.

Une variante de ce principe est exploitée dans le brevet EP 2390997 B1 [68] sur des condensateurs à films métallisés placés entre une phase et le neutre en tant que filtres d'entrée ou de sortie de convertisseur. La fréquence fondamentale du courant dans le neutre est continuellement mesurée et comparée à sa valeur initiale. Elle est extraite par application d'une FFT ou d'un filtre numérique. Le défaut est avéré si la différence entre les deux valeurs de la fréquence fondamentale dépasse un certain seuil. Il peut évidemment en être fait de même le signal de tension.

Cette méthode suppose toutefois que les condensateurs sont les seuls composants du filtre qui vieillissent.

2.3 Pronostic de la durée de vie utile restante

2.3.1 Définitions des types de méthode

Une fois que l'on est capable d'assurer le suivi des indicateurs de santé des composants, il reste à prédire leur durée de vie restante pour répondre au besoin de fiabilité. Il existe divers types de méthode pour y arriver.

En premier lieu, il y a les méthodes paramétriques. Par définition, elles font intervenir des fonctions analytiques explicites. L'extraction de la durée de vie restante se fait avec l'identification de leurs paramètres. Typiquement, il peut s'agir d'utiliser une ou plusieurs lois de vieillissement.

Il y a usuellement deux approches pour déterminer la loi de vieillissement d'un composant. Il y a les lois empiriques, issues de l'observation des données et des lois théoriques, issues de la physique des mécanismes de défaillances [69].

Les lois basées sur les mécanismes sont robustes, mais difficile d'accès. Elles nécessitent une compréhension fine des phénomènes physiques à l'œuvre et leur conséquence sur les indicateurs de santé. Les interactions entre les différents mécanismes de défaillances peuvent être complexes à intégrer. Également, un piège à éviter est d'obtenir une fonction purement descriptive de l'évolution de l'état de santé d'un composant spécifique qui serait non généralisable aux autres. Pour un même type de technologie, il peut exister des disparités qui doivent être prises en compte par une loi robuste.

Les lois empiriques sont quant à elles difficilement extrapolables hors des domaines de contraintes où elles ont été établies. Pour être précises, elles nécessitent des bases de données importantes.

De plus en plus, des lois mixtes combinant les deux approches émergent lorsque les phénomènes physiques et leurs interactions ne sont pas encore pleinement compris ou trop complexes à prendre en compte. Elles exploitent les connaissances actuelles sur la physique des mécanismes de dégradation pour définir des règles auxquelles doivent répondre les lois empiriques. La partie empirique d'une loi mixte peut aussi servir à réduire les erreurs observées expérimentalement de modèles physiques existants

En deuxième lieu, il y a les méthodes non-paramétriques [70]. Comme leur nom l'indique, l'extraction de la durée de vie ne nécessite pas l'identification de paramètres. Leur approche est purement empirique. Elles s'affranchissent de la connaissance de loi de vieillissement ou d'utilisation d'une loi spécifique de distribution statistique.

Ce sont typiquement des méthodes que l'on retrouve en apprentissage automatique (« machine learning »). Il s'agit par exemple d'utiliser des estimateurs par noyau ou des décompositions dans des ensembles de fonctions filtres (par exemple avec des ondelettes).

Cependant ces méthodes nécessitent en général plus de données que les méthodes paramétriques pour atteindre un niveau de précision équivalent. Elles demandent aussi des temps de calcul plus importants et sont plus difficiles à interpréter physiquement.

Enfin, les modèles hybrides peuvent combiner des approches en associant une connaissance physique aux modèles non paramétriques.

2.3.2 Modèles basés sur les facteurs de défaillance

Concernant les condensateurs à films métallisés, la loi la plus souvent utilisée pour déterminer leur durée de vie est une loi basée sur la quantification de l'influence des facteurs de vieillissement [71], [72], [73], [74] :

$$L = f(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (2-5)$$

avec L la durée de vie du composant sous des contraintes fixes (stress S_i) qui sont au nombre de n.

A l'aide de la connaissance de la durée de vie du composant L_{test} déterminée grâce à un essai de vieillissement accéléré sous des conditions fixes connues et de la détermination d'un coefficient d'accélération AF dépendant de chaque contrainte S_i , la

durée de vie L du composant sous d'autres conditions fixes est extrapolable selon la formule suivante :

$$L = \frac{L_{\text{test}}}{AF(S_1, S_2, \dots, S_n)} \quad (2-6)$$

L'approche la plus répandue consiste à considérer que le facteur d'accélération est composé de termes indépendants pour chaque contrainte [75]. De façon équivalente à la détermination d'une vitesse d'une réaction chimique, il est considéré que la vitesse de dégradation d'un condensateur est constituée d'un coefficient d'accélération gouverné par la température et de coefficients quantifiant l'influence des autres contraintes [14]. Ainsi :

$$AF(S_1, S_2, \dots, S_n) = \prod_{i=1}^n AF(S_i) \quad (2-7)$$

Chacun des termes $AF(S_i)$ quantifie l'impact de la contrainte S_i sur la durée de vie à l'aide d'un coefficient associé v_{S_i} . Pour les condensateurs à films métallisés, on considère trois principales contraintes : la température T , l'humidité relative RH et la tension U .

Les durées de vie sont ici estimées pour des contraintes constantes tout au long du vieillissement. Le courant et la fréquence restent eux aussi fixes, ils participent au vieillissement en induisant un auto-échauffement. Ce dernier se retrouve dans le terme lié à la température [15].

Pour quantifier l'effet d'accélération dû à la température, la loi d'Arrhenius est la plus communément utilisée [14] :

$$AF(T) = e^{\left(\frac{v_T}{k_b} \left(\frac{1}{T_{\text{test}}} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (2-8)$$

avec $v_T = E_a$, l'énergie d'activation (eV), k_b la constante de Boltzmann (eV/K). T_{test} est la température du condensateur appliquée lors de l'essai de vieillissement accélérée (en K).

Pour quantifier l'effet de l'humidité, il est posé :

$$AF(RH) = \left(\frac{RH_{\text{test}}}{RH}\right)^{-v_{RH}} \quad (2-9)$$

avec, RH_{test} l'humidité relative appliquée lors de l'essai de vieillissement accélérée (en %).

v_{RH} est ici une constante sans unité.

Pour évaluer l'effet de la tension, deux lois présentées ci-dessous sont possibles : la loi puissance inverse (2-10) et la loi exponentielle (2-11) :

$$AF_1(U) = \left(\frac{U_{\text{test}}}{U}\right)^{-v_{U_1}} \quad (2-10)$$

$$AF_2(U) = e^{-v_{U_2}(U_{\text{test}} - U)} \quad (2-11)$$

avec, U_{test} la tension appliquée lors de l'essai de vieillissement accélérée (en V). v_{U_1} et v_{U_2} sont des constantes sans unité.

En cumulant les équations (2-5) à (2-11), la loi suivante pour la durée de vie peut donc être obtenue [45] :

$$L(T, RH, U) = L_{\text{test}} e^{\left(\frac{-v_T}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{test}}} - \frac{1}{T}\right)\right)} \left(\frac{RH_{\text{test}}}{RH}\right)^{v_{RH}} e^{v_{U_2}(U_{\text{test}} - U)} \quad (2-12)$$

D'autres formulations de $AF(S_1, S_2, \dots, S_n)$ peuvent être proposées, en particulier si les composantes relatives à chaque contrainte ne peuvent pas être décomposées indépendamment les unes des autres. Leurs interactions peuvent être prises en compte. La plus connue est la loi d'Eyring, qui généralise la loi d'Arrhenius à d'autres contraintes et considère leur effet cumulé avec la température [73]. Ainsi :

$$AF(T, S_2, \dots, S_n) = \left(\frac{T_{\text{test}}}{T}\right)^{v_{1T}} e^{\frac{v_{2T}}{k_b} \left(\frac{1}{T_{\text{test}}} - \frac{1}{T}\right)} \prod_{i=2}^n e^{v_{1S_i}(S_{i\text{test}} - S_i) + v_{2S_i} \left(\frac{S_{i\text{test}}}{T_{\text{test}}} - \frac{S_i}{T}\right)} \quad (2-13)$$

avec, quel que soit i , les coefficients $v_{1T}, v_{2T}, v_{1S_i}, v_{2S_i}$ des constantes.

Les coefficients v_{S_i} de toutes ces lois ($v_T, v_{RH}, v_{U_1}, v_{U_2}, v_{1T}, v_{2T}, v_{1S_i}, v_{2S_i}$ des équations (2-9) à (2-13)) dépendent fortement des condensateurs à films métallisés considérés. Le processus de fabrication, le type de diélectrique, le traitement du diélectrique, la structure des électrodes et la composition du boîtier entrent en compte dans leur estimation. Les variations peuvent être conséquentes selon les séries et selon les fabricants. Ainsi, ils peuvent être évalués expérimentalement par série de condensateurs [76]. Parfois, les fabricants peuvent donner des ordres de grandeurs [45]. Cependant, la plupart du temps, ils préfèrent ne pas communiquer ces données, jugées confidentielles pour proposer directement l'estimation des durées de vie [36], [77].

Comme toutes lois empiriques, l'inconvénient majeur de cette méthode est le manque d'extrapolation de la loi d'un condensateur à un autre et le besoin d'un grand nombre de tests pour déterminer tous ces coefficients. Par ailleurs, les variations des conditions d'opération ne sont pas prises en compte, dont en particulier l'augmentation des pertes dues au vieillissement.

D'autres études ont proposé des fonctions purement empiriques pour décrire l'évolution de la capacité dans le temps.

En présence d'humidité, de tension alternative et de température, il a pu être observé que la capacité décroît exponentiellement [78]. Ainsi la loi (2-14) a été proposée.

$$C(t) = A_1 - B_1 e^{D_1 t} \quad (2-14)$$

A_1, B_1 et D_1 étant des constantes positives.

Il a également été observé, dans cette même étude [78], que l'ESR tendait à croître exponentiellement avec le temps. En voulant coupler sa croissance avec l'effet accélérateur de la température, une simplification de la loi d'Arrhenius [15], a été proposée [71], [72], [74], [79] :

$$\text{ESR}(t) = \text{ESR}(0) e^{-D_0 \int_0^t \frac{T_{hs}(t)}{\beta} dt} \quad (2-15)$$

où D_0 et β sont des constantes. T_{hs} étant la température au cœur du condensateur, elle inclue donc les pertes. L'effet des contraintes autres que la température y est parfois ajoutée sur le principe de l'équation (2-7).

Les mesures de l'ESR à l'origine de l'équation (2-15) [71] ont été effectuées à 100 Hz [78]. Au vu du diélectrique des condensateurs testés (PP), l'ESR à cette fréquence peut être approximée à R_s (cf. paragraphe 1.1.3 et paragraphe 3.2.2).

Limitées à une utilisation dans leurs conditions environnementales d'obtention, il est possible de rajouter à cette liste toutes les méthodes paramétriques approximant une fonction sur un domaine donné à l'aide d'autres fonctions usuelles comme les polynômes de degré n [80], [81].

2.3.3 Modèles basés sur les mécanismes de défaillance

Enfin, quelques études proposent des lois de vieillissement basées sur des équations provenant de la physique des défaillances.

Une étude propose d'expliquer la dégradation de la capacité due à la corrosion atmosphérique [82]. Elle se base sur une expression de la croissance de fines couches d'oxyde [83], [84] et en particulier du zinc :

$$D_{ox}(t) = D_T \ln(A t + 1) \quad (2-16)$$

où D_{ox} décrit l'augmentation de l'épaisseur de l'oxyde, $D_T = \frac{h}{4 \pi \sqrt{2} m_e \Phi_0}$ avec h la constante de Planck, m_e la masse d'un électron et Φ_0 la barrière de potentiel à l'interface du métal et de l'oxyde. A est un coefficient à déterminer dépendant des conditions environnementales, i.e. la température et l'humidité.

Il est ainsi considéré que l'épaisseur des électrodes D_m diminue avec le temps avec l'oxydation selon l'équation (2-16). Ainsi :

$$D_m(t) = D_{m0} - \frac{D_T}{k_{PB}} \ln(A t + 1) \quad (2-17)$$

D_{m0} est l'épaisseur initiale. k_{PB} est un terme rajouté pour tenir compte de la nature d'alliage des électrodes [85]. Au moment où $D_m(t) = 0$, les électrodes ne possèdent plus d'épaisseur, elles ont donc complètement disparu.

Afin de prendre en compte des irrégularités dans l'épaisseur des électrodes, elles sont supposées distribuées selon une loi normale de moyenne $D_m(t)$ et d'écart-type σ . L'étude décrit la surface perdue des électrodes comme le pourcentage de la surface initiale dont l'épaisseur de métallisation est devenue nulle ($D_m = 0$). Ce ratio est mathématiquement décrit par la probabilité que $D_m(t)$ soit inférieure ou égale à 0. La capacité devient alors [82] :

$$C(t) = C_0 \left(1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - D_m(t)}{\sigma} \right)^2} dx \right) \quad (2-18)$$

C_0 est la capacité initiale à $t=0$.

Bien que cela ne soit pas explicité, la dégradation de la capacité est supposé uniquement due à la dégradation de la surface des électrodes (cf. équation (1-6)). Il convient de remarquer que cette modélisation suppose que la corrosion attaque simultanément toute la surface de la partie active des électrodes.

Sur la même base, les mêmes auteurs ont publié une étude donnant une expression de la dégradation de l'ESR sous l'effet de la corrosion atmosphérique [86]. Elle est retranscrite telle quelle dans l'équation ci-dessous :

$$ESR(t) \approx \left(ESR(0) - \frac{\mu_F}{\omega C} \right) \left(\frac{3 \beta_H(t)}{\beta_{A0}} + \frac{1}{1 - \frac{D_T}{k_{PB} D_{m0}} \ln(A t + 1)} \right) + \frac{\mu_F}{\omega C} \quad (2-19)$$

avec β_H et β_{A0} respectivement la résistance de surface du bord renforcé des électrodes et la résistance de surface initiale de la partie active des électrodes, μ_F le facteur de perte du diélectrique considéré constant, C la capacité du condensateur considérée constante et ω la pulsation.

L'hypothèse qui sous-tend ce calcul, est que la corrosion atmosphérique n'affecte pas la surface des électrodes. Seule leur épaisseur varie. La longueur et la largeur des électrodes demeurent inchangées, ainsi leur résistance devient inversement proportionnelle à D_m (cf. (2-17)). Cette hypothèse peut être justifiée par le fait que la dynamique de l'oxydation est beaucoup plus lente que celle de l'électro-corrosion.

Il convient de remarquer que la résistance des connectiques n'est pas explicitement intégrée dans le calcul. Les auteurs l'incluent par la suite dans le terme $\frac{3 \beta_H(t)}{\beta_{A0}}$.

Sur le même principe, une étude essaie de modéliser l'impact de l'électro-corrosion [44]. Pendant le processus de corrosion, la traversée des ions à travers l'oxyde pour atteindre le métal est influencée par le champ électrique aux bornes de l'oxyde et par la concentration originelle d'ions [84]. Sur cette base, l'étude conclue que le taux de corrosion est proportionnel à ces deux paramètres et en déduit l'expression de la capacité suivante :

$$C(t) = A_3 - B_3 t^{D_3} \quad (2-20)$$

avec A_3 , B_3 et D_3 des constantes à déterminer.

2.3.4 Modèles stochastiques

D'autres approches consistent à estimer que les défaillances suivent une loi de probabilité. Tout l'enjeu est de trouver alors la loi la plus pertinente et de savoir comment l'utiliser pour remonter à une estimation de la durée de vie restante.

Il s'agit aussi de définir le type de défaillance considéré. Les modèles diffèrent selon que l'on s'intéresse à la probabilité de la défaillance totale (= panne) du composant ou seulement à l'occurrence des défaillances par dérive au sein du composant. Ainsi,

l'estimation de la RUL peut reposer sur analyse statistique des défaillances totales au sein d'un même lot de composants ou sur une quantification de l'impact des défaillances par dérive sur les indicateurs de santé.

Une première approche est de déterminer le taux de défaillance $\lambda(t)$ des composants pour construire une loi de fiabilité.

La loi de fiabilité $R(t)$ ou loi de survie se définit comme la proportion des unités n'ayant pas défailles au moment t . Son domaine d'activité est défini sur $[0,1]$. Elle est fonction du taux de défaillance selon l'équation suivante [55] :

$$\frac{dR(t)}{dt} = - \lambda(t) R(t) \quad (2-21)$$

$$\Rightarrow R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2-22)$$

Il lui est parfois préféré la loi de défaillance $F(t)$ qui est son complément et décrit la proportion des défaillances dans le temps :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2-23)$$

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est égal à la fréquence de destruction des composants à l'instant t . Il est fonction de la densité de probabilité de défaillance du composant $f(t)$. Cette dernière est définie selon l'équation suivante :

$$f(t) = \lambda(t) R(t) \quad (2-24)$$

La probabilité de défaillance instantanée entre t et $t + dt$ est donc $f(t)dt$.

Le temps moyen de bon fonctionnement d'un composant avant un défaut ou MTTF pour « Mean Time To Failure » correspond alors à l'espérance de la loi de fiabilité :

$$MTTF = \int_0^{+\infty} t f(t) dt = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (2-25)$$

Ainsi, en ayant connaissance de la distribution de probabilité que suit la panne des composants, il suffit d'en identifier les paramètres afin de connaître la probabilité des composants de défailir à un instant t , donnée par $F(t)$ ou $R(t)$ et son MTTF [87].

Dans le cas où le taux de défaillance $\lambda(t)$ est invariant par rapport au temps, la loi de fiabilité du composant suit alors la loi dite « exponentielle ». Le MTTF devient alors directement fonction de la fréquence des défaillances. On peut alors écrire :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \text{ et } MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2-26)$$

Il est usuellement admis que le taux de défaillance des composants $\lambda(t)$ suit une courbe en baignoire [55]. L'évolution de $\lambda(t)$ est illustrée sur la figure 2-3 et comporte plusieurs phases. Le taux est élevé en début et en fin du cycle de fonctionnement. Au début, il s'agit des défauts de jeunesse qui sont souvent associés à ceux de fabrication. Ainsi durant cette phase, les composants défectueux sont éliminés rapidement, puisque trop fragiles pour

résister aux contraintes nominales. Le taux de composants défectueux diminue avec le temps au fur et à mesure de leurs destructions, entraînant avec lui une décroissance de $\lambda(t)$. Au bout d'un certain temps, seuls les composants initialement sains continuent de fonctionner. Le taux $\lambda(t)$ se stabilise à une valeur constante. C'est la phase de maturité des composants. Cependant, avec le vieillissement, de nouvelles dégradations apparaissent et affectent tous les composants. Le taux de mortalité augmente à nouveau. Ces défauts sont appelés « défauts d'usure » [13].

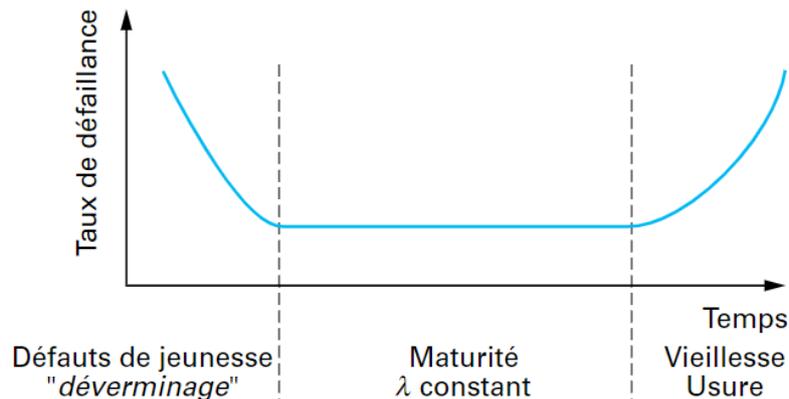


Figure 2-3 : Evolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ d'un composant au cours du temps [55] dite « courbe en baignoire »

La loi la plus utilisée pour modéliser cette courbe dite en baignoire est la loi de Weibull. Une expression $\lambda(t)$ peut être donnée pour chacun des domaines de la courbe en baignoire selon l'équation suivante :

$$\lambda(t) = \frac{m}{\beta} \left(\frac{t - \gamma}{\beta} \right)^{m-1} \quad (2-27)$$

avec, β , m et γ , des constantes. β et $m > 0$. β est un paramètre d'échelle, homogène à un temps, m est un paramètre de forme, sans unité, et γ est un paramètre de position, homogène à un temps.

Les coefficients ont des valeurs différentes selon le comportement de la courbe en baignoire que le taux de défaillance doit simuler.

Lors de la phase des défauts de jeunesse, le taux de défaillance diminue : $0 < m < 1$.

Lors de la phase de stabilisation, le taux de défaillance est constant : $m = 1$.

Lors de la phase des défauts d'usure, le taux de défaillance augmente : $m > 1$.

γ permet de définir le point de départ de chaque phase. En prenant l'origine des temps égal au début de la phase, $\gamma = 0$. β est le coefficient qui permet l'adaptation de la loi sur chaque phase.

La forme générale de la loi de Weibull lui permet de couvrir une grande majorité de lois usuelles comme la loi exponentielle (cas où $m = 1$) et d'être assez flexible pour approcher les autres. La littérature s'accorde pour dire qu'en pratique, la loi de Weibull s'applique bien aux composants électroniques et en particulier aux condensateurs [80].

Dans le cas de la loi de Weibull (cf. (2-27)), on peut aussi écrire :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^m + \left(\frac{-\gamma}{\beta}\right)^m} \quad (2-28)$$

$$MTTF = e^{\left(\frac{-\gamma}{\beta}\right)^m} \int_{\left(\frac{-\gamma}{\beta}\right)^m}^{+\infty} \left(\gamma + \beta t^{\frac{1}{m}}\right) e^{-t} dt \quad (2-29)$$

Une autre loi de fiabilité usuelle pour les composants électroniques est la loi log-normale [69]. Par définition, la densité de probabilité de la loi log-normale d'espérance μ et d'écart type σ est :

$$f(t) = \frac{1}{t \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2-30)$$

En considérant qu'il s'agit aussi de la densité de probabilité de la loi de défaillance, à l'aide des équations (2-21), (2-24) et (2-25) citées ci-dessus, nous pouvons écrire :

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (2-31)$$

$$MTTF = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \quad (2-32)$$

avec Φ , la fonction de répartition de la loi normale : $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$.

Les phénomènes d'auto-cicatrisation étant des phénomènes aléatoires liés au nombre d'impuretés présentes dans le diélectrique, une étude propose d'utiliser une loi probabiliste pour en définir les effets sur la capacité. Elle utilise la loi de fiabilité exponentielle pour en déduire une expression de la capacité C au cours du temps [88] :

$$C(t) = A_2 + B_2 e^{-D_2 t} \quad (2-33)$$

avec A_2, B_2 et D_2 des constantes positives.

La fonction donne des résultats cohérents avec les données de condensateurs ayant subi des contraintes en tension et température [88].

Enfin, la dégradation des indicateurs de santé peut être identifiée à un processus stochastique. Par définition, un processus stochastique est une succession de variables aléatoires localisées dans le temps et/ou l'espace. Ainsi, chaque variation d'un indicateur de santé dans un intervalle de temps donné peut être vue comme une variable aléatoire dont il faudrait définir la loi de probabilité et les paramètres. Sur le même principe, il est aussi possible de considérer directement l'indicateur de santé et non sa variation comme une variable aléatoire localisée dans le temps [70].

Il peut être utile de mentionner la distribution de Birnbaum-Sanders [89], plus connue sous le nom de loi du temps d'usure. Elle est très utilisée en mécanique pour modéliser la fragilisation d'un matériau sous des cycles de contraintes répétés jusqu'à la survenue d'un claquage mécanique. Chaque dégradation fragilise le composant d'un facteur g . Il est posé que ce facteur est une variable aléatoire qui suit une loi normale d'espérance μ et d'écart-type σ . Il convient de remarquer que l'utilisation de la loi normale suppose que chaque dégradation est considérée indépendante et identiquement distribuée. Le claquage

survient au bout de n dégradations, quand l'accumulation des facteurs g a dépassé le seuil critique du composant τ . Ainsi chaque claquage suit une loi de probabilité qui est la loi normale d'espérance $n \mu$ et d'écart type $\sqrt{n} \sigma$. En remplaçant la variable discrète n par la variable continue t constituant le temps et en posant $\alpha = \frac{\sigma}{\sqrt{\mu \cdot \tau}}$ et $\beta = \frac{\tau}{\mu}$, on obtient les fonctions suivantes pour la densité de probabilité de défaillance, la fonction de survie et le MTTF du composant [90], [91] :

$$f(t) = \frac{1}{2\alpha t} \left[\sqrt{\frac{t}{\beta}} + \sqrt{\frac{\beta}{t}} \right] \varphi \left(\frac{1}{\alpha} \left[\sqrt{\frac{t}{\beta}} - \sqrt{\frac{\beta}{t}} \right] \right) \quad (2-34)$$

$$R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{1}{\alpha} \left[\sqrt{\frac{t}{\beta}} - \sqrt{\frac{\beta}{t}} \right] \right) \quad (2-35)$$

$$\text{MTTF} = \beta \left(1 + \frac{\alpha^2}{2} \right) \quad (2-36)$$

Avec Φ , la fonction de répartition de la loi normale et φ sa fonction de densité de probabilité. Pour rappel : $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$ et $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2}$.

Une étude propose d'utiliser cette distribution pour déterminer la défaillance d'un condensateur [89]. Chaque dégradation est associée à une perte de capacité due à des auto-cicatrisations. Le seuil critique τ correspond à 5% de dégradation de la capacité initiale. La fonction de survie donne donc la probabilité en fonction du temps que ce seuil soit dépassé pour un condensateur.

Il convient de noter qu'ici, cette utilisation de la distribution revient à supposer que chaque dégradation de capacité dans un intervalle de temps fixé suit une loi normale.

La même étude propose dans un second temps de classer les variations de la capacité sur un même intervalle de temps dans deux catégories : des dégradations mineures, continues, dues au vieillissement classique et des dégradations brutales, épisodiques, dues aux défauts de fabrication. Les dégradations mineures suivraient la loi normale définie précédemment tandis que les autres, plus conséquentes suivraient une loi de Poisson [89].

Enfin, une dernière étude propose d'utiliser le processus de Wiener pour décrire l'évolution des indicateurs de santé [92]. Il s'agit d'un processus stochastique modélisant le mouvement brownien : un mouvement supposé purement aléatoire et dont la moyenne des déplacements est nulle. Il est pertinent pour modéliser du bruit. Afin de permettre la modélisation d'une moyenne de déplacement non nulle, il est commun de lui ajouter un terme d'avancement nommé « drift ». Ainsi, l'étude [92] exprime chaque indicateur comme une variable aléatoire Y dépendante du temps selon l'expression suivante :

$$Y(t) = X(0) + \mu f(t) + \sigma_B B(t) + \varepsilon \quad (2-37)$$

avec $X(0)$ la valeur initiale de l'indicateur choisi, σ_B le coefficient de diffusion du mouvement brownien $B(t)$. Le terme de drift $\mu f(t)$ est composé d'une variable aléatoire μ suivant une loi normale représentative des hétérogénéités entre les composants et d'une fonction f codant la tendance de la dégradation. ε est un terme d'erreur suivant une loi normale centrée.

Les dégradations n'étant en moyenne pas directement proportionnelles au temps, il a été posé :

$$f(t) = t^b \quad (2-38)$$

avec b une constante.

Il convient de noter que cette modélisation revient à affirmer que les indicateurs de santé se dégradent en moyenne suivant une fonction puissance dont il faudrait déterminer l'exposant b .

Pour valider la pertinence d'un choix d'une distribution de probabilité, il est usuel d'effectuer des tests statistiques d'hypothèse [69]. Il s'agit de comparer les données expérimentales avec des valeurs théoriques données par la distribution choisie.

Ensuite, l'inférence Bayésienne peut permettre de vérifier les paramètres de la distribution de probabilité. Les valeurs réelles donnent les probabilités a posteriori permettant de remonter à la véritable probabilité à partir des probabilités a priori supposées.

2.3.5 Modèles non-paramétriques

Enfin pour remonter à la RUL, il est possible d'utiliser des méthodes appartenant au champ de l'apprentissage automatique, en particulier l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

L'apprentissage statistique supervisé est l'outil de base de la prévision. Il consiste à partir d'un ensemble d'observations (X_1, \dots, X_n), chacune munie d'une étiquette (Y_1, \dots, Y_n), à « prévoir » quelle étiquette Y doit être associée à une nouvelle observation inconnue X . L'ensemble des observations et de leurs étiquettes connues constitue la base d'apprentissage [93].

L'apprentissage supervisé consiste donc à déterminer une fonction de prédiction en ayant préalablement défini une structure pour ranger les données. Il s'agit aussi bien de définir que les données suivent un processus stochastique que de les classer dans des catégories définies, chaque catégorie prédisant un comportement futur. La fonction de prédiction associe à chaque donnée, sa catégorie. Selon la nature de la sortie à déterminer pour une donnée, la fonction de prédiction est appelée « régresseur » ou « classifieur ». La classification supervisée prend ses valeurs dans un ensemble fini (binaire ou plus largement discret fini) et le régresseur prend ses valeurs dans un ensemble continu et univarié (\mathbb{R} ou un intervalle de \mathbb{R}).

Appliqué au vieillissement, une classification peut consister à décomposer le vieillissement en étapes dans lesquelles l'évolution des données est connue. Par exemple, une étape peut consister en une phase de la courbe en baignoire présentée précédemment.

Une autre approche consiste à classer les composants eux-mêmes selon leurs caractéristiques et leurs conditions de vie. Chaque catégorie donne une estimation de leur RUL à l'aide de lois empiriques fonction des contraintes présentées dans le paragraphe 2.3.2 [69].

L'apprentissage non supervisé donne quant à lui une fonction de prédiction sans aucune connaissance préalable sur les données. Aucune étiquette n'a été attribuée.

Il peut cependant faire intervenir en son sein des méthodes de classification. Ces méthodes consistent à définir les catégories citées précédemment ; leur nombre et leurs délimitations. Parmi les méthodes de classification non supervisé appelées aussi

partitionnement de données (en anglais « clustering »), la méthode des centres mobiles (k-moyenne), les réseaux bayésiens, des arbres de décision ou l'utilisation d'hyperplans séparateurs peuvent être cités. Le principe est d'évaluer la proximité des données entre elles par des mesures de distances dans des espaces préalablement choisis. Un regroupement de données significatif dans un espace donne lieu à la définition d'une étape et de ses limites. La séparation des données peut aussi se faire sur la maximisation ou minimisation d'un critère préalablement choisi.

Certains réseaux de neurones peuvent être utilisés pour un apprentissage non supervisé comme les auto-encodeurs. La fonction de prédiction devient ainsi une somme de fonctions de décision dont il faut attribuer des poids et des seuils. Certaines études les ont essayées pour prédire le vieillissement des condensateurs films [14], [94].

Enfin, l'apprentissage supervisé peut faire intervenir une liste non-exhaustive d'autres techniques telles que des régressions, de l'alignement temporel (DTW) ou des processus stochastiques [70]. Parmi les processus stochastiques, le plus utilisé pour sa flexibilité est le processus gaussien [95].

2.4 Outils préventifs des défaillances catalectiques et leurs conséquences

Les lois de vieillissement ont pour fonction de décrire l'évolution des indicateurs de santé dans le temps. Si elles prennent en compte l'impact des défaillances par dérive et les défaillances catalectiques survenant à la suite de l'usure, elles prennent rarement en compte les défaillances catalectiques dues à des sur-contraintes ou des défauts de jeunesse. Si des lois comme celle de Weibull les prennent partiellement en compte, l'évaluation de l'arrivée du défaut reste approximative. Ainsi, pour couvrir tout le spectre des défaillances, il est nécessaire à la fois de connaître la loi de vieillissement du composant par les défaillances par dérive mais aussi, de réussir à détecter l'arrivée des défaillances catalectiques, ou tout du moins d'en prévenir les conséquences indésirables.

2.4.1 Etat de l'art de l'étude des claquages électroniques et thermiques

Une partie de la littérature s'intéresse au comportement spécifique du diélectrique. Majoritairement, il s'agit de caractériser l'évolution de son comportement sous des contraintes en tension et en température. Le diélectrique est alors étudié sous forme d'un échantillon de film, non intégré dans un condensateur.

En premier lieu, certaines études donnent l'expression de la rigidité diélectrique selon la température [79], [39] :

$$E_C(T) = E_{C0} (1 - \alpha_{pp}T) \quad (2-39)$$

α_{pp} est un coefficient propre au polypropylène, déterminé expérimentalement à $1.03 \cdot 10^{-3}$. E_{C0} est la rigidité diélectrique du matériau à 0 °C, soit 552,85 V/ μ m.

D'autres études se focalisent sur l'expression de la conductivité électrique σ en fonction du champ électrique et de la température jusqu'au claquage thermique [25] :

$$\sigma(E, T) = a e^{\left(\frac{-e E_a}{k_b T}\right)} e^{b E} \quad (2-40)$$

a, b sont des constantes, k_b , la constante de Boltzmann, e la charge électrique des porteurs de charges, E_a l'énergie d'activation.

Le seuil limite de la conductivité est :

$$\sigma_b = 4 \frac{\kappa \varepsilon_0 \varepsilon_r}{d_{th}^2} \quad (2-41)$$

σ_b est l'expression de la conductivité au claquage thermique, avec $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ la permittivité du polypropylène, κ sa diffusivité thermique et d_{th} la distance traversée par le flux de chaleur. Pour du BOPP (film polypropylène orienté bi-axialement), κ est donné pour $2.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ [25].

D'autres études proposent des modèles thermiques afin de caractériser l'évolution de la répartition de la température au sein du diélectrique. Elles peuvent reposer sur des calculs par éléments finis [41], [96].

Ces études n'ont pas encore abouti à l'intégration d'un dispositif dans un composant réel pour prédire les claquages, et cela s'explique par plusieurs raisons. D'abord, il y a la difficulté de mesurer en temps réel la conductivité sans interrompre le fonctionnement du condensateur. La mesure de la conductivité présente les mêmes problématiques que celle de la résistance du diélectrique : elle nécessite une tension DC connue et maîtrisée et une forte précision sur des faibles courants. Il est rappelé que :

$$\sigma = \frac{d}{R_{is} A} \quad (2-42)$$

A étant la surface du diélectrique, d son épaisseur et R_{is} la résistance d'isolement.

De plus, il y a des différences locales de température au sein du matériau dont il faut tenir compte. Ces hétérogénéités sont théoriquement des lieux privilégiés de naissance des défaillances. Or, les modèles supposent la plupart de temps un matériau homogène. Enfin, l'impact de l'humidité est très peu considéré.

2.4.2 Solutions industrielles

Si aucune solution n'est exploitable pour détecter l'arrivée d'un claquage, il est toujours possible de limiter leur occurrence en travaillant sur les propriétés du composant ou de limiter les dégâts.

Les fabricants proposent ainsi des ajustements des caractéristiques de leurs condensateurs de telle manière à améliorer leurs propriétés d'auto-cicatrisation.

Une première solution est de limiter leur énergie de manière à ce que le seuil critique au-delà duquel elles s'auto-entretiennent ne soit jamais atteint. Il faut donc jouer sur les

termes de l'équation (1-16). Une possibilité est d'augmenter la résistivité des électrodes. Cela peut se réaliser en diminuant leur épaisseur ou en modifiant leur composition. Cependant, augmenter la résistivité des électrodes implique d'accepter des pertes plus importantes pendant le fonctionnement. Un juste équilibre doit être trouvé. Une autre possibilité est d'appliquer des traitements thermiques directement sur le diélectrique afin de renforcer sa résistance à la chaleur. Enfin, on peut diminuer artificiellement la tension subie en multipliant la mise en série de condensateurs à l'intérieur d'un même boîtier.

Une deuxième solution est d'interrompre les décharges atteignant une intensité critique à l'aide de fusibles internes. C'est l'intérêt des électrodes segmentées (cf. paragraphe 1.2.1).

Enfin, les occurrences d'auto-cicatrisations peuvent être réduites par l'imprégnation d'huile au diélectrique [97]. Les éventuelles bulles d'air sont ainsi colmatées, les impuretés ionisées ne peuvent plus s'y loger. Cette technologie est particulièrement utilisée pour les condensateurs de haute tension.

Les fabricants proposent également des solutions de derniers recours pour limiter les dégâts causés par la formation de gaz. Il existe des condensateurs avec des capteurs de pression intégrés [67], quand ils ne possèdent pas directement des organes de coupure en cas de surpressions. En pratique, ce sont des connecteurs peu robustes à la pression et associés à un boîtier extensible [98], [99]. Sous l'effet de la pression exercée par les gaz, le boîtier se déforme au niveau des terminaux. Il s'allonge, entraînant avec lui la rupture des connecteurs. Le condensateur en défaut est ainsi automatiquement déconnecté.

Des normes internationales sont établies pour protéger les utilisateurs. La norme IEC-60384-14 exige que les condensateurs passent des tests d'inflammabilité actif comme passif. Un lot de condensateurs est soumis respectivement soit à des impulsions de tension soit directement à une flamme pendant une période de temps définie. Le test est réussi si la combustion n'excède pas un temps spécifié et ne se propage pas à des éléments adjacents.

D'autres normes comme la IEC-60831 -1/2 requiert la présence d'organes de coupure en cas de surpression pour tous condensateurs utilisés au-dessus de 1000 V AC. La norme IEC-61921 donne des précautions de mise en service de ces condensateurs.

Cependant, des accidents surviennent toujours. Les industriels peuvent choisir de ne pas accepter le surcoût que les technologies proposées par les fabricants représentent. Les tests d'inflammabilité ne protègent pas contre la production de gaz. L'étincelle responsable du départ de feu peut provenir de l'environnement du condensateur et non du condensateur lui-même. On peut citer comme cause un câble en surchauffe ou une soudure mal-réalisée par exemple.

Enfin, même au sein des condensateurs avec des protections adaptées qui suivent les recommandations des normes, on observe toujours des accidents, bien que cette probabilité soit réduite.

Il est nécessaire de prévenir la formation de gaz avant qu'elle ne devienne critique sur les condensateurs à films métallisés indépendamment de leurs spécificités internes. La solution idéale serait d'arriver à prédire l'arrivée d'un emballement thermique à l'aide d'indicateurs dont la mesure est simple à implémenter, répétable et précise.

Conclusion

Ce chapitre a détaillé les enjeux autour de l'étude des défaillances des condensateurs à films métallisés. Prédire leur durée de vie restante reste un besoin insatisfait. Il y a un manque de lois génériques, robustes et peu coûteuses à exploiter. S'il existe des lois basées sur la physique des défaillances, elles en sont à leur balbutiement. Il convient de les évaluer. Ensuite, il reste un enjeu à détecter et prévenir les claquages thermiques compte tenu de la potentielle gravité de leurs conséquences. Bien que nombre de solutions ont été mises en place pour limiter leurs occurrences et leurs dommages, ce ne sont que des solutions prises en amont de l'utilisation des condensateurs à films métallisés. Elles ne couvrent pas toutes les situations et donc ne suffisent pas à éliminer toutes les pannes. Il y a un besoin de prédire ces claquages thermiques et/ou de les prévenir pendant le fonctionnement même des condensateurs indépendamment de leur spécificité.

La bibliographie est plutôt fournie en termes de méthodes de suivi en temps réel des indicateurs de santé. Le suivi de la capacité ne pose pas de problème. Celui de l'ESR impose des exigences de précision, qui varient en fonction de la fréquence de mesure sélectionnée. Le choix d'une méthode plutôt qu'une autre est profondément dépendante de la fonction du condensateur dans son système.

Chapitre 3 Essais de vieillissement accélérés en tension et température

3.1 Détermination des conditions des essais

3.1.1 Etat de l'art des essais de vieillissement par dérive

Afin d'étudier le vieillissement des condensateurs à films métallisés, il est usuel d'appliquer des contraintes en tension et température et d'observer la dégradation engendrée. Les formes des signaux de tension et courant sont variées. Certains essais appliquent une tension fixe [88], [41], [94], d'autres utilisent des cycles de charge/décharge [100] ou des ondulations de courant [101]. L'application d'ondulations de courants permet de provoquer entre autres de forts échauffements par effet Joule au cœur du composant. Cependant, si elle n'est pas couplée avec un minimum de tension, la dégradation du condensateur est minime [41]. Certaines études se focalisent uniquement sur la température [76] quand d'autres essais permettent de faire vieillir les condensateurs dans des environnements réels. Par exemple, une étude présente la dégradation de la capacité d'un condensateurs à films métallisés de bus DC en amont d'un onduleur de traction [59].

Dans ces différents essais, une dégradation supérieure à 5 % de capacité n'est pas toujours atteinte. Elle requiert majoritairement l'application d'une tension supérieure à la tension nominale et d'une forte température.

Ces dix dernières années, des essais faisant appel à une contrainte supplémentaire en humidité sont apparus [78], [102], [44]. Ils résultent de l'observation de la fragilité des condensateurs sur le marché sous l'effet de contraintes combinées de la température, l'humidité et d'une tension alternative. En effet, si les normes [37], [103], [104], requièrent des tests de robustesse en conditions de température et tension ou de température et humidité, les effets conjoints de ces contraintes peuvent être sous-évalués. En présence de température, d'humidité et de tension AC, la capacité des condensateurs à films polypropylènes peut se réduire de 20 à 90 % en moins de 1000 h [102] tandis qu'en conditions de température et de tension plus élevées, elle ne diminue que de 3 % en 10 000 h [88].

En conditions fixes de tension AC, température et humidité, les courbes de dégradation sont similaires sur l'ensemble des essais de l'état de l'art, à un facteur de dilatation près en fonction des consignes choisies. Ce constat suggère un processus de défaillance commun (cf. l'équation empirique (2-14)). L'allure des courbes est semblable à celles obtenues sans tension AC [105]. Ce résultat suggère que la tension AC n'a qu'un effet accélérateur sur les défaillances en présence de température et d'humidité. Si elle fait apparaître ou renforce d'autres phénomènes, ces derniers semblent négligeables.

Le nombre de condensateurs à films métallisés testés lors de ces essais est souvent de l'ordre d'une dizaine quand ce n'est pas parfois nettement inférieur. Les contraintes appliquées restent majoritairement constantes. Ensuite, peu de références de condensateurs, par rapport à l'offre du marché, ont pu être testées. Or les courbes de dégradation varient selon les types de condensateur.

Tous ces éléments illustrent la problématique du manque de données de vieillissement dans des conditions exhaustives. Elles sont souvent insuffisantes pour utiliser des méthodes d'apprentissage automatique afin d'extraire des lois de vieillissement.

3.1.2 Cahier des charges

Le premier objectif est d'étudier le vieillissement par dérive des condensateurs à films métallisés afin d'obtenir des données à exploiter.

En premier lieu, les contraintes appliquées doivent, autant que faire se peut, être représentatives des conditions réelles de fonctionnement des condensateurs. Ainsi, la présence d'une tension est nécessaire. Les contraintes doivent également être suffisantes pour faire vieillir le condensateur dans des délais raisonnables sans occasionner de défaillances inusuelles. A cette fin, une technique usuelle est d'augmenter la température du condensateur. Elle est reprise dans nos essais.

Dans l'optique d'obtenir une loi de vieillissement robuste, une piste est de discriminer les impacts propres à chacun des mécanismes de défaillance. Dans la mesure du possible, une exigence est de réaliser au moins un essai ne conduisant qu'à un seul type de défaillance. Dans le cas contraire, un mécanisme doit être suffisamment prépondérant pour que les autres soient négligées. Quelles que soient les contraintes appliquées, le diélectrique vieillit, mais seule la corrosion requiert l'application d'humidité. Ainsi, des essais avec et sans humidité sont effectués. Ce chapitre se focalise sur des essais classiques, sans humidité. Les essais avec humidité sont traités dans le chapitre suivant.

Si conformément aux essais menés dans la littérature, les essais avec humidité occasionnent une perte de capacité et une dérive d'ESR suffisantes pour étudier le vieillissement dans un temps restreint, ce n'est pas le cas des tests en température et tension. Les contraintes sur la durée de vieillissement sont fixées à 1 an et demi. Les conditions des essais seront donc prises aux alentours des maximums supportables.

Afin de ne pas occasionner de défaillances inusuelles, les fabricants déconseillent de dépasser la limite de température de fonctionnement indiquée dans les fiches techniques. C'est pourquoi la température maximale est choisie ici comme température de référence. Une marge peut cependant être prise sur la tension nominale U_n . Une étude [106] nous indique que dépasser la tension nominale de 30 % peut s'avérer insuffisant pour être témoin de la fin de vie du composant. Un dépassement de tension de 50 % quant à lui, commence à occasionner des défauts [41]. Une tension de $1,4 U_n$ est donc choisie ici en tant que tension maximale.

Pour avoir la possibilité de quantifier les facteurs d'accélération des contraintes sur le vieillissement, la campagne d'essais doit comporter au minimum 3 conditions différentes : un essai de référence et deux autres essais faisant varier spécifiquement une contrainte par rapport aux conditions de référence.

Pour suivre le vieillissement des condensateurs, l'ESR et la capacité sont mesurées périodiquement. La fréquence des caractérisations est au minimum d'une fois par mois et adaptée au fur et à mesure du vieillissement selon la vitesse de dégradation observée.

Afin d'obtenir des données représentatives, les condensateurs sont choisis parmi 3 fabricants différents. Pour des raisons de logistique (temps de caractérisations, nombre d'enceintes climatiques, durée de vieillissement), le nombre total des condensateurs est

restreint à une vingtaine sur un ensemble de 3 essais. Il y aura donc 3 condensateurs par fabricant (9) pour chaque essai (3), pour un total de 27 condensateurs.

Les condensateurs proviennent de références actuellement utilisées dans des produits de Schneider Electric pour contribuer à leur faire un retour sur leur robustesse et d'en extraire leurs lois de vieillissement empiriques. Les condensateurs choisis sont tous des condensateurs à films polypropylène métallisés de capacité $2,2 \mu\text{F} \pm 20 \%$ avec une tension nominale (U_n) de 330 V AC (50/60Hz) et une température maximum d'utilisation de 110 °C. Ils sont tous de type dit « classe X ». Ils sont conçus pour être placés entre phase et neutre ou entre deux phases en entrée de convertisseur afin de filtrer le mode différentiel des interférences électromagnétiques venant du réseau [107]. Une photographie du type de condensateur choisi est présentée sur la figure ci-dessous :

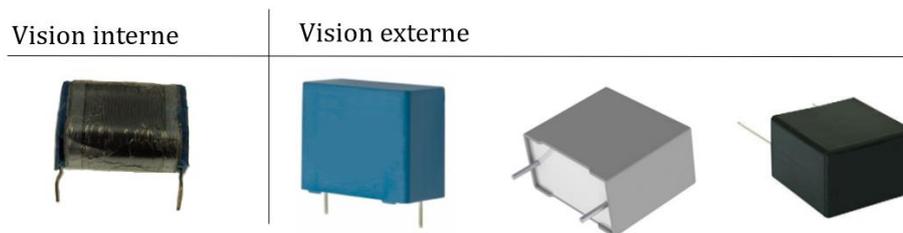


Figure 3-1 : Présentation des condensateurs utilisés dans nos études

Les contraintes restent constantes tout au long des essais de vieillissement. Un premier essai présente les conditions de référence, soit une température de 110 °C pour une tension de $1,4 U_n$. Les contraintes appliquées sur les deux autres essais sont spécifiées dans le tableau ci-dessous :

Dénomination de l'essai	Température	Tension RMS (AC 50 Hz)
Essai 1 : 110°C-1,4 U_n	110 °C	1,4 U_n
Essai 2 : 105°C-1,4 U_n	105 °C	1,4 U_n
Essai 3 : 110°C-1,3 U_n	110 °C	1,3 U_n

Tableau 3-1: Contraintes appliquées des essais en température et tension

3.2 Caractérisations initiales des condensateurs en essais

Chaque caractérisation comporte des erreurs de mesures qu'il est nécessaire d'évaluer. Il faut faire la différence entre les erreurs systématiques et les erreurs accidentelles.

Les erreurs systématiques sont des erreurs constantes ou à variation lente par rapport à la durée de mesure entre la valeur de référence et la valeur mesurée [108]. Il s'agit par exemple d'erreurs sur la calibration de l'appareil de mesure. Le terme « justesse » est utilisé pour les caractériser. La justesse est définie comme l'écart entre la valeur de référence et la moyenne d'un grand nombre de mesures répétées [109]. Elle est traduite en anglais par le terme « trueness ». Elle était anciennement traduite par le terme « accuracy » ce qui contribue à porter confusion de nos jours [110].

Les erreurs accidentelles sont des erreurs aléatoires. Elles peuvent être par exemple dues à des bruits parasites. Elles sont caractérisées par la « fidélité ». Elle est traduite en anglais par le terme « precision » [110]. Elle est définie par l'écart des mesures répétées à leur valeur moyenne. Dans le cas où les conditions de mesures sont fixes, on utilise plutôt le terme de répétabilité. S'il s'agit d'étudier la robustesse de la mesure, i.e. l'influence d'une grandeur externe, on utilise plutôt le terme de « reproductibilité » [109].

La précision est un terme qui englobe à la fois la justesse et la fidélité de la mesure [108]. Elle est traduite en anglais par le terme « accuracy » [110]. C'est pourquoi, par la suite, le terme « accuracy » présent dans toutes les fiches techniques sera traduit par le terme précision.

3.2.1 Appareils de mesure, précision et répétabilité

Afin de déduire la capacité et l'ESR de chaque condensateur, une caractérisation fréquentielle est effectuée à l'aide d'une mesure 4-points grâce à l'impédancemètre Agilent 4294A [111]. Il utilise la méthode des ponts auto-équilibrés [29]. La précision sur le module de l'impédance E_Z , sur la partie réelle E_{ESR} et sur la partie imaginaire E_{Xs} pour une mesure sont données par le fabricant selon les équations suivantes :

$$E_Z(\%) = E_p(\%) + \left(\frac{Z_s}{|Z_x|} + Y_o |Z_x| \right) 100 \quad (3-1)$$

$$E_{ESR}(\%) = \begin{cases} \pm E_Z & \text{si } D_x \geq 10 \\ \pm E_Z \frac{\sqrt{1 + D_x^2}}{D_x} & \text{si } 10 > D_x > 0.1 \\ \pm \frac{E_Z}{D_x} & \text{si } D_x \leq 0.1 \end{cases} \quad (3-2)$$

$$E_{Xs}(\%) = E_C(\%) = \begin{cases} \pm E_Z \sqrt{1 + D_x^2} & \text{si } D_x > 0.1 \\ \pm E_Z & \text{si } D_x \leq 0.1 \end{cases} \quad (3-3)$$

avec Z_x et $D_x = \frac{ESR}{X_s} = \frac{1}{\tan(\phi)}$ respectivement l'impédance et le facteur de perte mesurés.

E_p , Y_o et Z_s sont des constantes fournies par le fabricant. Elles dépendent de la configuration de l'impédancemètre, notamment la tension d'excitation appliquée, de la largeur de la bande-passante ainsi que la fréquence de la mesure.

Suite à une caractérisation fréquentielle d'un condensateur de chaque fabricant, le module de l'impédance, la capacité et l'ESR sont affichés en fonction de la fréquence sur la figure 3-2 dans des conditions standards (25 °C).

Le polypropylène possédant de faibles pertes de polarisation, son rapport $|X_s/ESR|$ est particulièrement grand aux basses fréquences. L'incertitude de mesure est telle que l'ESR n'est pas mesurable avec assez de précision (cf. paragraphe 1.3.1) [14]. A 10 kHz, la valeur de l'ESR se stabilise. L'erreur de précision est alors de 100 %. Cependant à 100 kHz, la valeur de l'ESR reste quasi-identique à celle de 10 kHz avec une erreur de précision qui devient inférieure à 20 %, soit $\pm 3 \text{ m}\Omega$. Sur cette gamme de fréquence, l'effet de peau est encore négligeable ($< 0,5 \text{ m}\Omega$). De fait, la valeur de l'ESR à 10 kHz peut être approximée à celle à 100 kHz avec une erreur raisonnable.

La capacité du condensateur peut être extraite de la partie imaginaire de l'impédance du condensateur en négligeant sa partie inductive jusqu'aux alentours de sa fréquence de résonance. Cependant, même si la permittivité du polypropylène est plutôt stable, elle décroît un peu à partir 1 kHz. La capacité est ainsi réduite de 1 % à 1 MHz [19]. A 10 kHz,

cette baisse reste très négligeable. Afin d'utiliser la même fréquence de mesure que l'ESR, la fréquence de mesure de la capacité sera prise à 10 kHz pour la suite du manuscrit.

Afin d'étudier la répétabilité des mesures, ces dernières ont été effectuées sur 4 jours à 10 kHz, 25 °C pour quatre condensateurs différents. La variabilité des mesures par rapport à la valeur moyenne était respectivement de moins de 4,2 % pour l'ESR ($\pm 0,5 \text{ m}\Omega$) et de 0,02 % ($\pm 0,5 \text{ nF}$) pour la capacité.

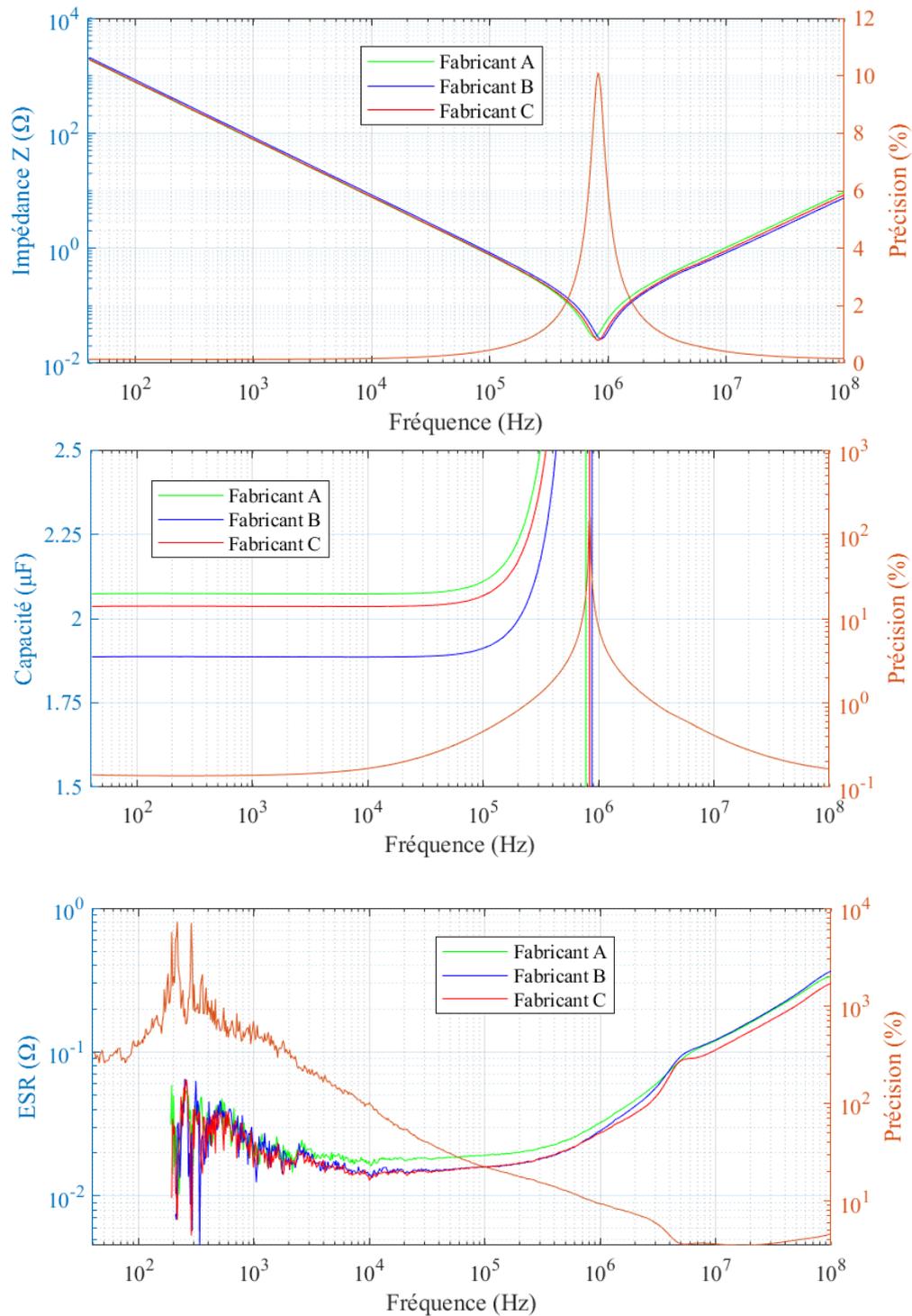


Figure 3-2 : Caractérisation initiale d'un condensateur de chaque fabricant

3.2.2 Identification de l'ESR

L'étude faite dans ce manuscrit se focalise sur le comportement des condensateurs sur leur plage de fréquences de fonctionnement. Les phénomènes se situant au-delà de leur fréquence de résonance ne sont pas considérés. Les mesures s'effectuent donc sur des fréquences ne l'excédant pas. De même, les fréquences de mesure sont choisies pour que l'effet de peau soit négligeable.

Le polypropylène possédant une polarisation atomique, la fréquence de la polarisation f_{pol} de ces dipôles électrostatiques ($\geq 10^{12}$ Hz) est très grande devant la fréquence de résonance des condensateurs en essais, de l'ordre de 700 à 800 kHz (cf. figure 3-2). De fait, pour des fréquences inférieures à leur fréquence de résonance, le terme $\left(\tau_{pol} \omega \frac{C_{vide}}{C}\right)^2$ de l'équation (1-13) est négligeable ($\tau_{pol} \approx \frac{1}{f_{pol}}$). Les pertes par polarisation sont donc fixes et valent $\tau_{pol} \frac{C_{pol}}{C^2}$. Par un calcul d'ordre de grandeur, la résistance induite par la polarisation atomique ($\sim < 0,0005$ m Ω) est alors négligeable devant la résistance provenant de la métallisation (~ 10 m Ω). En outre, l'erreur de mesure de l'impédancemètre sur l'ESR, de l'ordre du m Ω , ne permet pas de les identifier.

Le même raisonnement peut être conduit sur la polarisation électronique du polypropylène avec une fréquence de coupure plus grande encore. Ensuite, le polypropylène étant apolaire, il ne possède pas de polarisation d'orientation. Enfin, dans le cas où il y a une polarisation interfaciale à l'interface des films métallisés, leur fréquence de coupure est trop basse (< 1 Hz), pour qu'elle puisse être visible aux fréquences mesurées par l'impédancemètre (> 40 Hz).

Ainsi, il est donc considéré que l'ESR, de 100 à 100 kHz, est égale à la résistance de la métallisation R_s (connectiques et schoopage inclus). Le comportement des condensateurs films en essais peut se modéliser à l'aide du circuit électrique équivalent ci-dessous :

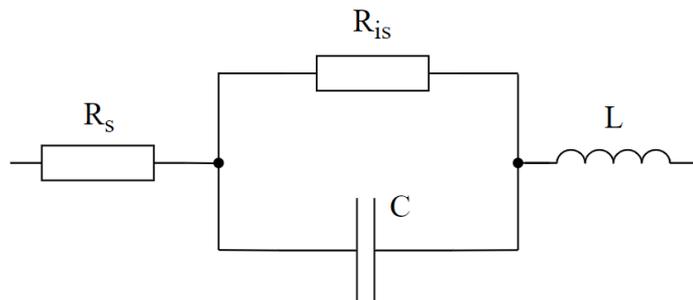


Figure 3-3 : Circuit électrique équivalent simplifié d'un condensateur à films métallisés en essai

R_{is} est la résistance du diélectrique et R_s la résistance de la métallisation.

Ainsi l'ESR correspondant à la partie réelle de l'impédance du dipôle est dépendante de la pulsation électrique ω , avec l'expression :

$$ESR(\omega) = R_s + \frac{R_{is}}{1 + (R_{is}C \omega)^2} \quad (3-4)$$

3.2.3 Caractéristiques des condensateurs en essais

Les statistiques sur les valeurs de l'ESR (10 kHz) et de la capacité (10 kHz) pour 40 condensateurs par fabricant sont présentées dans le tableau 3-2. Il est aussi indiqué les statistiques sur les valeurs de la résistance d'isolement pour 29 condensateurs par fabricant.

La méthode de mesure de la résistance d'isolement est détaillée dans le paragraphe 4.3.1. La précision et la répétabilité sont discutées dans le paragraphe 4.3.2. En considérant les paragraphes 3.2.1 et 3.2.2, les équivalences suivantes seront considérées par la suite : ESR (10 kHz) \approx ESR (50 Hz) \approx R_s .

25 °C	Capacité (μ F) (10 kHz)		R_s (m Ω) (10 kHz)		Résistance d'isolement (G Ω) (100 V, 60 s)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Fabricant A	2,08	0,01	14,8	2,4	97,6	29,8
Fabricant B	1,90	0,02	12,5	2,5	89,9	21,6
Fabricant C	2,07	0,04	12,3	1,9	118,8	18,3

Tableau 3-2 : Moyennes et dispersions des caractérisations initiales selon les fabricants

Un condensateur neuf de chaque fabricant a été débobiné afin de constater l'état initial des films métallisés. Les images sont affichées sur la figure 3-4.

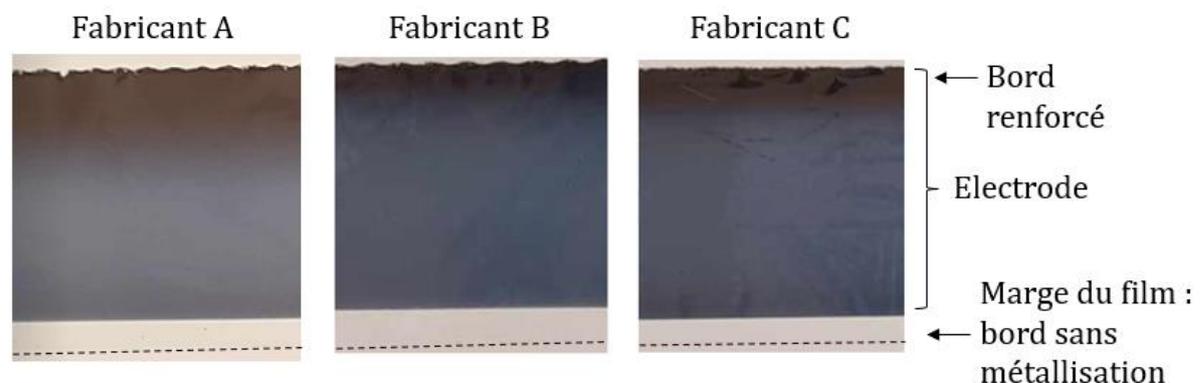


Figure 3-4 : Photographie d'une portion de film métallisé d'un condensateur neuf de chaque fabricant

Les intensités de gris informent sur l'épaisseur des électrodes. Il apparaît que tous les bords du côté du schoopage sont renforcés. La métallisation des condensateurs du fabricant A paraît plus fine ou de constitution sensiblement différente des deux autres.

Tous les condensateurs possèdent une structure interne de base (cf. paragraphe 1.2.1).

Au niveau des dimensions, la largeur d'un film métallisé est aux alentours de 2,5 cm et l'épaisseur du diélectrique aux alentours de 5 à 10 μ m.

3.3 Banc de vieillissement

Afin d'atteindre les conditions fixées en température, les condensateurs ont été placés dans des étuves. La consigne de tension est obtenue grâce à la tension entre phase de deux auto-transformateurs triphasés alimentés par le réseau EDF.

Tous les condensateurs d'un même essai sont connectés en parallèle sur un même circuit imprimé. Une vue du banc de test est présentée sur la figure 3-5.

Aucune résistance de charge n'a été ajoutée. Les pics de courant à la mise sous tension et à l'arrêt des condensateurs ont été évités grâce à l'augmentation manuelle et progressive de la tension en sortie des auto-transformateurs.

Périodiquement, les essais ont été interrompus afin de sortir les condensateurs de leur étuve et les caractériser à 25 °C. Un délai d'attente de 2 à 3 heures a été respecté après chaque sortie d'étuve afin de permettre aux condensateurs de se refroidir à la température ambiante avant leur caractérisation. L'interruption de vieillissement due aux caractérisations était en moyenne d'une journée.

Quelques autres interruptions involontaires ont eu lieu sur toutes la durée des essais. La plupart étaient de petites perturbations (pertes de consigne de température), résolues dans la journée. Cependant, il y a eu une interruption majeure : les essais ont été suspendus un mois vers les 10 000 h de vieillissement.

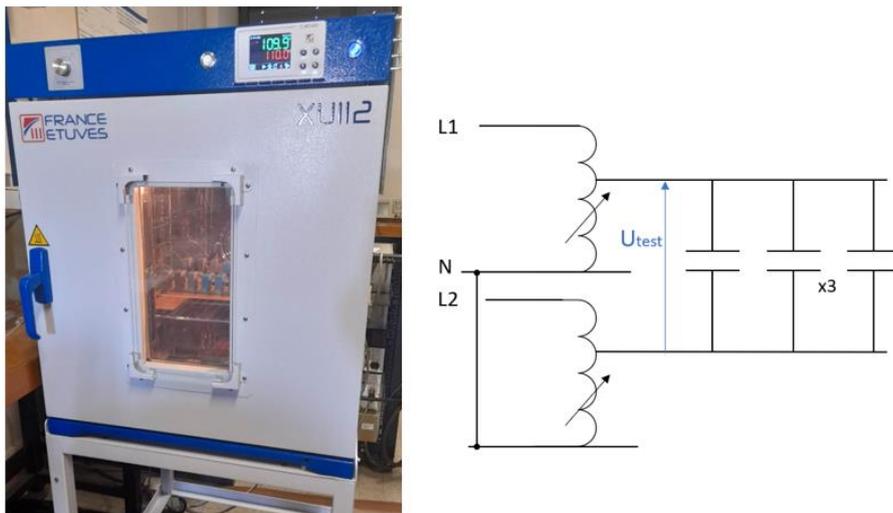


Figure 3-5 : Photographie et schéma électrique d'un des bancs de test

3.4 Résultats expérimentaux

3.4.1 Evolution des indicateurs de vieillissement

Les condensateurs au sein d'un essai ont été numérotés selon le code suivant : A, B, C selon le fabricant et 1, 2, 3 pour les différencier au sein de leur lot. Les résultats des caractérisations au cours du vieillissement pour chacun des essais, sont présentés sur les figures ci-dessous. L'affichage des courbes en fonction des différents fabricants est disponible en annexe (cf. annexe B).

Sur l'ensemble des essais, quatre condensateurs ont subi une défaillance catalectique (3A_110°C-1,4U_n, 3B_110°C-1,3U_n, 2C_110°C-1,3U_n, 3C_110°C-1,3U_n). Le condensateur 3A_110°C-1,4U_n a subi un emballement et les trois autres sont morts en circuit ouvert (cf. 3.4.2).

Cinq autres condensateurs ont été retirés du banc de vieillissement en raison du dépassement du seuil de leur fin de vie (1A_110°C-1,4U_n, 1A_110°C-1,3U_n, 2A_110°C-1,3U_n, 3A_110°C-1,3U_n, 1C_110°C-1,3U_n).

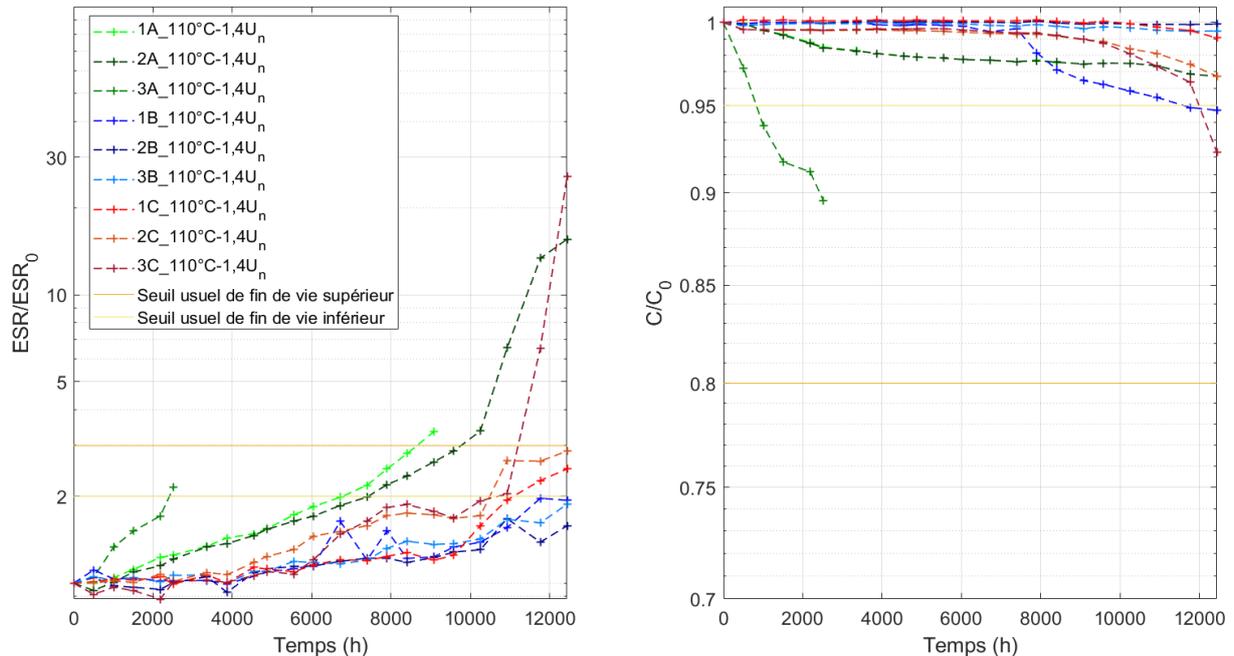


Figure 3-6 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 25 °C) des condensateurs de l'essai 1 : 110 °C/ 1,4 U_n

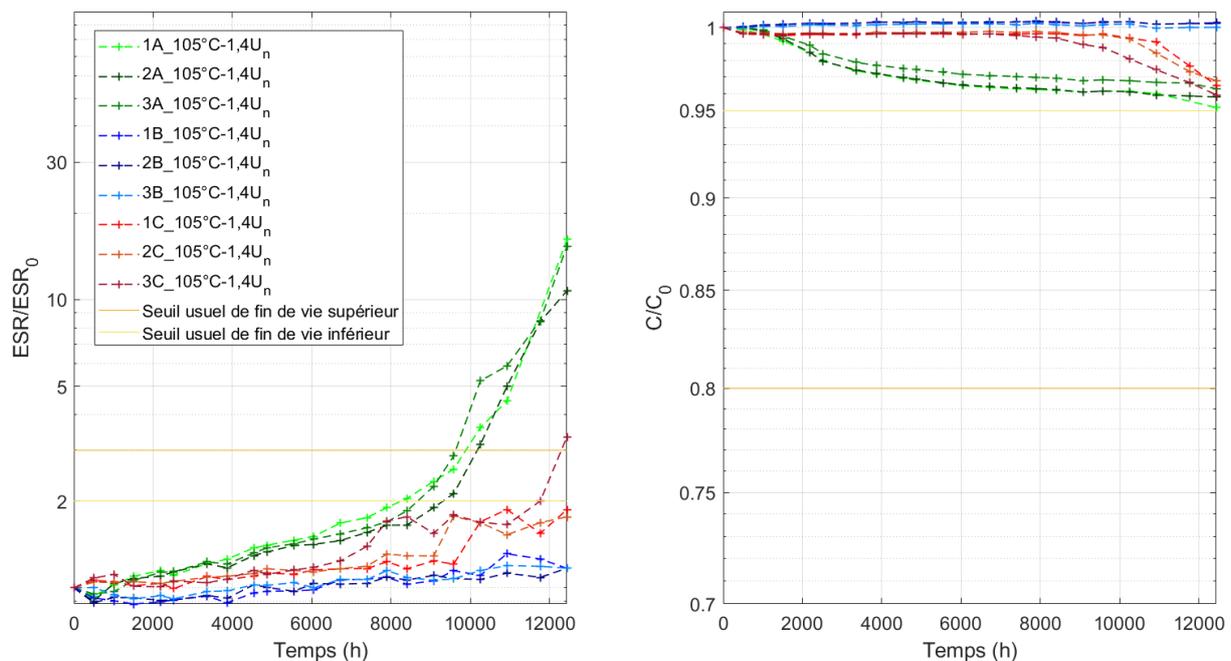


Figure 3-7 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 25 °C) des condensateurs de l'essai 2 : 105 °C/ 1,4 U_n

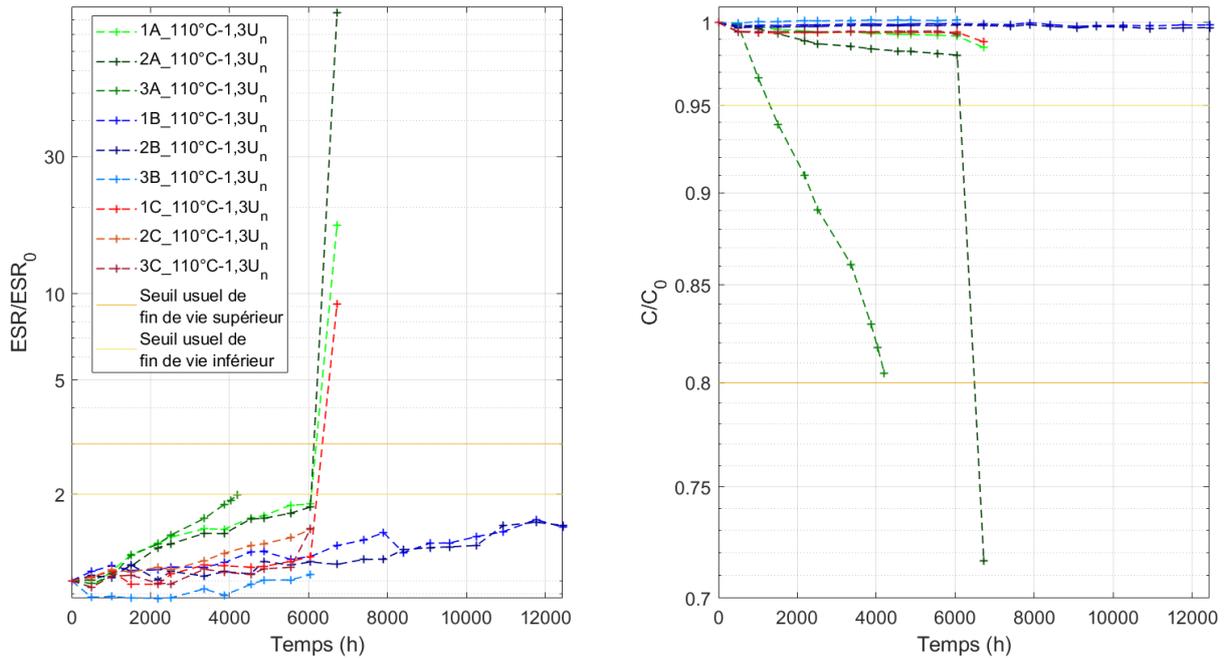


Figure 3-8 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 25 °C) des condensateurs de l'essai 3 : 110 °C/ 1,3 U_n

La majorité des pannes se sont produites lors de l'essai 110°C-1,3U_n. C'est un résultat surprenant étant donné que ce n'est pas l'essai le plus contraignant. En outre, lors de cet essai, les pannes ont eu lieu de manière extrêmement rapprochées dans le temps. Sur les neuf condensateurs de l'essai 110°C-1,3U_n, six ont cessé de fonctionner entre 6000h et 7000h de vieillissement.

Une série de panne de cette ampleur n'ayant pas été observée pour les autres essais, il est statistiquement probable que les pannes aient été déclenchées par une contrainte extérieure inconnue. L'hypothèse d'une cause interne aux composants est écartée. Les condensateurs provenaient des mêmes lots que ceux des autres essais et tous les types de condensateur ont été touchés, indépendamment de leur fabricant.

La principale différence entre cet essai et les autres réside dans leur alimentation électrique. La tension n'est pas appliquée par le même auto-transformateur. Ainsi, il peut être supposé que ce dernier ait connu des surcharges ou des surtensions entre les 6000h et les 7000h de vieillissement. Faute de mesures de courant ou de tension en temps réel, cette hypothèse ne peut pas être confirmée.

Au niveau des défaillances par dérives, l'ESR des condensateurs semble croître exponentiellement sur l'ensemble des essais. L'allure de leur dégradation est similaire d'un fabricant à un autre. Sur l'ensemble des essais, le seuil de fin de vie usuel de 200 % a été franchi par environ 2/3 des condensateurs.

A contrario, l'évolution de la capacité connaît plus de disparités. Cinq condensateurs ont atteint graduellement le seuil de fin de vie fixé à 5 % de dégradation de la capacité. Sur l'ensemble des essais, les condensateurs du fabricant B ont très peu vieilli. Les condensateurs 1B_110°C-1,4U_n et 3B_110°C-1,3U_n mis à part, la dégradation de leur capacité n'a pas excédé 0,05 %. Ce manque de données ne permet pas d'extraire leur dynamique de vieillissement. Heureusement, les condensateurs des autres fabricants ont subi des dégradations plus conséquentes.

Sur l'ensemble des essais, l'évolution de la capacité semble, à première vue, suivre une dynamique propre à chaque fabricant. Cependant, 3 phases communes sont identifiables.

Au début du vieillissement, si une dégradation de la capacité est observée, elle a tendance à décélérer progressivement avant de se stabiliser. C'est le cas de tous les condensateurs A_105°C-1,4U_n jusqu'à 4000 h. Dans le cas contraire, la dégradation est quasi-nulle (cf. tous les condensateurs B_105°C-1,4U_n) ou mène directement à la panne du condensateur (cf. composants 3A_110°C-1,4U_n et 3A_110°C-1,3U_n).

Ensuite, la capacité des condensateurs de l'ensemble des essais connaît une phase de stabilisation. Une décroissance reste présente, mais elle est très faible et très lente. Il s'agit par exemple du comportement des condensateurs C_105°C-1,4U_n entre 1000 h et 8000 h de vieillissement ou A_105°C-1,4U_n entre 4000 h et 11 000 h de vieillissement.

Enfin, vers la fin du vieillissement, une dernière phase de dégradation rentre en jeu. La décroissance de la capacité devient significative et se maintient. Elle a même tendance à s'accélérer. Cette phase est visible pour tous les condensateurs C_105°C-1,4U_n à partir de 8000 h de vieillissement ou encore pour les condensateurs 2A_110°C-1,4U_n et 1A_105°C-1,4U_n à partir de 11 000 h de vieillissement.

Ces trois phases ne sont pas sans rappeler celles de la courbe en baignoire présentée dans le paragraphe 2.3.4. Un agrandissement des courbes de dégradation de la capacité de l'essai 105°C-1,4U_n est disponible en annexe (cf. figure B-4) afin de faciliter la visualisation de ces différentes phases.

3.4.2 Analyse post-mortem

3.4.2.1 Défaillances par dérive

Les condensateurs 2A_105°C-1,4U_n, 2C_105°C-1,4U_n et 3B_110°C-1,3U_n ont été ouverts afin d'observer les mécanismes de dégradation mis en jeu. Tous ont présenté des signes d'auto-cicatrisations. Certains sont visibles à l'œil nu. Des exemples sont disponibles sur la figure suivante :

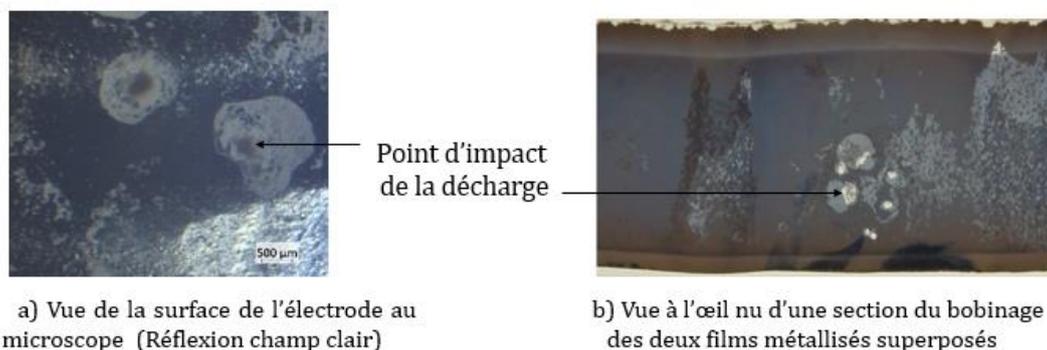


Figure 3-9 : Signes de décharges électriques sur les films métallisés du condensateur 3B_110°C-1,3U_n

Les trous dans la métallisation ont des démarcations très nettes. Le contraste de couleur des électrodes de l'image b) indique qu'ils sont présents sur les deux couches de films

métallisés. Enfin, Le point d'impact, visible au microscope optique sur l'image a, confirme l'occurrence d'une auto-cicatrisation.

Outre, les signes d'auto-cicatrisation, les films métallisés contiennent également beaucoup de signes de transfert de métallisation. Leur état global est présenté sur la figure 1-10.

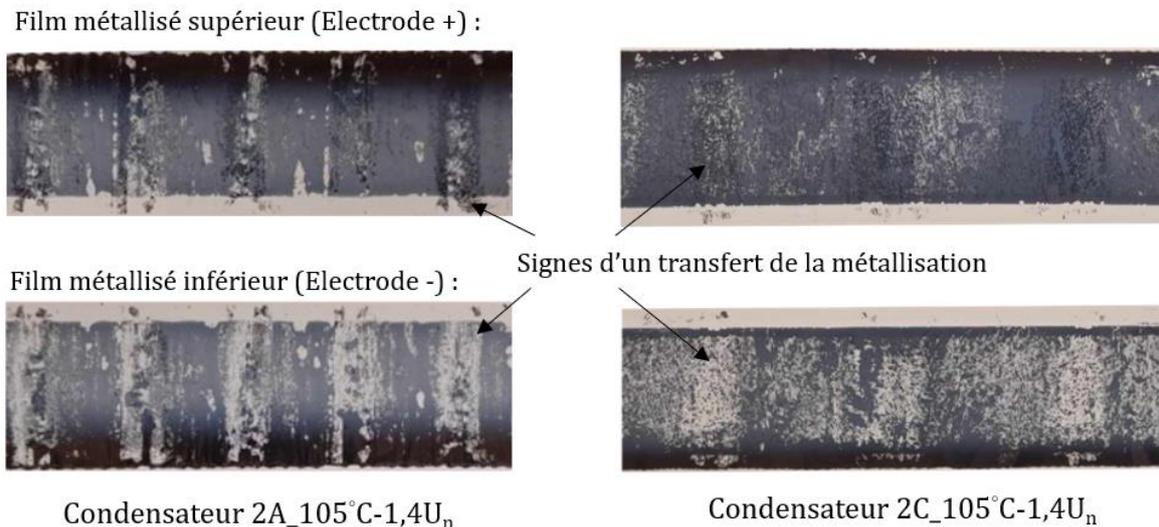


Figure 3-10 : Etat des films métallisés de deux condensateurs de l'essai 2 : 105°C/1,4 U_n après vieillissement

Les films présentent des portions d'une teinte plus sombre qu'à l'origine (cf. figure 3-4). Il y a des zones avec un surplus de métallisation quand d'autres en sont totalement dépourvues. De plus, ces zones sont symétriques d'une électrode à l'autre. Au moment de la séparation des deux films métallisés, une partie de la métallisation initialement présente sur l'un s'est donc décollée pour s'accrocher sur l'autre.

La différence entre la proportion d'auto-cicatrisations entre les condensateurs 2A_105°C-1,4U_n et 2C_105°C-1,4U_n est masquée par la prédominance des transferts de métallisation.

A titre de comparaison, le condensateur 3B_110°C-1,3U_n présente, quant-à-lui, significativement moins de transferts et de signes d'auto-cicatrisation que les deux condensateurs de l'essai 105°C-1,4U_n. Cependant, son vieillissement a été arrêté plus tôt à cause de la défaillance catalectique qu'il a subie. Les résultats sont donc cohérents en ce qui concerne les auto-cicatrisations. En ce qui concerne le transfert, nous pouvons supposer qu'il est facilité par l'exposition prolongée des films aux fortes températures des essais.

Enfin, lors de ces analyses, aucun signe évident de corrosion n'a été observé. La majorité des percements des films est associée à un point de fusion du diélectrique. Au vu des conditions climatiques auxquelles ont été maintenus les condensateurs durant les essais, c'est à dire dans des enceintes thermiquement isolées sous des fortes températures, l'humidité relative à laquelle ils ont été exposés peut être considérée comme basse.

3.4.2.2 Défaillances catalectiques

Comme cité dans le paragraphe 3.4.1, les condensateurs 3A_110°C-1,4U_n, 3B_110°C-1,3U_n, 2C_110°C-1,3U_n, 3C_110°C-1,3U_n ont subi une défaillance catalectique.

La cause de la défaillance du condensateur 3A_110°C-1,4U_n est très claire. Son diélectrique a fondu : il a subi un emballement thermique. Une illustration de son état est présentée sur la figure ci-dessous :



Figure 3-11 : Photographie du condensateur 3A_110°C-1,4U_n après vieillissement

La cause de la panne des trois autres condensateurs n'est pas perceptible au premier coup d'œil. Ils ne possèdent aucun signe extérieur d'emballement. Pourtant, leur capacité a bien chuté soudainement à environ 0 μF .

Afin d'investiguer sur la cause de ces pannes, une analyse post-mortem a été effectuée sur le condensateur 3B_110°C-1,3U_n. Sa caractérisation fréquentielle est présentée ci-dessous :

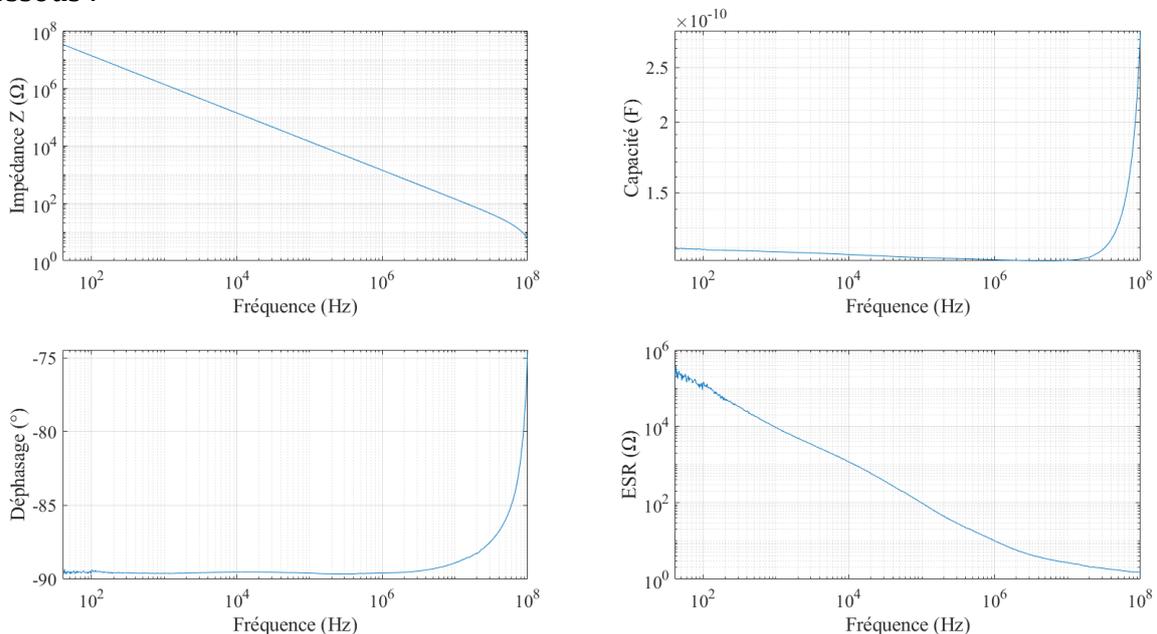


Figure 3-12 : Caractérisation fréquentielle post-mortem du condensateur 3B_110°C-1,3U_n

Le module de l'impédance est strictement décroissant avec la fréquence. Il n'y a plus aucun signe de comportement inductif du composant imputable aux connexions (cf. figure 3-2). Le composant se comporte comme un circuit ouvert. Le déphasage à -90 ° sur l'ensemble de la bande de fréquence de mesure et la valeur de capacité, réduite d'un

facteur 10 000 corrobore cette affirmation. Cependant, l'ESR mesurée est trop basse pour être celle d'un circuit complètement ouvert.

Lors du débobinage du composant 3B_110°C-1,3U_n, pour confirmer la rupture de ces connectiques, aucun signe de dégradation entre les électrodes et le schoopage n'a été observé. Au contraire, un point de fusion a été visualisé entre les deux films métallisés. Il est situé au cœur du condensateur, sur une des couches les plus internes du bobinage. Il est visible sur la figure ci-dessous :

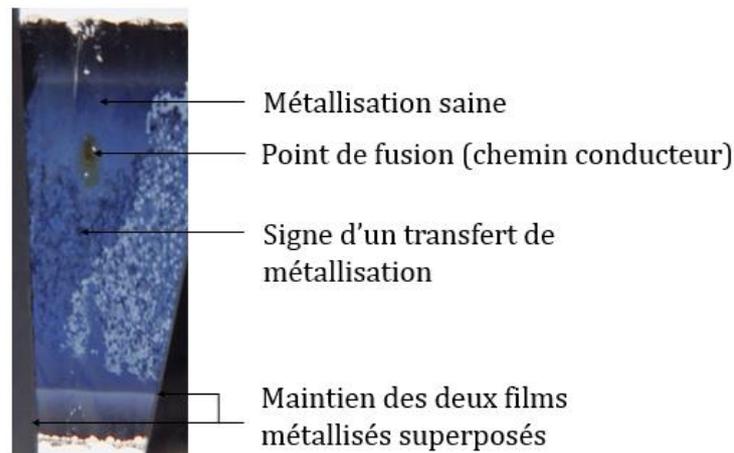


Figure 3-13 : Vue du point de fusion présent au cœur du bobinage du condensateur 3B_110°C-1,3U_n traversant les deux films métallisés

A l'endroit du point de fusion reliant l'électrode inférieure à l'électrode supérieure, la résistance entre films a été mesurée. Elle variait aux alentours de 140 Ω. Un chemin conducteur traverse le diélectrique, probablement causé par une décharge électrique.

Ce résultat n'est à première vue pas du tout cohérent avec les résultats de la caractérisation fréquentielle. Un court-circuit interne implique un déphasage du composant proche de 0 ° et non de - 90 °. Or, le composant reste globalement capacitif.

Cependant, ce résultat nous renseigne qu'une décharge de forte intensité a eu lieu dans le composant. Il faut aussi remarquer que la métallisation ne s'est pas sublimée au point d'impact. La fonte du diélectrique ne s'étant pas propagée, le processus d'auto-cicatrisation a été interrompu. Ces constats sont loin d'être incompatibles avec une rupture des connectiques du composant.

L'hypothèse la plus probable est que le condensateur a subi une décharge qui a mené à un fort appel de courant. Ce courant n'aurait pas été supporté par une liaison entre des connectiques, entraînant avec sa rupture la déconnexion du condensateur. Compte-tenu de nos observations, le plus plausible est que la rupture ait eu lieu sur la liaison entre les terminaisons du condensateur et le schoopage. Les terminaux étant enveloppés dans la résine isolante, ils sont souvent arrachés avec la résine lors de l'ouverture du composant pour avoir accès aux films métallisés. Il devient alors aisé de manquer un défaut de connexion à cet endroit. La capacité mesurée serait alors la capacité de l'air à l'endroit du défaut en série avec la capacité restante des films métallisés.

Cette théorie renforce l'hypothèse d'une mal-fonction de l'auto-transformateur de l'essai 3 : 110°C-1,3U_n qui aurait causé des pics de courant inusuels dans les condensateurs.

3.5 Modélisation de l'impact de l'auto-cicatrisation

À la suite des observations des paragraphes précédents, il semble que l'auto-cicatrisation est le mécanisme de défaillance prédominant, à l'origine de la dégradation de la capacité et de l'ESR sur l'ensemble des condensateurs des essais.

Pour rappel, les auto-cicatrisations sont la conséquence de défauts au sein du diélectrique. De manière similaire à un composant électronique, le diélectrique comporte des défauts de jeunesse, dû au processus de fabrication du condensateur et voit apparaître des défauts d'usure au fur et à mesure de son vieillissement. Plus le défaut est important, plus la perte de capacité occasionnée est grande.

Or, la dynamique de l'évolution de la capacité comporte des similitudes avec la courbe en baignoire : sa dégradation décélère ou est faible dans un premier temps (1^{ère} phase), puis se stabilise dans un second temps (2^{ème} phase) avant de s'aggraver dans un troisième temps (3^{ème} phase).

Ainsi, un principe de modélisation commence à apparaître, consistant à reprendre et développer l'idée à l'origine de l'équation (2-33) (cf. paragraphe 2.3.4) [88]. Chaque perte de capacité serait due à une auto-cicatrisation dont le taux de défaillance varierait dans le temps.

3.5.1 Hypothèses

Les auto-cicatrisations sont considérées comme le mécanisme majoritaire de défaillance. Les autres sont négligés.

La permittivité du film $\epsilon_0 \epsilon_r$ est considérée constante sur l'ensemble des caractérisations à 25 °C. L'impact du vieillissement lors des essais et des changements de température subis lors des caractérisations ne sont pas pris en compte.

La diminution de l'épaisseur du diélectrique d entre les électrodes par pression électrostatique est considérée négligeable. Ainsi la capacité devient uniquement fonction de la dégradation de la surface des électrodes $A(t)$ selon l'équation (1-6) :

$$C(t) \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A(t)}{d} \quad (3-5)$$

Les auto-cicatrisations se forment à cause de défauts locaux du diélectrique. Durant le vieillissement, hors défaillances cataclysmiques, il est supposé que la présence d'un défaut à un endroit M n'impacte pas la taille d'un défaut à un endroit N , même s'ils sont proches voisins. Les auto-cicatrisations deviennent donc des événements indépendants les uns des autres.

Soit λ_a le taux d'occurrence d'une auto-cicatrisation. Il est supposé que λ_a suit la forme d'une courbe en baignoire. À $t=0$, λ_a est élevé à cause des impuretés initiales présentes dans les films qui ont pu se former lors du procédé de fabrication du condensateur, ce qui est équivalent à des défauts de jeunesse. Au fur et à mesure de l'élimination de ces défauts, λ_a décroît jusqu'à se stabiliser. Enfin, après une certaine période de vieillissement, des impuretés réapparaissent, dues aux contraintes exercées sur le diélectrique (cf. paragraphe 1.4.2.3). Elles sont équivalentes à des défauts d'usure. En conséquence, λ_a croît exponentiellement jusqu'à la mort du condensateur.

En utilisant la loi de Weibull telle qu'elle est définie, λ_a se décompose en plusieurs fonctions, dont il faut réussir à identifier automatiquement les limites temporelles. Afin, de s'affranchir de ce problème, nous préférons travailler avec une fonction continue sur l'ensemble des trois phases de la courbe en baignoire. Dans cette situation, une fonction générique approchant le comportement supposé de λ_a est le cosinus hyperbolique.

$$\text{On pose donc } \lambda_a(t) = \frac{1}{T} \frac{(a e^{-(t-H)/D} + b e^{(t-H)/D})}{2} \quad (3-6)$$

avec $\lambda_a(t) \geq 0$ et a, b, D, H et T des constantes positives. D décrit la dilation de la fonction cosinus hyperbolique. a et b décrivent respectivement la décélération de λ_a avec la diminution des défauts de jeunesse et l'accélération de λ_a dû à l'usure. H décrit la translation horizontale de la fonction hyperbolique vers $+\infty$ et T permet le réglage de l'intervalle de temps où la probabilité λ_a est constante.

Afin de simplifier l'expression de $\lambda_a(t)$, il est posé $\alpha = a \frac{1}{2T} e^{H/D}$ et $\beta = b \frac{1}{2T} e^{-H/D}$. Ainsi $\lambda_a(t)$ devient :

$$\lambda_a(t) = \alpha e^{-t/D} + \beta e^{t/D} \quad (3-7)$$

3.5.2 Modélisations

3.5.2.1 Modélisation de la capacité

Du fait de leur forme rectangulaire, la surface des électrodes A du condensateur peut se décomposer en une multitude de surface unités A_i identiques entre elles telle que :

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (3-8)$$

avec n le nombre total d'unités d'électrode.

En combinant cette équation avec l'équation (3-5), on obtient une expression de la capacité à un instant donné :

$$C = \sum_{i=1}^n \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_i}{d} = \sum_{i=1}^n C_i = n C_i \quad (3-9)$$

Ainsi la capacité totale C du condensateur peut être considérée comme la capacité équivalente d'une multitude d'unités de capacité C_i en parallèle les unes des autres. Une unité de capacité se compose d'une unité de surface d'électrodes A_i séparée par l'unité de portion de diélectrique correspondante. Le principe de la décomposition est illustré sur la figure 3-14.

L'auto-cicatrisation détruit une portion des électrodes et le diélectrique entre les deux. En conséquence, la capacité correspondante disparaît. L'unité de capacité C_i est choisie de telle sorte à ce qu'elle soit la capacité détruite par l'occurrence d'une auto-cicatrisation.

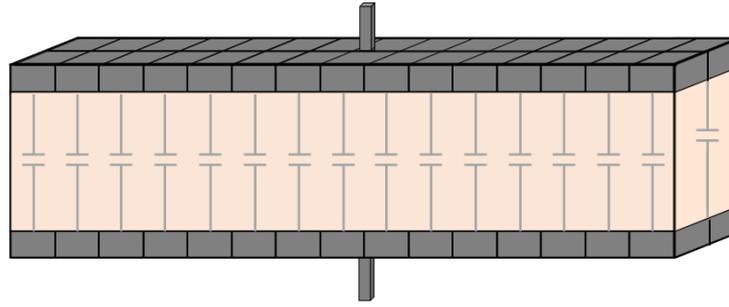


Figure 3-14 : Schéma de principe de décomposition du condensateur

La probabilité $P(C_i)$ de perdre seulement une unité C_i parmi celles qui restent, correspond à l'union des probabilités de perdre chacune des unités C_i restantes $P(C_1), P(C_2), \dots, P(C_{n-k})$. k est le nombre d'auto-cicatrisations déjà passé, i.e. le nombre de C_i initialement perdue.

D'après nos hypothèses, les probabilités $P(C_1), P(C_2), \dots, P(C_{n-k})$ sont égales. Comme une seule unité C_i est perdue, l'intersection des probabilités $P(C_1), P(C_2), \dots, P(C_{n-k})$ vaut 0. Ainsi :

$$P(C_i) = P(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{n-k}) = \sum_{j=1}^{n-k} P(C_j) = (n - k) P(C_1) \quad (3-10)$$

En cas de perte effective, la variation de la capacité correspond à la capacité perdue C_i .

Ainsi, la variation de la capacité due à une auto-cicatrisation sur un intervalle de temps Δt est égale au produit de la probabilité $P(C_i)$ sur l'intervalle de temps Δt (ce qui correspond à un taux de défaillance) et de C_i . En considérant λ_a constant, le taux de défaillance associé aux probabilités $P(C_1), P(C_2), \dots, P(C_{n-k})$, on obtient alors :

$$\frac{\Delta(C_0 - k C_i)}{\Delta t} = - \lambda_a (n - k) C_i \quad (3-11)$$

avec C_0 , la capacité initiale

En généralisant dans le domaine temporel continu et en considérant la dépendance de λ_a au temps, la variation de capacité dans le temps devient fonction de la fréquence de destruction d'une unité de capacité C_i , soit $\lambda_a(t)$, et du nombre d'unités de capacité restantes selon l'équation suivante :

$$\frac{dC(t)}{dt} = - \lambda_a(t) C(t) \quad (3-12)$$

ce qui implique :

$$C(t) = C_0 e^{-\Lambda_a(t)} \quad (3-13)$$

avec $C_0 = C(0)$ et $\Lambda_a(t) = \int_0^t \lambda_a(t) dt$

Ainsi :

$$\Lambda_a(t) = - \alpha D e^{-t/D} + \beta D e^{t/D} + \alpha D - \beta D \quad (3-14)$$

3.5.2.1 Modélisation de la résistance de la métallisation

La résistance de la partie active de l'électrode R_{se} peut se décomposer de manière similaire. Cependant, il convient de noter qu'elle n'est pas égale à la résistance de métallisation du condensateur R_s , soit l'ESR à 10 kHz. En effet, R_s comprend tout le volume métallique du condensateur dont les connectiques comme les terminaux et le schoopage. La résistance de la partie active de l'électrode est seulement la résistance de la surface effective des électrodes, là où sont stockées les charges électriques, soit la seule résistance impactée par le mécanisme d'auto-cicatrisation. En conséquence, il est posé :

$$R_s = R_{se} + R_c \quad (3-15)$$

avec R_c , la résistance des connectiques, schoopage inclus. L'auto-cicatrisation étant le seul mécanisme de vieillissement affectant les électrodes, R_c est invariant durant le vieillissement. Elle est donc considérée comme une constante.

A la différence de la décomposition de la capacité, la décomposition de R_{se} se fait en unités de résistance R_{sei} mises à la fois en parallèle et en série les unes des autres de façon à réaliser un maillage des électrodes. Elle est illustré sur la figure 3-15.

On pose n_1 le nombre de R_{sei} mis en série sur la longueur d'une électrode et m_1 le nombre de R_{sei} en parallèle sur une largeur. R_{se0} , la résistance initiale, s'exprime alors selon l'équation suivante :

$$R_{se0} = 2 n_1 \frac{R_{sei}}{m_1} \quad (3-16)$$

$2 n_1 m_1$ est le nombre total de R_{sei} . Le facteur 2 est lié au fait qu'il y a deux électrodes. On choisit l'unité R_{sei} de manière que cela soit l'unité de résistance perdue par l'occurrence d'une auto-cicatrisation sur l'une des deux électrodes.

Pour simplifier la modélisation, il est supposé que les auto-cicatrisations n'ont pas lieu deux fois sur une même colonne $L_j \in [1, n_1]$ et ne surviennent pas sur la même ligne $l_j \in [1, m_1]$ sur deux colonnes consécutives. L'intérêt est que le gain de résistance soit identique à chaque occurrence d'auto-cicatrisation.

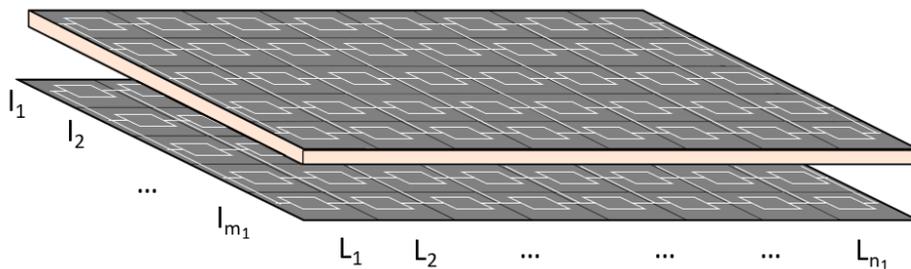


Figure 3-15 : Schéma de principe de décomposition des électrodes

Ainsi, la modélisation considère que k , le nombre d'auto-cicatrisations, est inférieur à n_1 . Cette restriction implique que la modélisation ne peut pas décrire la disparition complète de la métallisation, mais juste donner l'allure du début de la dégradation.

En considérant que R_{se} est donnée par la somme des résistances sur les colonnes sans auto-cicatrisation $2 (n_1 - k) \frac{R_{sei}}{m_1}$ et celles des résistances sur les colonnes avec une auto-cicatrisation $2 k \frac{R_{sei}}{(m_1 - 1)}$, on obtient son expression selon k :

$$R_{se}(k) = 2 (n_1 - k) \frac{R_{sei}}{m_1} + 2 k \frac{R_{sei}}{(m_1 - 1)} \quad (3-17)$$

Cela permet alors de remonter jusqu'au gain de résistance induit par une auto-cicatrisation :

$$\Delta R_{se} = R_{se}(k+1) - R_{se}(k) = R_{sei} \frac{2}{m_1 (m_1 - 1)} \quad (3-18)$$

$$\text{soit } R_{se}(k) = R_{se0} + k \frac{2}{m_1 (m_1 - 1)} R_{sei}.$$

Par analogie avec la modélisation de la capacité avec λ_a constant, on obtient alors :

$$\frac{\Delta(R_{se0} + k \frac{2}{m_1 (m_1 - 1)} R_{sei})}{\Delta t} = \lambda_a \left((n_1 - k) R_{sei} \frac{2}{m_1 (m_1 - 1)} + R_{se0} - R_{se0} \right) \quad (3-19)$$

Et donc, en repassant dans le domaine temporel :

$$\frac{dR_{se}(t)}{dt} = \left(R_{se0} \frac{m_1}{m_1 - 1} - R_{se}(t) \right) \lambda_a(t) \quad (3-20)$$

Ce qui implique, en la combinant avec l'équation (3-15) :

$$R_s(t) = R_{se0} \frac{m_1}{m_1 - 1} + R_c - R_{se0} \left(\frac{1}{m_1 - 1} \right) e^{-\Lambda_a(t)} \quad (3-21)$$

Il convient de noter que $R_{se0} \frac{m_1}{m_1 - 1} = R_{se}(n_1) = 2 n_1 \frac{R_{sei}}{(m_1 - 1)}$. Ainsi, $R_s(t)$ tend vers $R_{se}(n_1) + R_c$, mettant en évidence l'erreur intrinsèque du modèle. En posant $\kappa = \frac{1}{m_1 - 1} R_{se0}$, une constante positive, l'expression se simplifie :

$$R_s(t) = R_{s0} + \kappa - \kappa e^{-\Lambda_a(t)} \quad (3-22)$$

Avec $R_{s0} = R_s(0)$

$\Lambda_a(t) = -\alpha D e^{-t/D} + \beta D e^{t/D} + \alpha D - \beta D$, commun à l'équation (3-14).

Ainsi en connaissant la capacité et la résistance de métallisation initiale, R_{s0} et C_0 , il reste 4 paramètres à déterminer : κ , α , β et D pour obtenir la loi de vieillissement des deux indicateurs principaux de santé du condensateur.

3.6 Evaluation du modèle de vieillissement par auto-cicatrisation

L'adaptation d'une fonction à des données par le biais de ses paramètres est désignée sous le terme « ajustement ». Une même approche est utilisée dans l'ensemble du manuscrit (dans les paragraphes 3.6 et 4.11) pour déterminer les paramètres des lois de vieillissement.

Afin d'identifier les paramètres des modèles, un algorithme d'optimisation métaheuristique est utilisé, nommé « gradient-based optimizer » [112]. Il est inspiré des méthodes de descente de gradient et y intègre un facteur permettant de s'échapper d'un

optimum local. Connaissant les données mesurées, une fonction cible ainsi que le nombre de paramètres à identifier et leurs bornes, l'algorithme renvoie en sortie les valeurs des paramètres de la fonction cible qui minimisent un critère préétabli.

Ici, le critère à minimiser est l'erreur quadratique moyenne (MSE) entre la fonction cible et les données :

$$MSE = \frac{1}{n_{data}} \sum_{k=1}^{n_{data}} (y_{kréel} - y_{kmodèle})^2 \quad (3-23)$$

n_{data} étant le nombre de mesures recueillies, $y_{kréel}$ étant la mesure k prise à un instant t_k et $y_{kmodèle}$ la valeur donnée par l'image de t_k par la fonction identifiée.

3.6.1 Ajustement avec les données de vieillissement en température et tension

Dans un premier temps, l'objectif est de confronter le modèle aux données. Quatre condensateurs ont été sélectionnés pour représenter la pluralité des formes des courbes de dégradations sur l'ensemble des essais, dont au moins un de chaque fabricant. Les résultats de l'ajustement des données de vieillissement de ces condensateurs avec les modèles proposés (cf. équations (3-13) et (3-22)) sont présentés sur la figure 3-16 et la figure 3-17.

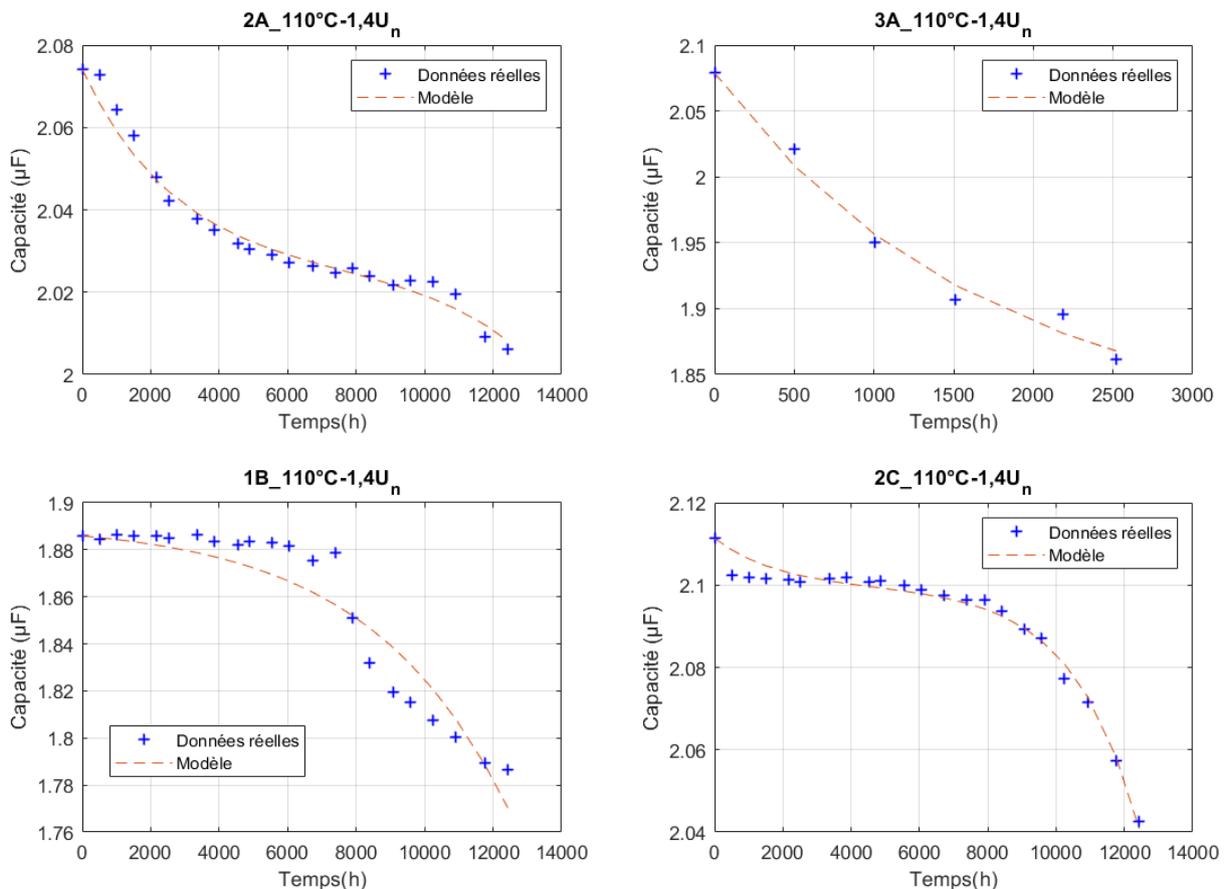


Figure 3-16 : Ajustement du modèle de la capacité sur des courbes de l'essai 1 : 110 °C/ 1,4 Un

L'ajustement du modèle de R_s (ici égal à l'ESR) a été effectué en reprenant les paramètres préalablement identifiés lors de l'ajustement de la capacité (i.e. α , β et D) ; seul le paramètre κ a été adapté.

Dans l'ensemble, le modèle proposé (3-13) semble pertinent pour décrire l'évolution de la capacité. La seule exception est le condensateur 1B_110°C-1,4U_n, ce qui n'est pas surprenant étant donné que c'est le seul condensateur dont la dégradation ne suit pas la tendance générale décrite dans le paragraphe 3.4.1. Après une période sans défaut, pouvant correspondre à la 1^{ère} et à la 2^{ème} phase du vieillissement, il connaît une forte chute de sa capacité. Elle advient entre 7000 et 8000 h de vieillissement. Cependant, au lieu de se répéter en s'aggravant, les dégradations de la capacité reprennent avec une pente douce. La 3^{ème} phase du vieillissement n'est pas entamée. Cette variation forte et ponctuelle de la capacité pourrait être dû à un évènement inhabituel. Une hypothèse serait qu'une succession d'auto-cicatrisations plus intenses que les autres ait eu lieu pour une raison inconnue. Dans tous les cas, le modèle ne prend pas en compte cette possibilité, il conviendrait donc de l'adapter ou de le compléter en y ajoutant d'autres termes.

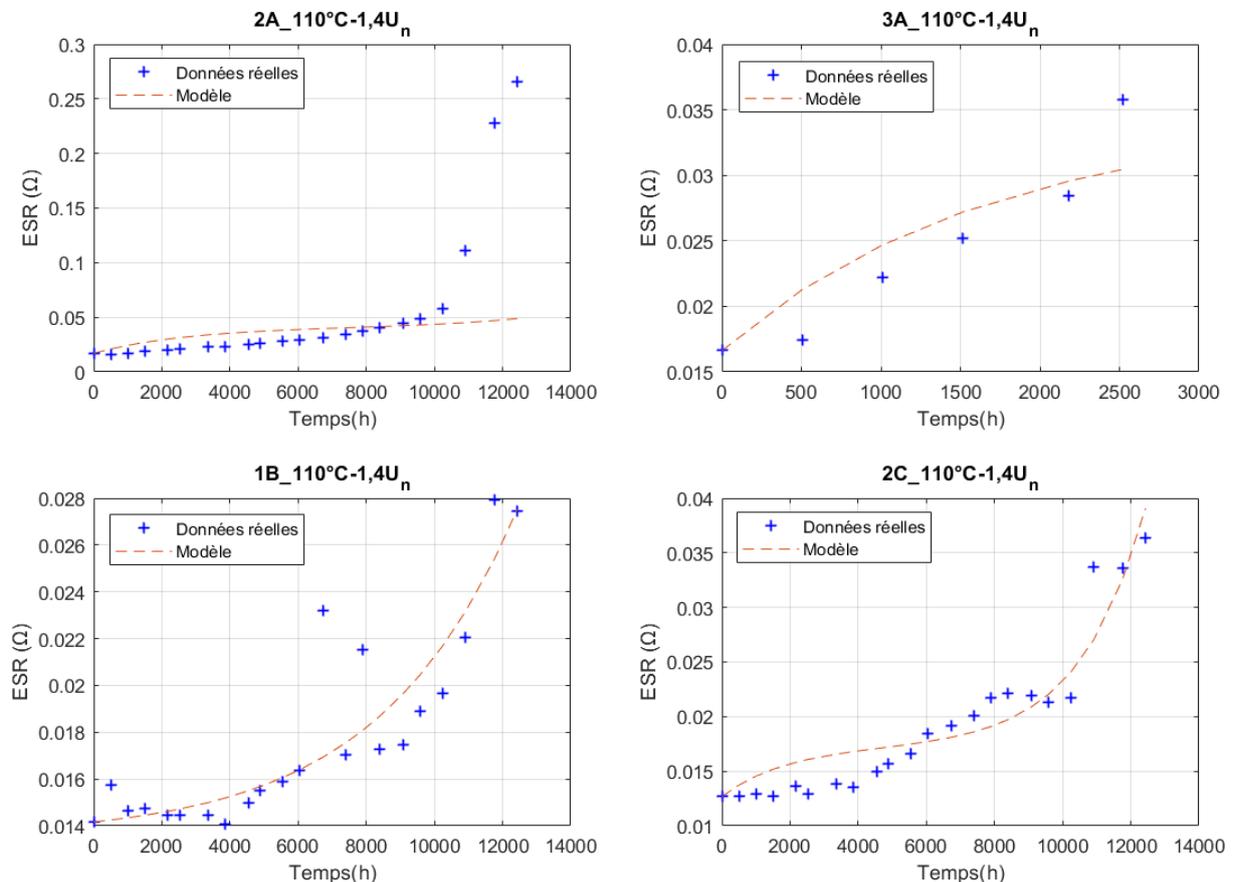


Figure 3-17 : Ajustement du modèle de l'ESR (10 kHz) sur des courbes de l'essai 1 : 110 °C/ 1,4 U_n

Au niveau de la description de l'ESR, le constat est plus mitigé. Si la forme de la dégradation semble cohérente pour les condensateurs 1B_110°C-1,4U_n et 2C_110°C-1,4U_n, cela ne semble pas être le cas pour les deux autres.

Pour le condensateur 2A_110°C-1,4U_n, une explication serait que la dégradation de l'ESR est déjà trop élevée pour être approximée par le modèle (cf. paragraphe 3.5.2). L'ESR a atteint une valeur supérieure à 0,2 Ω alors les autres condensateurs présentent des ESR

toujours inférieures à 0,04 Ω . L'hypothèse menant à l'équation (3-17) n'est donc plus pertinente.

L'absence de hausse brutale de l'ESR du condensateur 1B_110°C-1,4U_n entre 7000 et 8000 h de vieillissement, simultanément à sa chute brutale de capacité, est un résultat étonnant remettant en cause l'hypothèse d'une succession d'auto-cicatrisations inhabituelles. Au contraire, des mesures aberrantes sont observées dans ce laps de temps. La dégradation de l'ESR (R_s) devrait être irréversible, elle ne peut donc pas diminuer. Cependant, ce constat ne change pas notre conclusion précédente : des erreurs de mesure ne sauraient expliquer à elles-seules la chute soudaine de la capacité du condensateur 1B_110°C-1,4U_n.

Même si la modélisation de l'ESR mérite d'être améliorée, l'ajustement est malgré tout relativement bon compte-tenu du fait qu'il n'y a qu'un paramètre à déterminer.

3.6.2 Comparaison avec les modèles existants

Afin de valider définitivement le modèle de la dégradation de la capacité, il faut le comparer avec les fonctions de la littérature présentées dans les paragraphes 2.3.2 à 2.3.4.

La première fonction utilisée est décrite par l'équation (2-14) (cf. tableau 3-3) puisqu'elle est de la forme de l'évolution de la capacité des condensateurs du fabricant C. En raison de son utilisation d'une exponentielle croissante, elle sera nommée Exp^+ .

La seconde décrite par l'équation (2-33) a pour objectif de modéliser l'impact des auto-cicatrisations. Elle est pertinente car elle a été définie à partir de l'évolution des caractéristiques de condensateurs soumis à des contraintes en température et tension. Sa tendance étant une exponentielle décroissante, elle sera nommée Exp^- .

Les fonctions suivantes sont issues de notre modélisation présentée dans le paragraphe 3.5 en prenant des hypothèses différentes quant au comportement de $\lambda_a(t)$. L'équation (3-24) suppose $\lambda_a(t)$ constant par rapport au temps. Elle sera nommée I_{Exp} en référence à la loi de survie exponentielle. L'équation (3-25) suppose que $\lambda_a(t)$ suit une loi de Weibull. Elle sera nommée $I_{Weibull}$. Ainsi :

$$C(t) = C_0 e^{-\lambda_5 t} \quad (3-24)$$

$$C(t) = C_0 e^{-\left(\frac{t}{\beta_6}\right)^{m_6}} \quad (3-25)$$

avec C_0 , la capacité initiale et λ_5 , m_6 et β_6 des constantes.

Enfin, le modèle sera aussi comparé à des fonctions polynômiales du 2^{ème} et 3^{ème} degré. Leurs coefficients ne sont pas nécessairement positifs. Elles seront nommées respectivement $Poly_2$ et $Poly_3$. Ces fonctions sont testées en tant que fonctions de référence couramment utilisées dans des problèmes d'interpolation. La fonction $Poly_2$ permet d'effectuer une comparaison à nombre de paramètres égaux. La fonction $Poly_3$ a l'intérêt d'être de la forme des courbes expérimentales.

Ainsi, une identification des paramètres de chaque fonction a été faite pour chaque condensateur de chaque essai. La moyenne de la meilleure MSE de chaque identification est donnée pour chacune des équations dans le tableau 3-3. Plus la MSE est faible, plus la fonction identifiée est représentative des données. Graphiquement, l'ajustement des courbes est illustré sur la figure 3-18.

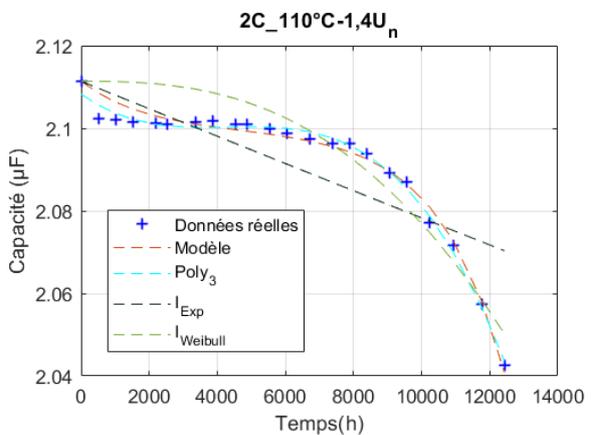
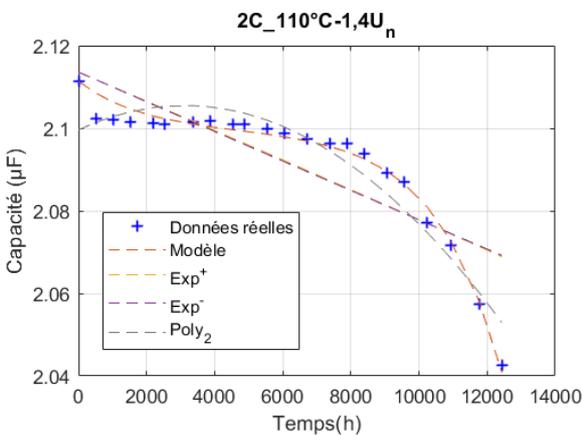
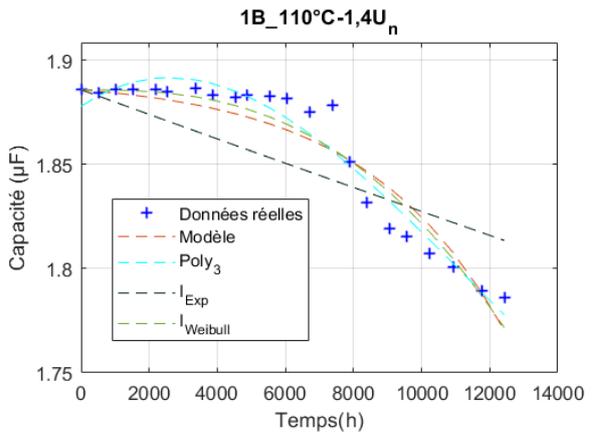
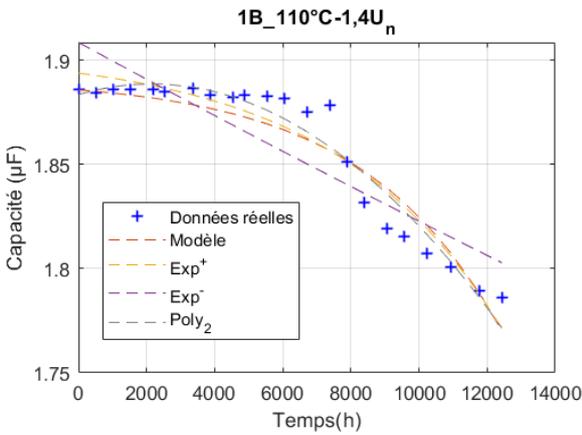
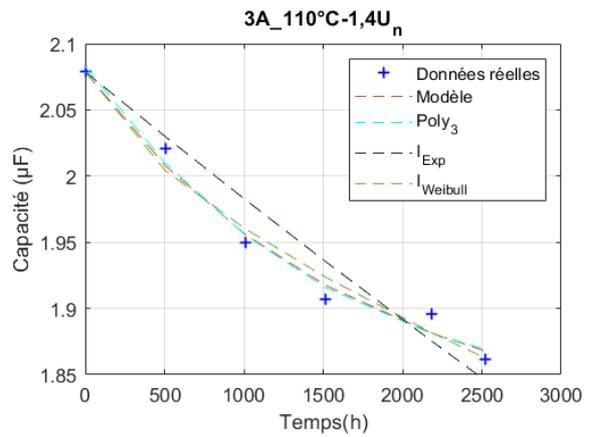
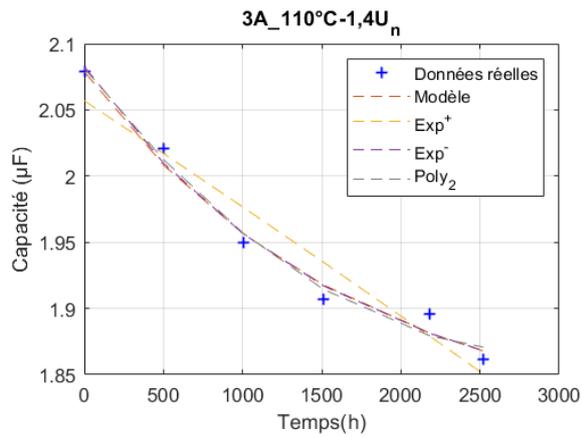
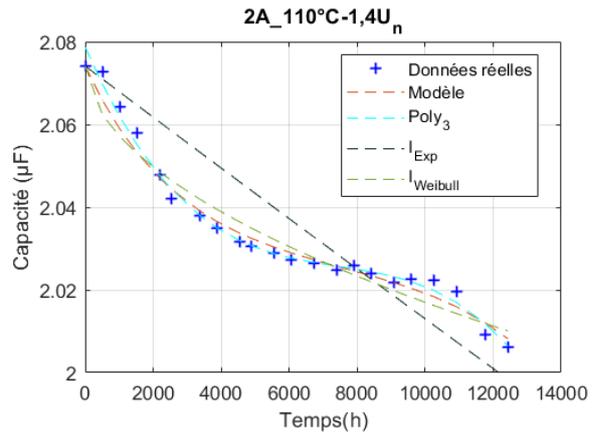
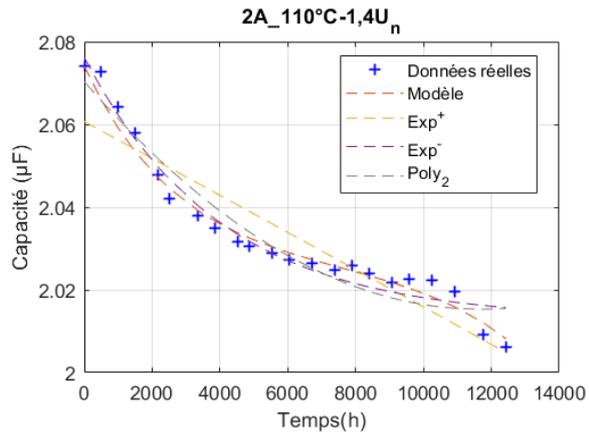


Figure 3-18 : Ajustement des fonctions présentées tableau 3-3 avec les données

Nom	Référence	Equations	Nombre de paramètres	MSE (nF)
Exp ⁺	(2-14)	$C(t) = A_1 - B_1 e^{-D_1 t}$	3	0,248
Exp ⁻	(2-33)	$C(t) = A_2 + B_2 e^{-D_2 t}$	3	0,661
Poly ₂		$C(t) = B_3 t^2 + E_3 t + F_3$	3	0,411
Poly ₃		$C(t) = A_4 t^3 + B_4 t^2 + E_4 t + F_4$	4	0,208
I _{Exp}	(3-24)	$C(t) = C_0 e^{-\lambda_5 t}$	1	0,757
I _{Weibull}	(3-25)	$C(t) = C_0 e^{-\left(\frac{t}{\beta_6}\right)^{m_6}}$	2	0,055
Modèle	(3-13)	$C(t) = C_0 e^{-\Lambda_\alpha(t)}$	3	0,043

Tableau 3-3 : Erreur quadratique moyenne tirée de l'ajustement des fonctions testées

Le modèle proposé (3-13) ainsi que I_{Weibull} (3-25) s'ajustent le mieux aux données. Leur MSE est la plus faible et du même ordre de grandeur. Ce résultat corrobore les observations faites dans le paragraphe 3.4.1. Notre approche est donc validée. Les fonctions de la littérature Exp⁺ et Exp⁻ sont moins pertinentes.

Malgré ces excellents résultats visibles sur la figure 3-18, la fonction Poly₃ possède une plus haute MSE seulement car elle est inadaptée pour modéliser les fortes chutes de capacité (cf. 2A_110°C-1,3U_n). Sans ce condensateur, la MSE moyenne de l'équation Poly₃ aurait été de 0,015 nF. Il reste qu'à nombre de paramètres à identifier moindre ou équivalent, la fonction I_{Weibull} et notre modèle surpassent toutes les autres propositions en réduisant l'erreur d'un facteur 10.

La similarité des résultats du modèle et I_{Weibull} était prévisible. I_{Weibull} est un cas particulier de notre modèle. Dans le cas où soit le paramètre α , soit le paramètre β du modèle sont égaux à 0, le taux de défaillance $\lambda_\alpha(t)$ suit une loi de Weibull (cf. équation (3-7)). Or, comme nous pouvons le constater de la figure 3-6 à la figure 3-8, les condensateurs ne présentent en moyenne qu'une ou deux des 3 phases de la courbe en baignoire. Une simple loi de Weibull suffit alors. Le modèle proposé n'est significativement meilleur que dans les cas où les 3 phases sont présentes comme pour le condensateur 3A_110°C-1,4U_n.

3.6.3 Extrapolation à visée prédictive

Afin d'évaluer la prédiction de la capacité donnée par le modèle, les paramètres du modèle ont été identifiés en prenant uniquement en compte le début de la dégradation de la capacité des condensateurs. Le modèle est ajusté sur les premiers 2 % de pertes. La dernière mesure prise en compte est indiquée par un marqueur en rouge sur la figure ci-dessous.

Les données, l'ajustement du modèle sur la totalité du vieillissement, l'ajustement du modèle en prenant uniquement en compte les premiers 2% de perte de la capacité et l'ajustement du modèle en prenant uniquement en compte les premiers 2% de perte de la capacité et en posant $\beta=0$ (cf. l'équation (3-14)) sont affichés sur la figure 3-19.

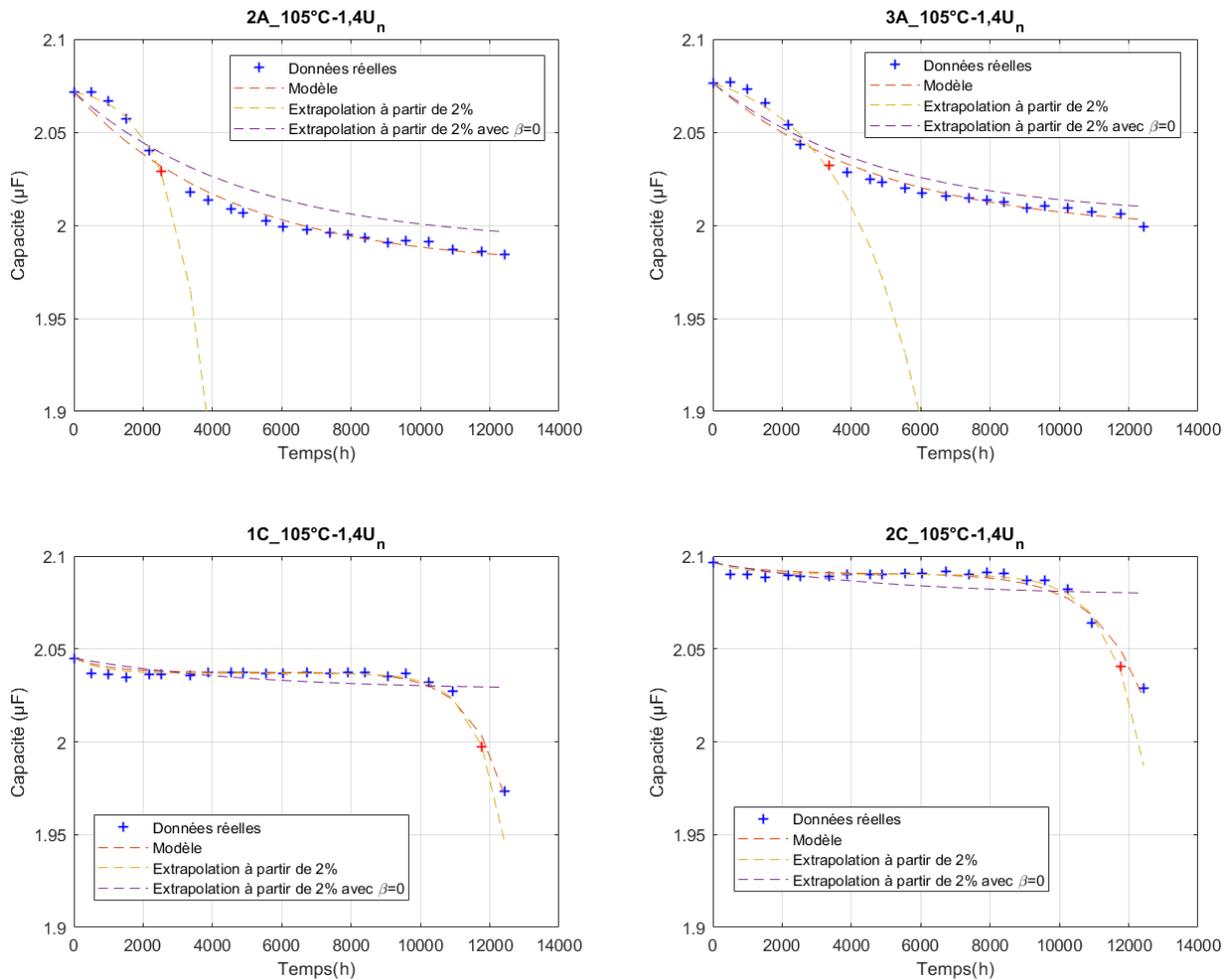


Figure 3-19 : Extrapolation du modèle à visée prédictive sur les condensateurs de l'essai 2 : 105°C/ 1,4 U_n

Cette fois-ci, ce sont des condensateurs de l'essai 2 : 105°C-1,4 U_n qui ont été sélectionnés pour leur représentativité.

L'ajustement sur les courbes des condensateurs du fabricant C ne s'effectue que sur un point en moins par rapport à l'intégralité des points de mesure. Avec $\beta \neq 0$, l'erreur sur la prédiction du dernier point est de 0,03 μF ($\sim 1,5\%$) pour le condensateur 1C_105°-1,4 U_n et 0,04 μF ($\sim 2\%$) pour le condensateur 2C_105°-1,4 U_n . L'imprécision est un peu élevée pour un horizon de 700 h en considérant une fin de vie à 5%. Cela est dû à l'utilisation de la fonction exponentielle pour modéliser la dynamique de la phase d'usure. Elle dérive rapidement si le nombre de points acquis dans cette phase est très faible. Il aurait fallu diminuer l'intervalle de temps entre les mesures dès l'entrée du condensateur dans la 3^{ème} phase du vieillissement.

En considérant $\beta \neq 0$, l'extrapolation à partir de 2% de perte de capacité n'est pas précise pour les condensateurs du fabricant A. Ce résultat n'est pas surprenant. En considérant uniquement les premiers 2% de dégradation, ces condensateurs ne sont pas rentrés dans leur phase d'usure (3^{ème} phase). Ainsi, le paramètre β , codant l'allure de la dégradation par usure, et le paramètre D, comportant l'information du moment de déclenchement de cette phase, ne peuvent pas être déterminés. L'algorithme

d'optimisation peut identifier n'importe quelle valeur pour β et s'ajuster à la dégradation jusqu'à 2 %.

En posant $\beta = 0$, cette 3^{ème} phase n'est pas prise en compte. L'extrapolation n'est pas faussée par une valeur incohérente de β . Ce cas revient à poser que le taux de défaillance des auto-cicatrisations suit une loi de Weibull. L'extrapolation de l'évolution de la capacité des condensateurs du fabricant A devient alors remarquablement précise. L'erreur de prédiction est de 0,01 μF ($\sim 0,5$ %) pour les condensateurs 2A_105°-1,4U_n et 3A_105°-1,4U_n. La précision est excellente compte-tenu de la portée de prédiction de 10 000 h. Ces résultats valident définitivement notre approche et utilisation des modèles pour effectuer des pronostics de la durée de vie utile restante.

Les condensateurs du fabricant C ayant atteint la phase d'usure du diélectrique, l'ajustement en considérant $\beta = 0$ n'est évidemment pas pertinente.

Ainsi, le modèle est validé, mais il convient de l'utiliser prudemment dans un but prédictif. L'incorporation du terme β est inutile tant que la 3^{ème} phase n'est pas atteinte. Mathématiquement, cette 3^{ème} phase est caractérisée par une augmentation constante de perte de la capacité sur des intervalles de temps fixes. Certains condensateurs, comme le condensateur 2A_105°-1,4U_n (cf. figure 3-19) atteignent quasiment le seuil de fin de vie de 5 % sans rentrer dans cette phase d'usure. Selon le seuil de fin de vie fixée par l'utilisateur des condensateurs, le terme β n'est donc pas toujours nécessaire pour prédire la RUL des condensateurs. Le modèle ne prédit pas l'arrivée des phases : il les constate et s'y adapte.

Ainsi, l'utilisation du modèle nécessite des mesures en temps réel suffisamment rapprochées pour détecter au plus tôt les changements de phase et de pouvoir identifier rapidement ses paramètres.

Conclusion

Trois tests de vieillissement accélérés avec des contraintes fixes en tension et température ont été menés sur 9 condensateurs provenant de 3 fabricants différents. Les contraintes ont varié successivement d'un test à l'autre. Périodiquement, des mesures de l'ESR et de la capacité à 10 kHz ont permis d'obtenir la tendance des courbes de vieillissement. Le palier de 5 % de dégradation a été atteint pour la capacité et 200 % pour l'ESR. Un emballement a été constaté. Les résultats expérimentaux ont montré une grande dispersion entre les condensateurs de chaque fabricant. Après une analyse post-mortem de quelques composants représentatifs, l'auto-cicatrisation a été identifiée comme le principal mécanisme de défaillance.

En se basant sur ces données, une modélisation de l'impact des auto-cicatrisations sur la capacité et l'ESR a été proposée. Le taux de défaillance des auto-cicatrisations a été considéré suivant une courbe en baignoire. Seule la perte de la surface des électrodes a été prise en compte pour expliquer la dégradation des indicateurs de santé. En supposant que la surface des électrodes peut être décomposée en unités identiques avec un même taux de défaillance, une loi de fiabilité peut ainsi s'appliquer pour évaluer la dégradation de la capacité dans le temps. Le modèle a été évalué aux regards d'autres fonctions de la littérature. Il a été validé.

Le nombre de condensateurs par fabricants par essais restant faible, une perspective du travail accompli reste de confronter le modèle à davantage de condensateurs. Sa pertinence pourrait aussi être évaluée sur d'autres types de condensateurs films.

Ensuite, des divergences restent présentes et nécessiteraient une amélioration du modèle. La première provient de la non-prise en compte de l'occurrence d'auto-cicatrisations intenses et soudaines ne suivant pas le schéma classique des défaillances par dérive. La deuxième demande l'inclusion de la possibilité d'une dégradation complète de l'ESR. Enfin, il pourrait être pertinent de rajouter un terme pour tenir compte de l'impact du vieillissement sur la permittivité du diélectrique.

Le modèle s'appuyant sur la détermination du taux de défaillance de chacune des phases de la courbe en baignoire, l'identification de ses paramètres restera incomplète tant que les 3 phases n'auront pas été atteintes. Ainsi, il convient de l'utiliser prudemment dans un but prédictif.

Également, il conviendrait d'évaluer l'adaptabilité du modèle sur des courbes de vieillissement de condensateurs ayant subi des contraintes en température et tension non constantes.

Chapitre 4 Essais de vieillissement accélérés en tension, température et humidité

4.1 Détermination des conditions des essais

4.1.1 Etat de l'art des essais menant à des emballlements

Les emballlements thermiques sont observés le plus souvent lors d'essais de claquage diélectrique [113]. Ce sont des essais qui utilisent de fortes impulsions de courant ou de tension. Le condensateur est soumis à des fortes énergies sur des courts laps de temps afin de provoquer des décharges au sein de son diélectrique.

Lors des essais de vieillissement usuellement présentés dans la littérature, la mention d'emballlement thermique reste rare. Ce phénomène apparaît néanmoins lors de vieillissements en température et en tension [100], [41]. Cependant, ces essais présentent soit une population totale de condensateurs vieillis trop petite et non représentative pour être statistiquement significative, soit des contraintes trop élevées au regard des contraintes subies en vieillissement standard.

Grâce à la collaboration avec Schneider Electric dans le cadre de la thèse, il a été possible d'obtenir un accès privilégié à leurs résultats d'essais de vieillissement. L'intérêt premier de ces essais était d'évaluer la robustesse de certains condensateurs sur des profils de mission spécifiques afin de pouvoir les utiliser dans leurs produits. Cependant, dans ce cadre, plusieurs emballlements ont été observés sur des condensateurs à films polypropylènes métallisés lors d'un essai en conditions de température, humidité et tension AC. Les contraintes étaient constantes et fixées à 85 °C pour la température, 85 % pour l'humidité relative et à la valeur nominale pour la tension AC à 50 Hz. La population vieillie était constituée de 45 condensateurs de capacité et tension nominale identiques conçus pour remplir la même fonction. Ils étaient constitués de 5 lots de 9 séries différentes issues elles-mêmes de fabricants différents. Au terme de 1650 h de vieillissement, la proportion d'emballlement était de 32 %.

4.1.2 Cahier des charges

4.1.2.1 Observations d'emballlements à la suite de contraintes usuelles

L'objectif premier des essais est d'étudier le processus menant à l'emballlement thermique, i.e. la fusion du diélectrique. Il faut donc, dans un premier temps, définir des conditions permettant de l'atteindre.

Les contraintes de vieillissement doivent être suffisantes pour entraîner une forte probabilité d'emballlement thermique dans un délai acceptable. Cependant, il faut également que ce dernier se produise à la suite des mécanismes de défaillance survenant lors du fonctionnement usuel. Les contraintes limites en température et tension ont été discutées le chapitre précédent (cf. paragraphe 3.1.2) [88] : la tension appliquée peut

dépasser la tension nominale maximale de 40 % ; la température appliquée ne peut pas dépasser la valeur maximale spécifiée en raison de son fort impact sur les propriétés diélectriques. Les fiches techniques ne mentionnent pas de taux d'humidité critique.

Les conditions de l'essai effectué par Schneider Electric correspondent à ces critères. Ces dernières sont donc répliquées ici en tant que conditions de référence.

Dans le but de minimiser toutes interférences avec le mécanisme d'emballlement, les condensateurs doivent rester dans les mêmes conditions climatiques, d'humidité et de température, pendant toute la durée du test, en particulier durant les caractérisations. Les interruptions de la consigne de tension doivent être réduites au strict minimum. En particulier, la mise hors tension d'un condensateur à la suite d'un emballlement ne doit pas interrompre le vieillissement des autres condensateurs. De fait, la connexion et la déconnexion des condensateurs au banc de test doit être individuelle.

Afin de s'assurer du caractère générique des possibles indicateurs d'emballlements, ceux-ci doivent être observés pour des condensateurs de référence équivalente provenant de fabricants différents. Il faut donc s'assurer d'obtenir au moins un emballlement pour chaque référence.

En reprenant les statistiques obtenues lors de l'essai effectué par Schneider Electric, il est possible de calculer l'intervalle de confiance de la probabilité d'un emballlement. Le résultat du test de vieillissement pour chaque condensateur peut être considéré comme une variable aléatoire suivant une loi de Bernoulli. C'est un succès si l'emballlement a eu lieu et un échec sinon. Supposant un emballlement comme étant le résultat du vieillissement propre à chaque condensateur, son avènement est indépendant des emballlements des condensateurs voisins. A ce titre, à partir d'un grand nombre de répétitions d'épreuves de Bernoulli (assimilées ici au nombre de condensateurs), la loi de probabilité de l'occurrence d'un emballlement converge vers la loi normale grâce au théorème central limite.

L'intervalle de confiance est approximé à 95 % par celui d'une loi normale centrée réduite selon la formule suivante [114] :

$$p \in \left[f - \frac{1,96 \sqrt{f(1-f)}}{\sqrt{N}}; f + \frac{1,96 \sqrt{f(1-f)}}{\sqrt{N}} \right] \quad (4-1)$$

avec p la proportion réelle des emballlements, f la fréquence des emballlements observés lors de l'essai et N le nombre de condensateurs en essai.

En appliquant ce résultat aux données de l'essai de Schneider Electric, on obtient un intervalle de confiance à 95 % de [0,18 ; 0,45]. Dans le pire des cas, la véritable probabilité d'occurrence d'un emballlement est de 18 %. Il faut donc prendre au minimum 6 condensateurs d'une même référence pour être témoin d'un emballlement en 1650 h.

Les contraintes d'espace dans l'enceinte climatique mise à disposition et d'acquisition de mesures limitent le nombre de condensateurs à une petite vingtaine. La décision a été prise de faire vieillir un total de 21 condensateurs : 7 pour chaque fabricant.

4.1.2.2 Récupération de données de vieillissement par dérive

Un essai de vieillissement menant à un emballlement restant un essai de vieillissement avant tout, les données récupérées contribuent à l'étude du vieillissement par dérive. Elles doivent pouvoir être comparées aux données de l'essai classique en température et

tension présentées au chapitre 3. A ce titre, les condensateurs testés sont les mêmes (cf. paragraphes 3.1.2 et 2.3.2). Leur température maximale d'utilisation est de 110 °C. Les conditions de tests permettront d'étudier la corrosion.

Afin d'avoir la possibilité de quantifier les facteurs d'accélération des contraintes appliquées, les conditions des différents essais varient autour des conditions de références choisies. Elles demeurent constantes tout au long du vieillissement et sont spécifiées dans le tableau ci-dessous :

Dénomination de l'essai	Température	Humidité relative	Tension RMS (AC 50 Hz)
Essai 4 : 85°C-85%-1U _n	85 °C	85 %	1 U _n
Essai 5 : 85°C-85%-1,1U _n	85 °C	85 %	1,1 U _n
Essai 6 : 85°C-75%-1U _n	85 °C	75 %	1 U _n
Essai 7 : 95°C-85%-1U _n	95 °C	85 %	1 U _n

Tableau 4-1 : Contraintes appliquées lors des essais en température, humidité et tension

4.1.2.3 Suivi des indicateurs de vieillissement

Afin d'obtenir un maximum d'indicateurs d'emballlement et de suivre le vieillissement par dérive, un grand nombre d'indicateurs de santé doit être récolté tout au long des essais. Les mesures doivent être non-intrusives pour ne pas impacter les mécanismes de vieillissement. Elles doivent s'effectuer si possible en temps réel.

Ainsi, la tension, le courant et la température sont continuellement acquis tout au long du vieillissement pour chaque condensateur.

Pour récupérer les valeurs de la résistance d'isolement, de la capacité et de l'ESR de chaque condensateur, des caractérisations périodiques à l'impédancemètre et au mégohmmètre sont effectuées. Pour les mêmes raisons qu'au chapitre précédent (cf. paragraphe 3.2.1), les valeurs de la capacité et de l'ESR seront récupérés à 10 kHz. Ces mesures nécessitent de déconnecter provisoirement les condensateurs de la tension de l'essai et de l'impédance liée au banc de test. De même, dans le but d'interrompre au minimum le vieillissement de chaque condensateur, seul le condensateur concerné par la mesure est déconnecté. Les autres restent sous tension pendant le temps des caractérisations.

4.1.2.4 Mise en sécurité

Après, la mise hors-tension des condensateurs, une phase de décharge est systématiquement mise en place.

L'objectif de l'étude est d'obtenir des signes précurseurs de l'emballlement. Une fois que l'emballlement est considéré comme établi, il n'y a aucune raison de maintenir

l'emballage en continuant de l'approvisionner en énergie. Le condensateur est donc mis hors tension. D'après la littérature, un comportement en court-circuit et une augmentation de la température peuvent être à prévoir. C'est pourquoi, des protections adaptées en courant et température sont mises en place.

4.2 Présentation du banc d'essai

Afin de garantir la stabilité du niveau de tension et de sa fréquence de 50 Hz, un onduleur triphasé est situé en amont du banc de test. Un redresseur le connecte au réseau EDF. L'onduleur a pour effet secondaire de réduire les harmoniques de tension aux bornes des condensateurs.

La consigne de tension est obtenue grâce aux tensions entre deux phases d'un auto-transformateur triphasé, en aval de l'onduleur. Les condensateurs sont montés en parallèle et alimentés par une des tensions composées. Ils ont été distribués uniformément sur chacune des 3 tensions composées selon leur fabricant.

Les condensateurs sont placés dans une enceinte climatique Vötsch VC 4018 pour atteindre les conditions environnementales de l'essai. Tous les composants nécessaires à l'alimentation et au contrôle des condensateurs sont placés dans une armoire électrique à côté de l'enceinte. Les capteurs de tension et de courant sont aussi placés à l'extérieur de l'enceinte, au plus près des composants, pour leur éviter un vieillissement accéléré et les imprécisions liées aux conditions environnementales de l'essai. Une vue générale du banc d'essai est présentée sur la figure ci-dessous :



Figure 4-1 : Photographie du banc d'essai

Les schémas électriques de puissance et de commande pour chaque condensateur sont présentés sur la figure 4-2.

Chaque condensateur peut être individuellement connecté et déconnecté de la tension d'alimentation par le biais d'un contacteur KM1. Pendant les phases de déconnexion, une résistance R1 assure la décharge des condensateurs.

Le contacteur KMmes permet de déconnecter le condensateur de l'impédance du banc de test afin d'effectuer des mesures de caractérisation.

La résistance R0 permet d'éviter les pics de courant induit par le condensateur lors de sa mise sous tension. Le contacteur KM0 se ferme et court-circuite R0 après une temporisation à chaque fermeture de KM1.

Un sélecteur 3 positions S1 permet le contrôle manuel de l'ouverture des contacteurs selon l'opération désirée : la mise sous tension, la décharge et la caractérisation. Par défaut, les condensateurs sont déchargés.

Un fusible F1 est installé en amont de chaque condensateur pour garantir la protection du banc contre des courts-circuits potentiels. La protection en température est assurée par un relai commandé Cd via un contact normalement fermé. Quand le seuil critique de température est dépassé, le contact Cd s'ouvre et coupe automatiquement l'alimentation de la bobine de KM1. De fait, le condensateur en défaut se déconnecte et se décharge.

En premier lieu, le seuil critique de température a été réglé au point de fusion du polypropylène. Il a été ajusté tout au long des essais au fur et à mesure des observations. Par la suite, la loi de commande de Cd a été modifiée pour y implémenter des seuils de sécurité sur d'autres indicateurs.

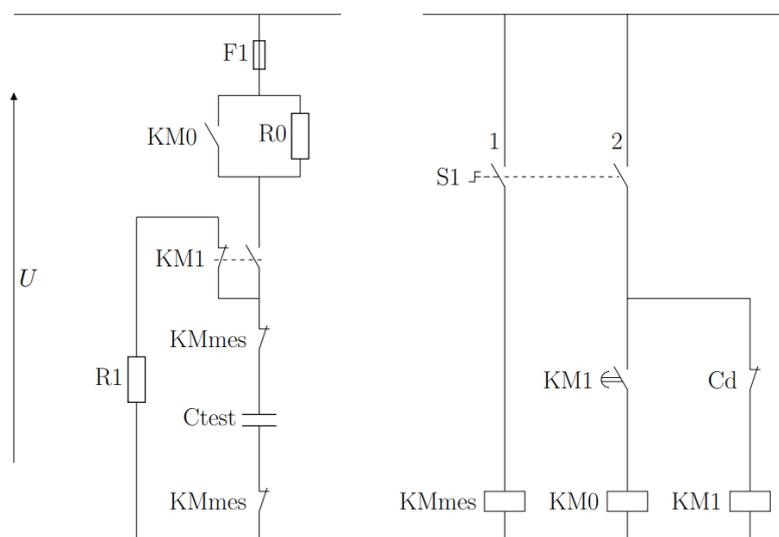


Figure 4-2 : Schéma électrique du banc d'essai pour un condensateur : circuits de puissance et de commande

4.3 Mesures des indicateurs de vieillissement

4.3.1 Mesures de la résistance d'isolement

La norme IEC-60384-1 définit la mesure de la résistance d'isolement par l'application pendant 60 s d'une tension de 100 V pour les condensateurs de tension nominale comprise entre 100 et 500 V. Ces conditions ont donc été reproduites pour avoir des points de comparaison avec les mesures des fabricants. L'appareil de mesure utilisé est le mégohmmètre M1500P.

Les résultats de mesures du courant de fuite sous une tension de 100 V DC d'un condensateur sain de chaque fabricant sont illustrés sur la figure 4-3. Ceux-ci sont réalisés d'une part pour une température de 25 °C et d'autre part pour une température de 85 °C et une humidité relative de 85 %. Pour cette dernière condition, les condensateurs sont

restés 3 heures dans une enceinte climatique avant la réalisation des mesures. Si la température a bien eu le temps de s'homogénéiser au sein des composants, il est probable que cela ne soit pas le cas pour l'humidité. Elle n'a certainement pas eu le temps de traverser les résines isolantes.

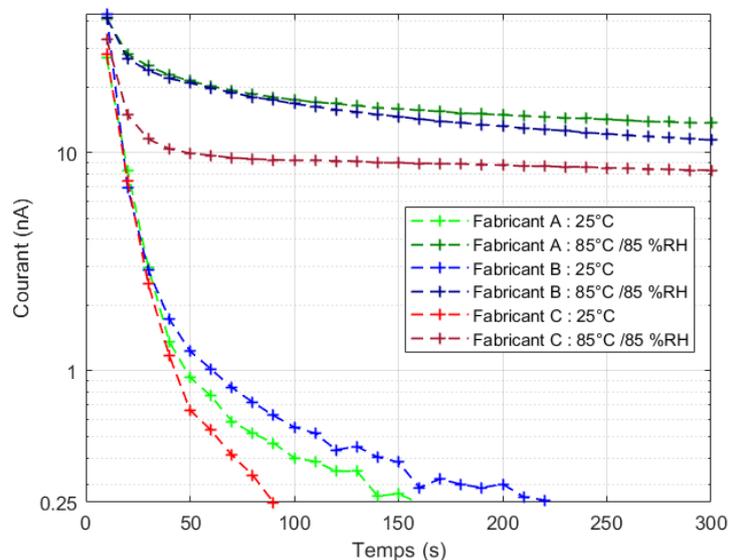


Figure 4-3 : Evolution du courant du diélectrique sous une tension de 100 V DC sous différentes conditions environnementales

A 60 s, le courant mesuré n'est pas stabilisé à 25 °C. Il subsiste un courant de polarisation provenant des charges piégées dans le diélectrique (cf. paragraphe 1.3.2) [10], [8].

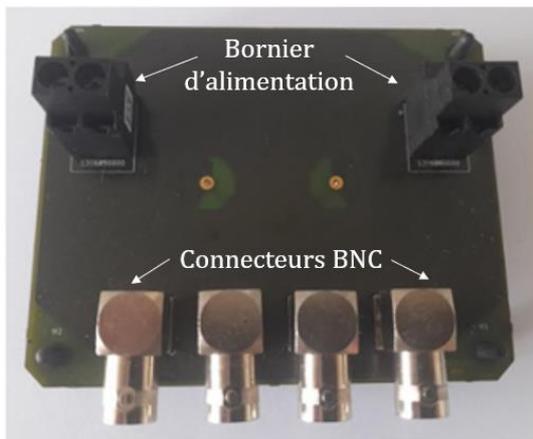
Ce n'est pas le cas à 85 °C. Avec l'accroissement de la température, la résistance du diélectrique R_{is} diminue. Ainsi, à 60 s, le courant de polarisation provenant des charges piégées devient négligeable devant le courant de fuite. Le courant traversant le condensateur peut alors être considéré comme étant exclusivement un courant de conduction. La résistance d'isolement du condensateur devient égale à la résistance du diélectrique même.

Pour ces ordres de grandeurs, la précision des mesures du mégohmmètre donnée par le fabricant est d'environ 1 % à 25 °C et à 85 °C [34].

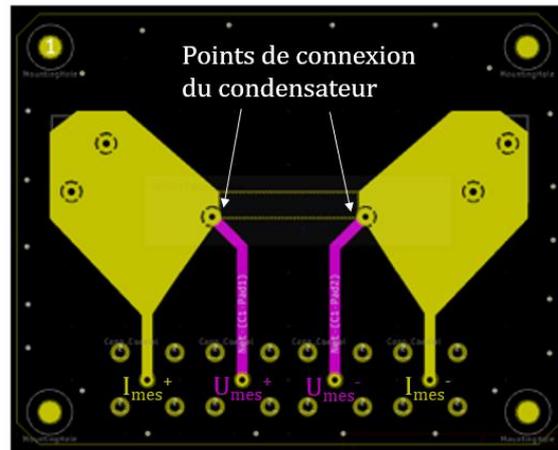
4.3.2 Adaptation du procédé de réalisation des caractérisations périodiques

Pour ne pas influencer le vieillissement, il a été choisi de laisser les condensateurs dans les conditions climatiques des essais lors des caractérisations. Les appareils de mesure se situent à l'extérieur. Un circuit imprimé a donc été conçu pour gérer l'interface avec les différentes connectiques. Il contient à la fois des borniers de connexion pour relier le condensateur à l'alimentation du banc de test et des borniers de connexion pour raccorder le condensateur aux appareils de mesure lors des caractérisations. Un circuit imprimé par condensateur a été placé dans l'enceinte. L'un d'entre eux est présenté sur la figure 4-4.

Des règles de conception ont été mises en place afin de limiter les bruits de mesure. Premièrement, le circuit imprimé est blindé. Le blindage est utile pour éliminer les perturbations provenant des ondes électromagnétiques rayonnées par l'environnement extérieur et pour proposer un chemin de retour pour d'éventuels courants de mode commun [34], [115]. A ce titre, le circuit imprimé présente quatre couches conductrices pour réserver les couches extérieures au blindage. Ces dernières sont reliées entre elles par des vias. Pour ne pas laisser d'ouverture dans le blindage, l'espace entre les vias est très inférieur à la plus petite longueur d'onde des signaux de mesure, i.e. la fréquence de mesure maximale. La connexion entre les circuits imprimés et les appareils de mesure se fait au moyen de câbles coaxiaux via le passage de câbles de l'enceinte. Les connecteurs sont de type BNC. Les conducteurs externes des câbles coaxiaux servent de masse. Ils sont reliés aux couches extérieures du circuit imprimé pour assurer la continuité du blindage. Au bout de la chaîne, c'est l'appareil de mesure qui assure la connexion du blindage à la terre. L'impédancemètre est équipé de connecteurs coaxiaux en entrée, ce qui permet de garantir la continuité du blindage. Cependant, ce n'est pas le cas du mégohmmètre qui utilise des connectiques de type fiche banane : si la masse des circuits imprimés reste reliée à la terre, les fils d'alimentation ne sont pas continuellement blindés.



a) Vue externe du circuit imprimé



b) Représentation sous Kicad des couches internes du circuit imprimé

Figure 4-4 : Circuit imprimé de mesure

Deuxièmement, il est essentiel de ne relier le dispositif à la terre qu'en un point pour éviter l'apparition de boucles de masse, c'est-à-dire des boucles de courant induites par une différence de potentiel entre deux liaisons à la terre. Elles induisent un champ magnétique pouvant perturber les mesures. De même, pour éviter des boucles de courant entre les masses des différents câbles, les masses des connecteurs BNC doivent être au même potentiel. Ainsi, sur le circuit imprimé, elles sont soudées sur le même plan conducteur, aux plus proches les unes des autres.

Troisièmement, afin de limiter les résistances parasites, les connecteurs et les condensateurs sont soudés au circuit imprimé.

Ensuite, pour effectuer une mesure 4-points, les circuits de mesure du courant et de la tension ont été séparés au sein du circuit imprimé. Ils se situent sur des plans conducteurs différents (cf. figure 4-4). La connexion entre les deux se fait au plus proche du condensateur, soit à ses bornes, par le biais de points de soudure. La tension est ainsi mesurée au plus près. La section du circuit où circule le courant a été élargie pour diminuer sa résistance intrinsèque.

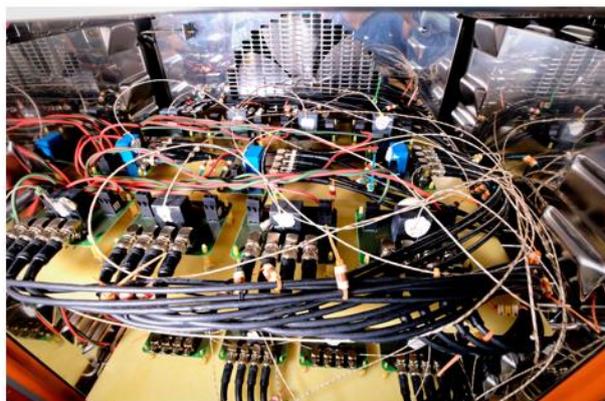
Le reste de la conception du circuit imprimé d'interface s'est fait en respectant les distances minimales entre les différents chemins conducteurs pour prévenir l'apparition de courts-circuits selon la norme IEC – 62368-1. Lors de l'application de la tension de consigne du test, tous les connecteurs BNC sont en circuit-ouvert. Le condensateur est alimenté par le biais des deux borniers à vis reliés aux couches internes du circuit imprimé.

Tous les points de soudure ont été protégés de la corrosion par l'application d'un vernis de tropicalisation.

En plus du nombre requis pour la mesure de chacun des condensateurs, deux circuits imprimés ont été rajoutés dans l'enceinte climatique pour permettre que la calibration en circuit ouvert et court-circuit de l'impédancemètre se fassent dans les conditions du test. Une barre de cuivre a été prise en tant que résistance de court-circuit. La différence avec la résistance de court-circuit par défaut de l'impédancemètre est de moins de $0,1 \text{ m}\Omega$ à 10 kHz . L'écart est négligeable par rapports aux valeurs initiales de la résistance R_s des condensateurs (cf. paragraphe 3.2.3).

Également, le bruit provenant des inductances mutuelles des câbles coaxiaux est compensé par l'impédancemètre [32].

Afin de faciliter la compréhension du lecteur, une photographie du banc de test mettant en évidence ses connectiques est présentée sur la figure ci-dessous :



a) Vue des condensateurs en essai dans l'enceinte



b) Vue des connectiques à l'extérieur de l'enceinte

Figure 4-5 : Photographie des connectiques mises en place

Pour les mesures à l'impédancemètre, la répétabilité a été calculée grâce à des mesures prises sur 9 condensateurs pour 4 jours différents. Avec l'utilisation de la carte d'interface, la variabilité des mesures par rapport à la valeur moyenne était respectivement de moins de 5% pour l'ESR et de 0,08 % pour la capacité à 10 kHz .

Avec l'augmentation de la température, la capacité diminue d'une dizaine de nF et R_s augmente de quelques $\text{m}\Omega$.

Pour les mesures de la résistance d'isolement, la répétabilité a été évaluée grâce à des mesures prises sur un seul condensateur. Hors-enceinte, sans le circuit imprimé, à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, sur 5 jours consécutifs, la variabilité des mesures était de 5 % autour d'une valeur moyenne de $69,7 \text{ G}\Omega$.

L'enceinte climatique est constituée en grande partie de matériaux isolants. En l'occurrence, le condensateur est entouré de champs électriques perturbateurs. Dans l'enceinte, sans les cartes, i.e. sans blindage, les valeurs mesurées doubleraient. Cette

différence correspondait à un offset de courant d'un peu moins de 1 nA, ce qui est du même ordre de grandeur que le courant de fuite à mesurer. Les cartes ont permis d'atténuer une partie du phénomène, pour se rapprocher du niveau des valeurs mesurées hors-enceinte.

Cependant, à 85 °C, 85 % RH, sur 3 jours consécutifs, les mesures ont varié de 16 % autour 5,58 GΩ. Le mois suivant, sur 5 jours consécutifs, les mesures de ce même condensateur ont varié de 8 % autour de 2,16 GΩ. La différence entre les moyennes de courant de fuite correspondait à un offset de courant de 40 nA.

Le courant de fuite étant plus élevé à 85 °C, une amélioration de la précision aurait dû se produire, puisqu'un même offset affecte moins sa valeur. Une hypothèse explicative de cette mauvaise répétitivité est l'augmentation des émissions rayonnées à la suite de la mise en marche de l'enceinte ou le taux élevé d'humidité.

L'influence de l'environnement est significative sur ces mesures. La répétabilité n'est pas assez bonne pour étudier une faible variation de la résistance d'isolement. Les valeurs recueillies sont donc traitées avec prudence. Elles restent néanmoins pertinentes pour donner des ordres de grandeur.

L'acquisition des mesures pour récupérer la résistance d'isolement, la capacité et la résistance de métallisation d'un condensateur situé dans l'enceinte est d'une durée moyenne de 20 min.

4.3.3 Mesures en temps réel

Pour suivre l'auto-échauffement des condensateurs, un thermocouple de type T a été placé sur le boîtier de chaque condensateur. Leur précision était de ± 1°C. Tout au long du test, la température a été enregistrée de manière continue, toutes les secondes.

La tension u et le courant i ont également été mesurés en continu pour chaque condensateur à une fréquence d'échantillonnage de 1 kHz, avec respectivement une précision inférieure à 2,5 % et 2 %. Leur valeur efficace U_{rms} et I_{rms} a été déterminée à partir de leur valeur quadratique moyenne calculée sur une période d'une seconde.

Un filtre analogique passe bas avec une fréquence de coupure de 500 Hz ainsi qu'un filtre numérique passe haut avec une fréquence de coupure de 5 Hz sont implémentés sur les signaux de courant et tension afin de ne conserver que les fréquences de l'ordre de 50 Hz. Il est important de noter que le courant DC n'a pas été enregistré.

La pulsation ω est constante, grâce à la fréquence fixe de 50 Hz des signaux d'entrées. En conséquence, la capacité C peut être approximée en temps réel par l'équation ci-dessous. L'ESR est dans ce cas négligée.

$$C = \frac{I_{rms}}{U_{rms} \omega} \quad (4-2)$$

La puissance active P , en tant que moyenne de la puissance instantanée, est calculée selon l'équation ci-dessous :

$$P = \frac{1}{nT} \sum_{k=Te}^{nT} i(t_k) u(t_k) \quad (4-3)$$

T est la période du signal de courant i et du signal de tension u mesurés. L'onduleur garanti une fréquence de 50 Hz constante. T_e est la période d'échantillonnage (ici $T_e = 0,001$ s). n est le nombre de périodes considérées. La puissance active ayant été mesurée et enregistrée durant des périodes d'une seconde, n est égal à 50.

Enfin, grâce aux mesures précédentes, le déphasage φ du courant par rapport à la tension de chaque condensateur a été calculé et enregistré chaque seconde selon l'équation ci-dessous :

$$\varphi = - \arccos \left(\frac{P}{U_{\text{rms}} I_{\text{rms}}} \right) \quad (4-4)$$

4.4 Résultats expérimentaux relatifs aux défaillances catalectiques

4.4.1 Inspections visuelles

Au terme de l'essai 4 : 85°C-85%-1U_n, 9 condensateurs sur 21 ont présenté des signes visuels d'emballlements thermiques.

Un condensateur du fabricant A a terminé cet essai avec son boîtier gonflé mais non fendu.

Trois des condensateurs du fabricant B ont présenté des fissures sur leur boîtier. Pour deux d'entre eux, du diélectrique fondu s'en échappait. Cet état est illustré par la photographie de la figure 4-6.

Cinq des condensateurs du fabricant C ont aussi fini avec un boîtier rompu par une poussée de diélectrique fondu.

Après avoir ouvert les boîtiers gonflés ou fissurés des deux condensateurs (7A_85°C-85%-1U_n, 2B_85°C-85%-1U_n) dont la fonte du diélectrique n'était pas visible extérieurement, il s'est avéré que le diélectrique avait bien fondu à l'intérieur.

Les autres condensateurs de l'essai 85°C-85%-1U_n sont restés visuellement inchangés après le vieillissement. Quatre d'entre eux, dont au moins un de chaque fabricant, ont été ouverts et débobinés pour constater l'état des films. Aucun n'a présenté des signes de fonte de diélectrique.

Au total, 9 emballlements ont donc été constaté pour l'essai 85°C-85%-1U_n.

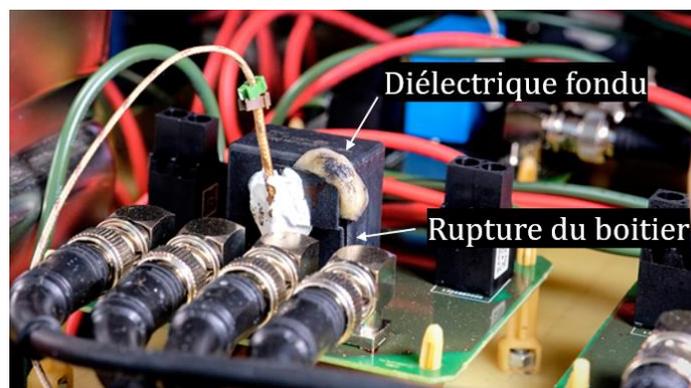


Figure 4-6 : Photo d'un condensateur ayant subi un emballement thermique

Les emballlements des condensateurs pour les autres essais se sont aussi manifestés avec des boîtiers gonflés, voire fissurés et laissant échapper du diélectrique fondu. Le tableau récapitulatif ci-dessous décompte le nombre d'emballlements pour les différents essais.

	Temps de vieillissement effectif	Emballlements avec signes extérieurs
Essai 4 : 85°C-85%-1U _n	2000 h	A 700 h : 3/21 Total : 9/21
Essai 5 : 85°C-85%-1,1U _n	900 h	A 700 h : 2/21 Total : 4/21
Essai 6 : 85°C-75%-1U _n	1500 h	A 700 h : 1/21 Total : 1/21
Essai 7 : 95°C-85%-1U _n	700 h	Total : 8/21

Tableau 4-2 : Nombres d'emballlements par essai

Initialement fixé à 2000 h, le temps de vieillissement effectif a dû être réduit pour la plupart des essais. Les causes sont multiples et vont de la panne de l'enceinte climatique à la panne totale de la quasi-majorité des composants.

Entre autres, à la suite d'un souci technique, la contrainte d'humidité sur les condensateurs de l'essai 85°C-85%-1,1U_n a été supprimée au bout de 900 h de vieillissement. Les quatre emballlements avaient alors déjà eu lieu. Le vieillissement a cependant été maintenu 3 mois de plus en gardant les contraintes de température et de tension. Les condensateurs n'ont pas été retirés de l'enceinte. Bien qu'ils aient continué à vieillir, aucun emballlement n'a eu lieu pendant ces trois mois. Ajouté au nombre d'emballlements constaté lors de l'essai 85°C-75%-1U_n et aux données de la littérature, ce résultat confirme que la présence d'humidité augmente très fortement les probabilités d'un emballlement thermique. Il apparaît qu'elle joue un rôle majeur dans l'apparition du processus.

Sans surprise, l'augmentation de la température augmente, elle aussi, les probabilités d'emballlement.

Le procédé de fabrication a lui aussi son importance. Les condensateurs du fabricant A n'ont quasiment pas connu d'emballlement. En revanche, leur capacité a été assez rapidement fortement réduite (cf. paragraphe 4.8.2). Les condensateurs du fabricant C ont un taux d'emballlement relativement élevé. Une explication à ce phénomène sera proposée à la suite de l'analyse post-mortem.

4.4.2 Motif caractéristique d'un emballlement thermique

Avant tout, il convient de rappeler que la valeur efficace de la tension est demeurée constante tout au long du vieillissement. Fixée par un onduleur, aucune perturbation provenant du réseau n'a pu l'affecter. Les variations des indicateurs de l'état de santé des condensateurs ne peuvent donc en aucun cas leur être attribuées.

Les condensateurs n'ayant pas manifesté de signes extérieurs d'emballlement se sont dégradés progressivement. Aucune variation brusque et durable dans le temps n'a été enregistrée sur leur courant, leur déphasage, leur puissance active et leur température. Ils n'ont donc pas subi de défaillances cataclysmiques.

Au contraire, tous les condensateurs, où la fonte du diélectrique a été constatée, ont subi une variation soudaine de leurs caractéristiques qui les a menés à leur panne totale. En outre, un motif caractéristique transparait. Sa durée est en moyenne de quelques minutes. Il est illustré sur la figure 4-7 ci-dessous.

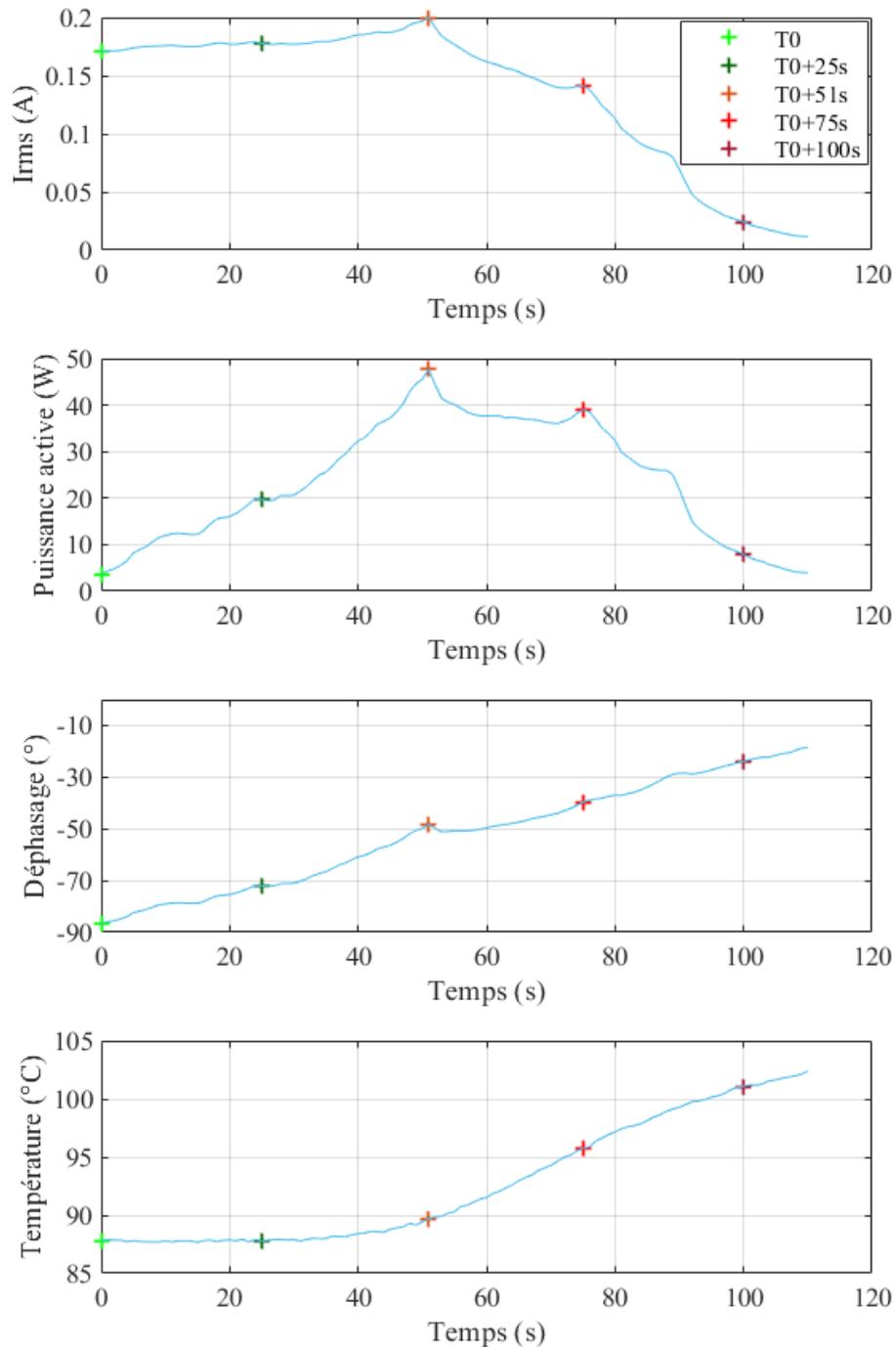


Figure 4-7 : Evolution des indicateurs de santé du condensateur 3C_85°C-85%-1,1Un pendant un emballement thermique

La panne totale des condensateurs est traduite par la chute du courant. A la fin du processus, ils sont en circuit ouvert. Entre-temps, le diélectrique a fondu.

Au début du processus, la puissance active et le déphasage φ du condensateur augmentent simultanément. Il est rappelé que le déphasage φ est défini ici comme le

déphasage du courant par rapport à la tension. Il s'exprime donc par un angle négatif qui augmente au fur et à mesure que l'écart absolu entre les phases du courant et de la tension diminue. Dans la plupart des cas, le courant augmente aussi. La variation du courant est faible par rapport à sa valeur initiale au contraire de celle du déphasage et de la puissance active. L'augmentation de la température, qui s'ensuit, est détectée après un certain délai, non négligeable face à la durée totale de l'emballement.

Ensuite, la puissance active et le courant passent simultanément par un maximum avant de diminuer progressivement jusqu'à 0 en passant par de petits pics locaux. Quant à la phase de l'impédance φ , elle augmente vers 0° durant tout le processus. Simultanément avec le courant et la puissance active, elle subit de petits pics de variation.

Bien que conséquente, l'augmentation du courant n'est pas suffisante pour considérer que le condensateur ait subi un court-circuit comme cela aurait pu être initialement supposé. Les valeurs atteintes du déphasage et la puissance active sont quant-à-elles très inhabituelles pour un condensateur fonctionnel. Pour rappel, même en considérant ses pertes usuelles, la puissance active d'un condensateur est très faible (proche de 0 W) et sa phase se situe aux alentours de -90° . Le pic de puissance de 48 W observé sur la figure 4-7 est remarquable. Afin de le mettre en perspective, la puissance apparente du condensateur sous test était de 83 VA. Les valeurs atteintes de puissance active sont le signe d'un fort échauffement au sein du condensateur pouvant expliquer la fusion du diélectrique. Les valeurs du déphasage, passant sur la figure 4-7, de -90° à -20° , vont elles-aussi dans ce sens, suggérant que le condensateur devient résistif.

Il convient de noter que le déphasage ne se rétablit pas à sa valeur initiale après la chute de la puissance active. Le changement induit par l'échauffement du condensateur modifie son état et est irréversible.

L'évolution du signal de courant i par rapport au signal de tension u aux différents instants d'emballement indiqués sur la figure 4-7 est présenté sur la figure 4-8. Le courant aux différents instants y est affiché pour une même période de tension.

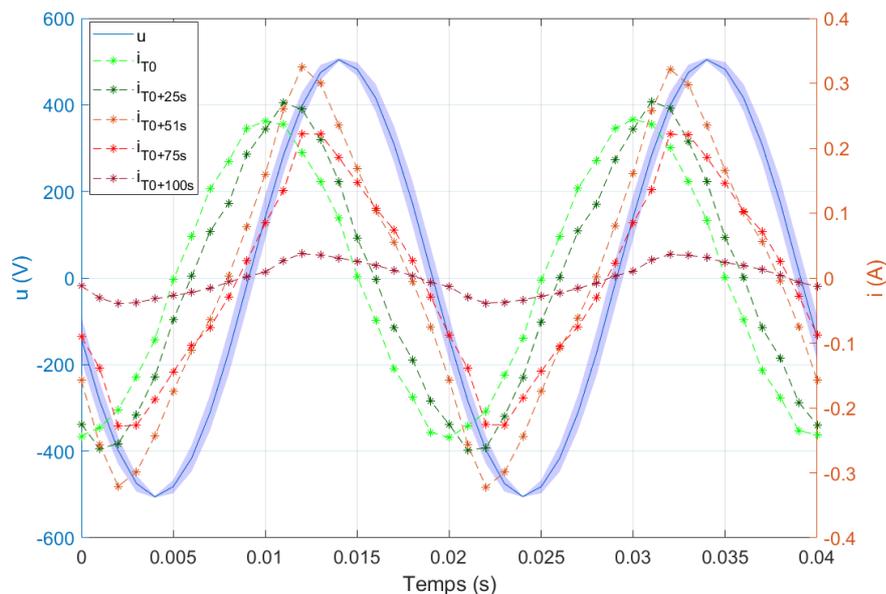


Figure 4-8 : Evolution du signal de courant pendant l'emballement thermique du condensateur 3C_85°C-85%-1,1U_n

La diminution de l'écart entre les phases des signaux est indéniable. La forme du signal de courant semble peu affectée par le processus d'emballement. De T_0 à $T_0 + 51s$, I_{rms} a

augmenté de 18 % (de 0,17 à 0,20 A) pour une augmentation de la puissance active de 1300 % (de 3,7 à 48 W). Ces ordres de grandeurs confirment que l'élévation de la puissance active est directement une conséquence du déphasage.

4.4.3 Disparités entre emballements thermiques

Les emballements ont eu lieu pour des condensateurs dont la capacité n'a pas excédé la valeur usuelle inférieure de fin de vie. Au minimum, la capacité s'est réduite de 2 % par rapport à sa valeur initiale. En revanche, une variation de plus de 200 % sur l'ESR est observée à chaque fois sur ces essais.

La différence entre les emballements thermiques se situe au niveau des valeurs maximales atteintes par la puissance active et le nombre de fois où le motif présenté sur la figure 4-7 se produit.

Généralement une seule occurrence suffit pour entraîner la mort du condensateur en circuit ouvert. Cependant, un faible courant peut subsister et entraîner d'autres occurrences du motif. La phase de l'impédance φ s'étant déjà dégradée lors du premier pic de puissance active, elle ne revient pas à son état initial lors des autres occurrences. Elle reste au contraire à la valeur maximale atteinte. En conséquence, le condensateur continue de consommer de la puissance active. Il s'auto-échauffe jusqu'au déclenchement d'un autre motif (un pic de puissance active), qui détruit ce qu'il reste du composant. Le délai entre les pics dépend de la valeur du courant subsistant dans le condensateur.

Ce phénomène a été observé sur deux condensateurs de l'essai 85°C-85%-1U_n. La période la plus longue observée entre deux motifs est de 6 heures. Sur le chronogramme affiché sur la figure 4-9, elle est d'environ 20 minutes. Au cours du second pic de puissance active, des émissions de gaz ont été constatées.

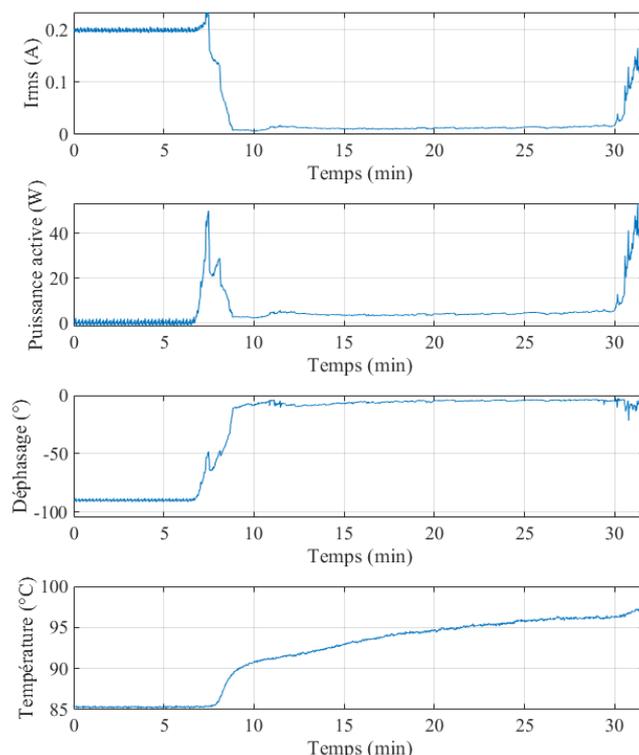


Figure 4-9 : Emballement survenu après 588 heures de vieillissement comportant plusieurs pics de puissance active

Sur l'ensemble des essais 4 à 6 (85°C-85%-1U_n, 85°C-85%-1,1U_n et 85°C-75%-1U_n) le courant efficace enregistré pendant un pic est au maximum de 0,8 A. En comparaison, il est d'environ 0,23 A pour un condensateur sain. Aucun court-circuit n'a été observé.

Dans le pire des cas, sur ces mêmes essais, le pic de puissance active a atteint 250 W. Au minimum, 12 W suffisent pour constater une fonte du diélectrique. Les valeurs maximales de la puissance active ont été atteintes pour des valeurs du déphasage de - 67 ° à -19 °. Plus la valeur du déphasage est élevée, plus le pic de puissance active atteint est haut. Un faible courant initial dû au vieillissement du condensateur atténue la valeur du pic.

Il est également observé que plus la valeur maximale atteinte de puissance active est basse, plus les dommages sur le condensateur sont limités. Au cours de l'essai 85°C-85%-1U_n, les deux condensateurs qui ont présentés le moins de dommages visibles de l'extérieur sont ceux qui ont subi les plus petits pics de puissance active, respectivement 12 et 30 W. Cette observation suggère que la restriction de la puissance active limite la fonte du diélectrique au sein du condensateur.

Les emballements survenus lors de l'essai 7 : 95°C-85%-1U_n diffèrent sensiblement des trois autres. En effet, la majorité de ceux-ci se sont déclenchés lors d'une remise sous tension après une mise-hors tension prolongée suivant une phase de vieillissement conséquente (au moins 450 h). A la suite d'un dépassement d'un seuil d'un indicateur de santé, les condensateurs ont été programmés pour se déconnecter automatiquement du banc de test. Il s'en est suivi un arrêt de la consigne de tension sur une durée de deux à quatre jours pendant laquelle les condensateurs sont restés dans les conditions climatiques de l'essai.

Les pics de puissance active observés lors de ces emballements sont bien supérieurs à ceux des précédents essais et ont lieu sur de plus courtes durées. Un exemple est illustré sur la figure ci-dessous :

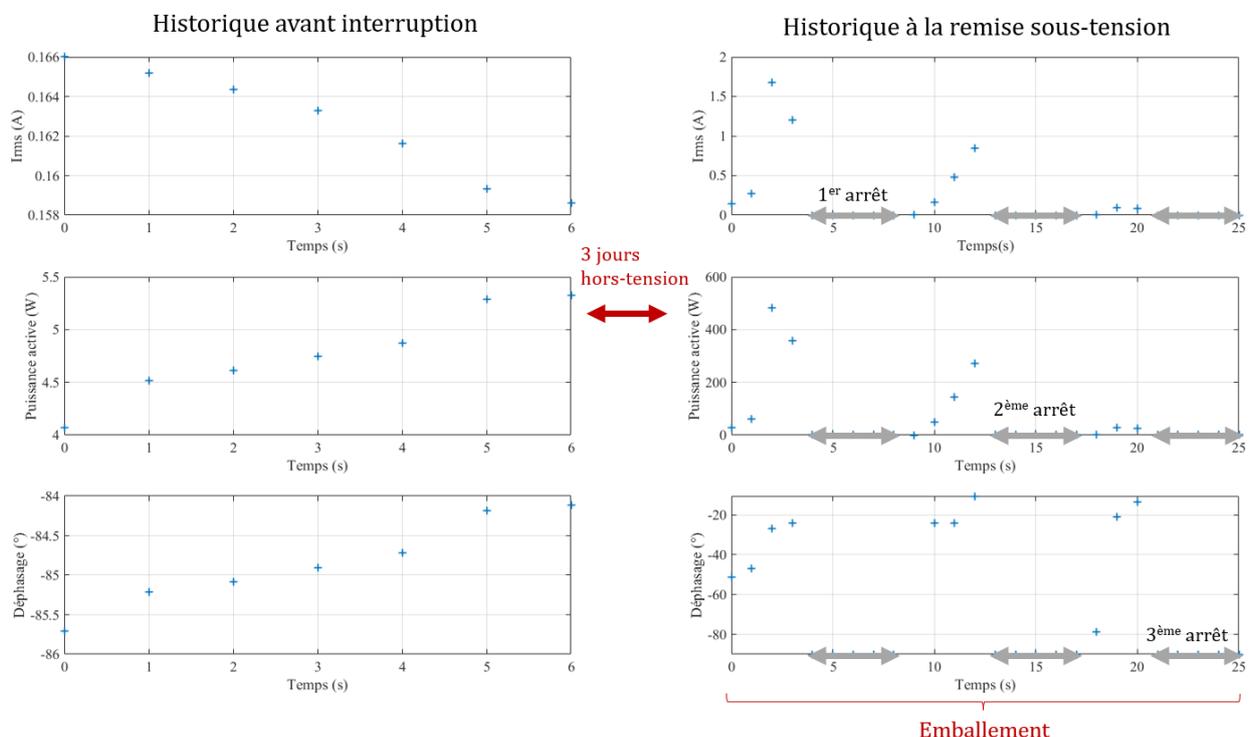


Figure 4-10 : Emballement à la suite de mise hors-tension successives dans le cas de l'essai 7 : 95°C-85%-1U_n

4.4.4 Indicateurs d'emballlement

Les emballlements thermiques semblent caractérisés par une augmentation de la puissance active, du déphasage, du courant et de la température des condensateurs. Ces résultats sont cohérents avec l'état de l'art. Il reste à déterminer si parmi ces indicateurs, certains permettent de détecter précocement et avec certitude les emballlements afin de les prévenir.

4.4.4.1 Limites de la mesure de la température

Sur les chronogrammes de la figure 4-7 et de la figure 4-9, l'élévation de la température ne coïncide pas avec la montée de la puissance active. Elle survient après un retard. De plus, les valeurs de température mesurées restent bien inférieures au point de fusion du polypropylène ($> 150\text{ °C}$). Ces comportements se retrouvent sur la quasi-totalité des emballlements. Sur l'ensemble des essais, la température maximale mesurée a été de 110 °C .

Chez certains condensateurs, l'emballlement a été constaté sans que la variation de la température n'ait dépassé les 5 °C . Or, un condensateur a subi une élévation de température de plus de 5 °C , sans pour autant qu'une élévation critique de la puissance active ou une chute de courant ne soit observée. Après le débobinage de ses films métallisés, aucune trace de fonte n'a été trouvée, établissant l'absence factuelle d'emballlement. Les chronogrammes lors de cet événement sont présentés sur la figure ci-dessous :

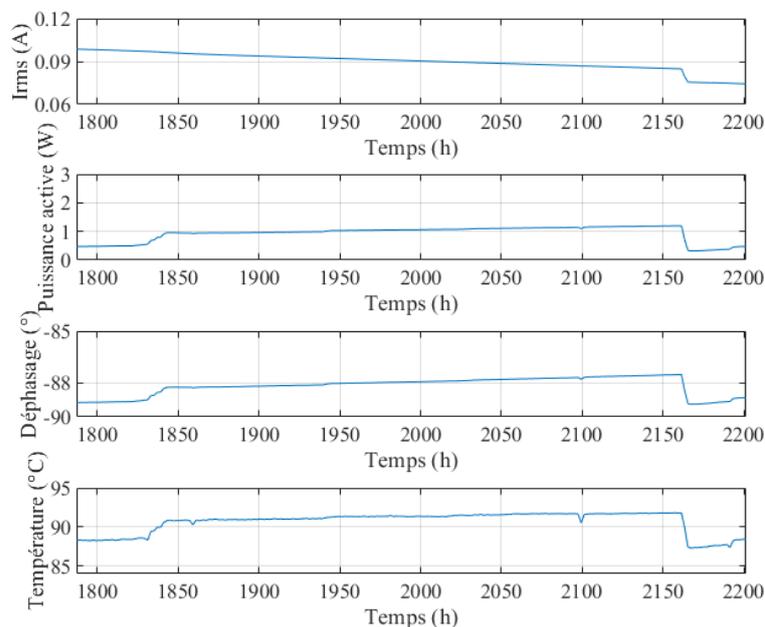


Figure 4-11 : Chronogrammes lors d'une élévation de température sans l'occurrence d'un emballlement

Ainsi, ici, la température mesurée n'est pas un indicateur pertinent d'emballlement. Il existe des indicateurs plus précurseurs. L'amplitude des variations de la température mesurée permet des faux négatifs et des faux positifs.

Cependant, par définition, la fonte du diélectrique implique que des températures extrêmement élevées ont été atteintes au sein du condensateur. Ces dernières n'ont pas été observées par nos mesures pour plusieurs raisons.

Premièrement, la température mesurée est celle de la surface des boîtiers des condensateurs. Ce n'est pas leur température interne. Il aurait fallu considérer la résistance thermique et la capacité thermique des condensateurs. Ces dernières ne sont cependant pas facilement accessibles. La fonte du diélectrique est locale, ce qui rend la distribution de la température au sein du condensateur inhomogène. Les caractéristiques thermiques du condensateur (capacité et résistance) dépendent donc de la distance entre le capteur de température et le point de fusion. Cette distance est inconnue. De plus, les caractéristiques thermiques peuvent être affectée par le vieillissement.

Ensuite, l'enceinte climatique dans laquelle sont placés les condensateurs s'auto-régule à la température de consigne, même en cas de surchauffe. En conséquence, la convection induite tend à garder la température de l'enceinte et donc celle proche des condensateurs à 85 °C ou 95 °C suivant les essais. Elle affecte la mesure de température du thermocouple.

Ainsi, il aurait fallu, connaître les caractéristiques thermiques du condensateur et la résistance de convection causée par l'enceinte pour pouvoir remonter à la température au cœur du condensateur.

Ainsi, bien qu'un échauffement soit visible en cas d'emballement, à cause de l'accumulation des résistances et des capacités thermiques à prendre en compte, l'erreur systématique et le délai de la mesure de température du boîtier du condensateur compromettent sa pertinence en tant d'indicateur fiable.

La température pourrait potentiellement être un indicateur intéressant à condition qu'elle soit évaluée directement au cœur du condensateur. Cependant se pose alors la problématique d'une mesure non-intrusive et facilement implémentable.

4.4.4.2 Limites de la mesure du courant

Le diélectrique d'un condensateur peut fondre sans qu'il y ait eu une augmentation de son courant. Le phénomène est illustré grâce aux chronogrammes de la figure 4-12.

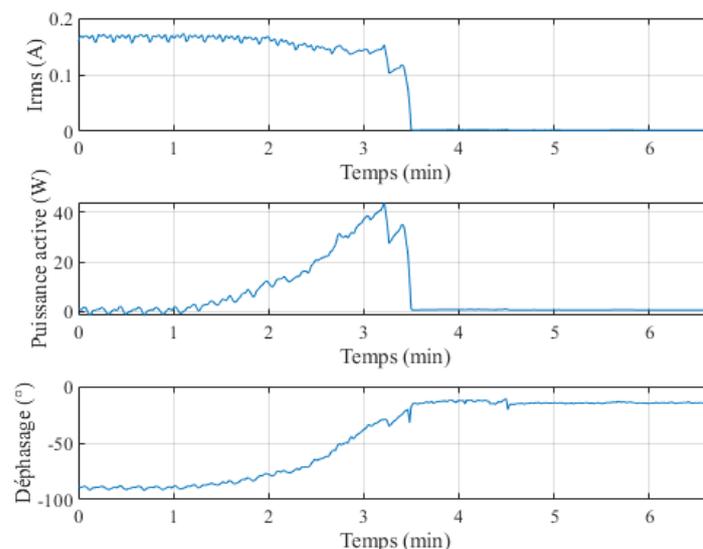


Figure 4-12 : Chronogrammes lors d'un emballement sans pic de courant

Ainsi, bien qu'il soit généralement présent, le pic de courant efficace n'est pas systématique lors d'un emballement.

Quand il a lieu, l'augmentation du courant reste faible. Nous pouvons constater sur la figure 4-7 que le courant efficace a augmenté de moins de 0,01 A quand la puissance active est déjà à 20 W. Une telle valeur de puissance est suffisante pour occasionner une fonte du diélectrique consécutive. L'ordre de grandeur de la variation du courant est plutôt proche de celui des variations de mesures. Elle peut être masquée par les instabilités de $\pm 10\%$ de la tension du réseau électrique BT d'EDF.

Détecter un emballement sur la seule base de la détection de pics de courant n'est donc pas une solution. Il y a à la fois un risque de faux positifs et de faux négatifs en y ajoutant une forte contrainte sur la précision des mesures.

Enfin, si la chute de courant brutale est un indicateur de défaillance catalectique, il ne renseigne pas sur le mécanisme de défaillance catalectique. En outre, cet indicateur souffre du même problème que l'élévation de la température : quand la défaillance est détectée, elle l'est après un délai qui peut laisser l'emballement arriver à son terme.

Le courant efficace AC n'est donc pas un indicateur d'emballement satisfaisant.

4.4.4.3 Validation des mesures de déphasage et de puissance active

L'augmentation de la phase et de la puissance active sont les indicateurs communs à tous les emballlements. Ce sont également les indicateurs dont la variation est la plus élevée et permettant la détection la plus précoce (cf. figure 4-7).

Cependant, il est nécessaire de valider qu'une augmentation consécutive de ces indicateurs est bien le signe d'un emballement pour les retenir définitivement.

La fonte du diélectrique est un des marqueurs d'un emballement thermique. Si limiter la croissance de ces deux indicateurs permet de réduire la quantité de diélectrique fondu, cela justifiera qu'un emballement thermique peut être caractérisé électriquement par une augmentation du déphasage vers 0° et un pic de puissance active. Il conviendra aussi de vérifier si le processus s'interrompt si les seuils sont franchis en sens inverse.

A cette fin, pendant l'essai $85^\circ\text{C}-85\%-1,1U_n$, des seuils de sécurité sur la puissance active et la phase ont été ajoutés à ceux sur la température. Ainsi, le condensateur $7C_{85^\circ\text{C}-85\%-1,1U_n}$ a été interrompu lorsque sa puissance active a atteint 30 W. Au contraire, l'emballement du condensateur $3C_{85^\circ\text{C}-85\%-1,1U_n}$ s'est déroulé jusqu'à ce que le seuil de -20° sur le déphasage soit dépassé. Il a pu atteindre 48 W (cf. figure 4-7). L'état des deux condensateurs après leur emballement est montré sur la figure ci-dessous :

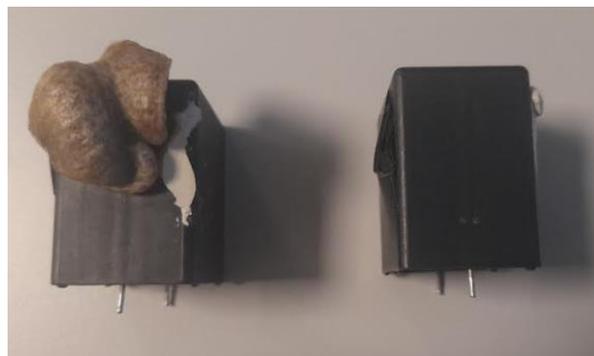


Figure 4-13 : Photographie d'un condensateur ayant subi un emballement ininterrompu face à un dont l'emballement a été stoppé.

Le condensateur de droite est celui dont l'emballlement a été arrêté, c'est à dire le 7C_85°C-85%-1,1U_n. Bien qu'il présente des fissures sur son boîtier, son état est meilleur que le condensateur de gauche, le 3C_85°C-85%-1,1U_n. La quantité de diélectrique fondu est moindre. A noter que les traces blanches visibles sur les boîtiers sont des résidus de la colle qui a permis de fixer les thermocouples.

Aux vues de ces résultats, l'hypothèse est validée : le changement de phase de l'impédance et une augmentation de la puissance active conséquente sont des signatures d'un emballlement thermique. Limiter leur croissance permet de limiter la quantité de diélectrique fondu. Le processus s'arrête avec la mise hors-tension des condensateurs.

4.4.5 Variations des éléments du schéma équivalent

4.4.5.1 Variation de la résistance d'isolement

La limite fixée en température a aussi permis d'interrompre l'emballlement de quelques condensateurs. Elle était alors de 90 °C. Il a alors été possible de caractériser au mégohmmètre la résistance d'isolement R_{is} de trois d'entre eux. Les trois provenaient du fabricant C, issus de l'essai 85°C-85%-1U_n. Les caractérisations ont eu lieu le jour même de l'interruption et se sont déroulées dans les conditions climatiques de l'essai : soit à 85 °C pour 85 % d'humidité. A chaque fois le processus a été interrompu au début de l'emballlement, sur le seuil de température de 90°C, dans la phase de montée de la puissance active.

Les valeurs de la phase de l'impédance, de la température et de la puissance active au moment de l'interruption sont données dans le tableau ci-dessous et associées à la valeur de la résistance d'isolement mesurée.

Condensateurs	Phase	Puissance active	Température mesurée	Résistance d'isolement
1C_85°C-85%-1U _n	-67 °	24 W	90 °C	16 kΩ
3C_85°C-85%-1U _n	-63 °	26 W	90 °C	12 kΩ
6C_85°C-85%-1U _n	-55 °	35 W	90 °C	400 Ω

Tableau 4-3 : Caractérisation de la résistance d'isolement juste après l'interruption de l'emballlement à 85 °C, 85 % RH

En comparaison, avant l'emballlement, au cours du vieillissement, les dernières mesures de la résistance d'isolement donnaient des valeurs de 1 à 100 MΩ. La résistance d'isolement diminue donc d'au moins un facteur 1000 au cœur de l'emballlement.

Cependant, à la fin de l'emballlement, une fois que la puissance active est retombée aux alentours de 0 W, les condensateurs présentent des résistances d'isolement à nouveau de l'ordre de 1 à 100 MΩ.

Au cœur de l'emballlement, avec l'hypothèse que les pertes sont uniquement dues à la résistance du diélectrique R_{is} sous la tension de l'essai U, la résistance du diélectrique calculée à partir des mesures de puissance active P ($R_{is} = \frac{U_{rms}^2}{P}$), est de l'ordre de grandeur des valeurs de la résistance d'isolement mesurées. Une résistance de 4,3 kΩ dissipe 25 W.

De même, la chute de la puissance active à 0 W concorde avec la restauration de la résistance d'isolement à sa valeur avant emballage. Une résistance de 1 MΩ dissipe 0,1 W.

L'échauffement du condensateur qui mène à la fonte du diélectrique est donc lié à la diminution soudaine de la résistance d'isolement.

Les écarts entre les valeurs mesurées de la résistance d'isolement et calculées de la résistance du diélectrique peuvent en partie être expliqués par les incertitudes de mesures. Les mesures au mégohmmètre étaient particulièrement imprécises. Deux mesures consécutives de la même résistance d'isolement au cœur de l'emballage donnaient des valeurs proches de ± 2 kΩ. Le reste de l'écart suggère que les pertes dans le diélectrique ne peuvent pas être assimilées uniquement à la résistance du diélectrique R_{is} . Il est possible que l'emballage augmente le nombre de charges piégées dans le diélectrique. Ainsi, il faudrait aussi considérer une résistance de polarisation pour modéliser le comportement de ces charges et remonter à la valeur de la résistance d'isolement.

Entre autres, le mégohmmètre mesure le courant de fuite du condensateur pour donner une valeur de résistance. Ainsi, la résistance du diélectrique R_{is} comprise dans la résistance d'isolement peut ne pas être uniquement l'image de la seule résistance du polypropylène. Le courant de fuite mesuré peut venir du changement de structure du polypropylène en lui-même lors de sa fonte ou bien de l'apparition d'un chemin conducteur constitué d'impuretés extérieures telles que des espèces chimiques ionisées, des résidus métalliques provenant des électrodes ou des atomes de carbones désolidarisés des polymères. Il est aussi probable que cela soit un mélange de ces causes, la fusion du polypropylène créant des impuretés.

Il a été remarqué que la valeur de la résistance d'isolement d'un condensateur dont l'emballage a été interrompu à son apogée varie selon le moment où la mesure a été effectuée et selon les conditions environnementales subies entre-temps. Si la mesure a lieu le jour de l'emballage, les valeurs de la résistance d'isolement sont de l'ordre de celles présentées dans le tableau 4-3. Mais si le condensateur en défaut est sorti des conditions d'essai sans qu'aucune contrainte supplémentaire ne lui soit appliquée, la résistance d'isolement revient à ses niveaux initiaux de l'ordre du MΩ et y reste.

Pour les condensateurs de l'essai 7 : 95°C-85%-1U_n, des résistances d'isolement après emballage ont pu être mesurées à différents moments après l'interruption. La première mesure H₁, a eu lieu deux jours après l'interruption. Les condensateurs sont restés sous les conditions d'essai (95 °C, 85 % RH) entre-temps. Pour la mesure H₁, les condensateurs ont été sortis de l'enceinte. Un délai minimum de 2h30 a été respecté pour s'assurer de leur redescende en température à 25 °C. La seconde mesure H₂ a eu lieu 9 jours après H₁. Pendant ce délai, les condensateurs étaient conservés à 25 °C. Les deux caractérisations se sont donc effectuées à 25 °C et le tableau ci-dessous présente ces résultats :

Condensateurs	Caractéristique de l'interruption		Résistance d'isolement	
	Phase	Puissance active	H ₁ (25 °C)	H ₂ (25 °C)
1B_95°C-85%-1U _n	- 60 °	41 W	27,7 kΩ	35,4 MΩ
4B_95°C-85%-1U _n	-38 °	55 W	9,3 kΩ	5,38 MΩ

Tableau 4-4 : Caractérisation de la résistance d'isolement à différents moments après une interruption de l'emballage

Les valeurs des résistances d'isolement obtenues pendant la mesure H_1 sont du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées le jour même de l'emballage (cf. tableau 4-3). La différence peut être associée à la différence de température de mesure.

Cependant, les valeurs obtenues lors de la mesure H_2 ont augmentées d'un facteur 1000. Elles sont de l'ordre de grandeur des résistances d'isolement obtenues à la fin de l'emballage.

Ainsi, le chemin conducteur présent pendant l'emballage disparaît si les conditions environnementales du condensateur reviennent à des niveaux standards. Cette observation conduit à supposer que le chemin conducteur au cœur de l'emballage est constitué d'espèces chimiques ionisées particulièrement instables. Ainsi, si la température reste à des niveaux élevés, l'énergie apportée permettrait de les maintenir en état et diminuerait la probabilité de recombinaison. En revanche, une fois la température redescendue, l'équilibre évoluerait. Les espèces chimiques instables s'appariaient au plus vite pour redevenir stable. Cette hypothèse explique pourquoi le chemin conducteur disparaît et la résistance d'isolement du diélectrique se rétablit.

Un début de réponse est donc apporté à la question de la provenance d'un chemin conducteur pendant l'emballage. Si l'origine première du chemin conducteur reste inconnue, son aggravation est directement due à la fonte du diélectrique. Au cœur de l'emballage, le courant de fuite est majoritairement constitué des impuretés occasionnées par la dégradation chimique du polypropylène.

4.4.5.2 Variation de la résistance de métallisation

Une caractérisation à l'impédancemètre a pu être faite sur le condensateur 4C_85°C-85%-1,1U_n à différents moments de son emballage. La première a eu lieu au moment de son interruption à l'instant I_1 , illustré sur la figure 4-14, avant le pic maximal de puissance. Après une pause de 5 h dans laquelle le condensateur est resté dans les conditions climatiques d'essai, le condensateur a été remis sous tension. L'emballage a repris. Une fois sa puissance active redescendue à 0 W, à la fin de l'emballage, à l'instant I_2 , une deuxième caractérisation a été effectuée. Toutes les deux sont comparées sur la figure 4-15 à sa caractérisation initiale en conditions d'essai, avant vieillissement.

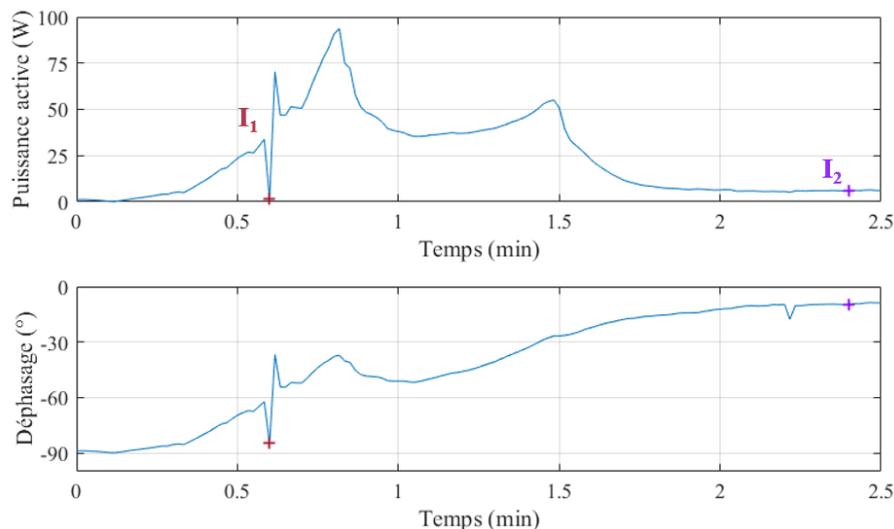


Figure 4-14 : Instants pendant l'emballage où les caractérisations ont été effectuées

Grâce à l'équation (3-4), la valeur de la résistance de métallisation R_s a pu être calculée sur la base de mesure de l'ESR et de la capacité à 10 kHz. La résistance d'isolement a été assimilée à la résistance du diélectrique R_{is} . La valeur de la résistance d'isolement a été approximée à 10 k Ω à l'instant I_1 et à 1 M Ω à l'instant I_2 . Cette valeur d'1 M Ω a été choisie, car elle conduit à la plus petite valeur de R_s , soit le cas où l'impact de l'emballage est minimum.

La résistance de métallisation R_s initiale est de 0,013 Ω . A l'instant I_1 , elle est de 0,78 Ω . Après l'emballage, elle est au minimum de 181 Ω .

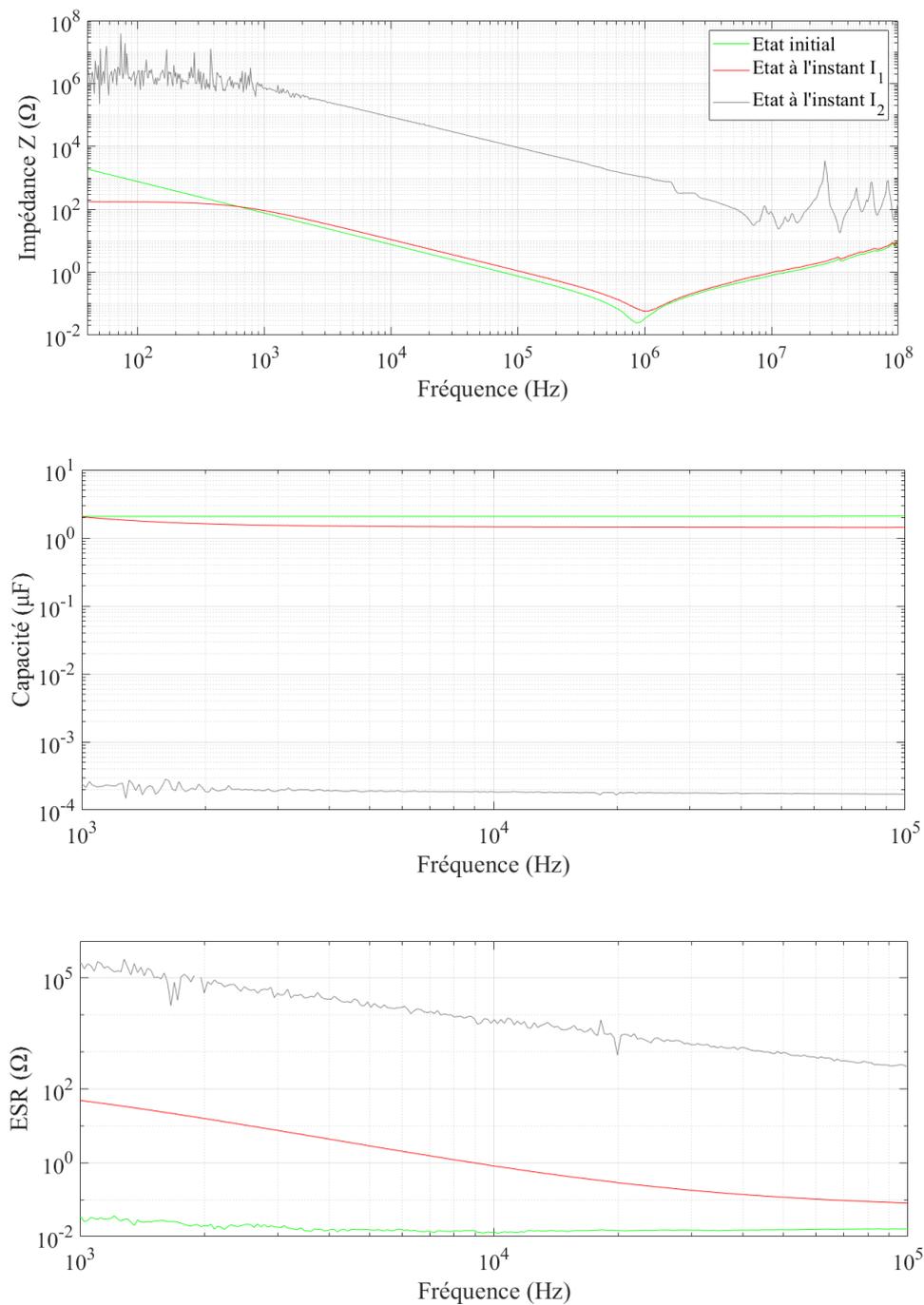


Figure 4-15 : Caractérisation de l'impédance d'un condensateur à différents instants de son emballage (cf. figure 4-14) à 85 °C/ 85 % RH

A l'instant I_1 , R_s est de l'ordre de grandeur des condensateurs du même fabricant en vieillissement. Bien qu'il y ait un facteur 60 par rapport à sa valeur initiale, il est plus juste d'associer cette augmentation à l'effet du vieillissement plutôt qu'au début de l'emballement. En conséquence, si l'échauffement induit par ses pertes par effet joule tout au long du vieillissement est indéniable, la résistance de métallisation ne semble pas avoir joué de rôle dans le déclenchement de l'emballement, ou alors de façon minime.

En revanche, l'emballement affecte fortement R_s par la suite. Dans le meilleur des cas, la résistance de métallisation augmente d'un facteur 230. Le processus d'emballement réduit drastiquement le volume de la métallisation.

A l'instant I_1 , R_s a une valeur maximale de $0,81 \Omega$ en considérant $R_{is} = 100 M\Omega$. Pendant l'emballement, la valeur la plus élevée atteinte par le courant efficace est de $0,33 A$. Au maximum, la puissance dissipée par R_s ($< 0,1 W$) reste négligeable face à la puissance active mesurée à l'instant I_1 ($\sim 30 W$).

Ce résultat confirme la prédominance des pertes de la résistance d'isolement. Les pertes dues à la résistance de métallisation ne deviennent significatives qu'une fois la puissance active retombée à des niveaux proches de $0 W$. Elles ne présentent alors pas d'intérêt, le processus d'emballement étant terminé.

4.4.5.3 Variation de la capacité

En négligeant R_s et en utilisant le schéma équivalent présenté au paragraphe 3.2.2, il devient possible d'approximer la capacité du condensateur pendant l'emballement. L'équation est détaillée ci-dessous :

$$C = - \frac{\tan(\varphi) P}{U_{rms}^2 \omega} \quad (4-5)$$

avec U_{rms} la tension efficace appliquée et ω la pulsation électrique.

Ces valeurs sont ici constantes. P est la puissance active. Compte tenu de nos hypothèses, elle correspond purement à l'image des pertes dans le diélectrique. φ est le déphasage constaté au fur et à mesure du temps.

L'évolution de la capacité pour l'emballement illustré par les chronogrammes de la figure 4-7 est affichée ci-dessous :

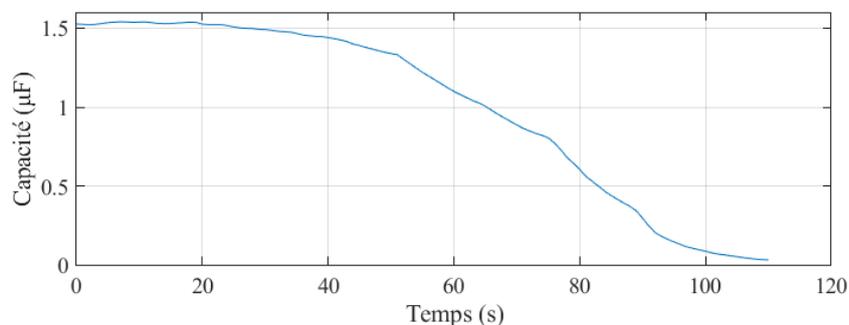


Figure 4-16 : Evolution de la capacité pendant l'emballement thermique illustrée par les chronogrammes de la figure 4-7

La variation de capacité est de forme similaire à celle du courant à la différence qu'elle ne fait que décroître. Au début de l'emballement, la capacité reste stable. Sa chute tardive

ne permet pas de prévenir le pic de puissance active. La capacité est donc un très mauvais indicateur d'emballlement.

Tous les résultats pointent sur le fait que l'emballlement est la manifestation d'une modification du diélectrique. Un bon indicateur doit renseigner précocement sur l'état de santé du diélectrique. La capacité est de base un mauvais indicateur à ce niveau. Mathématiquement (cf. équation (1-6)), la capacité ne peut renseigner que sur la permittivité du diélectrique, soit sa polarisabilité. Des informations qui semblent importantes telles que celles liées au courant de fuite y sont absentes. Ensuite, la capacité est dépendante d'autres paramètres du condensateur telle que la surface des électrodes, qui elles aussi sont affectées par le vieillissement. Ainsi, elle ne paraît pas être un indicateur pertinent.

4.5 Interprétation du phénomène d'emballlement

Plus le diélectrique vieillit, plus il se fragilise. La probabilité de défauts en son sein augmente. A un moment, un défaut est assez conséquent pour maintenir un courant de fuite sur quelques périodes. Le condensateur devient localement résistif. Les niveaux de tension sont assez élevés pour qu'une puissance active significative apparaisse. Cette dernière chauffe sévèrement le composant, en particulier à l'endroit du défaut. Les températures atteintes causent la fusion locale du diélectrique et dégradent les polymères avoisinants. Les énergies en jeu empêchent l'auto-cicatrisation. En conséquence, le défaut empire et s'étend aux zones voisines. La chute de la résistance du diélectrique est aggravée et entraîne une hausse de la puissance active. La fusion se propage, alimentant le cycle infernal de l'emballlement thermique.

Le processus d'emballlement s'effectue par à coup. A certains moments, des interruptions dans le processus d'emballlement surviennent, caractérisées par une soudaine chute de puissance active, du courant et du déphasage. Elles se présentent sous la forme de pics (cf. moments T_0+25s , T_0+51s , T_0+75s signalés sur la figure 4-7) et possèdent tous les attributs d'une déconnexion partielle. Notre hypothèse est qu'au fur et à mesure de l'emballlement, des chemins conducteurs se créent dans le diélectrique. Ils sont constitués des particules métalliques constituant les électrodes et des défauts diélectriques provoqués par la fonte. Toutefois, l'intensité de la chaleur et la durée du processus est telle que les particules métalliques finissent à un moment par se sublimer, comme pour une auto-cicatrisation. Les chemins conducteurs sont donc amenés à s'estomper. Ainsi, la présence des interruptions dans le processus d'emballlement indique que la suppression des chemins conducteurs locaux se fait par à coup, de manière partielle jusqu'à la panne totale du composant.

Comme les déconnexions sont partielles, un courant de fuite subsiste. S'il est suffisant pour maintenir la fusion du diélectrique, le processus d'emballlement continue jusqu'à la prochaine déconnexion partielle. Au fur et à mesure, les portions du diélectrique disponibles à la fonte et la surface des électrodes se réduisent. Il y a de moins en moins de possibilité de créer des chemins conducteurs problématiques. C'est pourquoi, la puissance active et de courant atteignent des valeurs de moins en moins hautes. Les déconnexions partielles s'enchaînent jusqu'à ce que la métallisation se soit entièrement sublimée ou que la fusion ne soit plus maintenable par le courant de fuite. Dans le premier cas, le condensateur meurt en circuit ouvert, dans l'autre, le courant de fuite continue de chauffer le condensateur. Un nouvel emballlement peut alors survenir et achever de le déconnecter.

Durant tout le processus d'emballement, le déphasage entre le courant et la tension du condensateur augmente. Il est dû au changement de résistance du diélectrique. Il s'aggrave avec la perte de capacité qui va de pair avec la réduction de la surface des électrodes par sublimation. Ainsi, la phase reste près de 0° malgré la restauration de la résistance du diélectrique une fois l'emballement passé.

4.6 Autres observations

Lors de l'essai 7 : $95^\circ\text{C}-85\%-1U_n$, après une longue période de déconnexion (3 à 4 jours) dans les conditions climatiques d'essai, deux condensateurs du fabricant B sont morts en circuit ouvert, une seconde après leur remise sous-tension. Ils ont subi un pic de puissance active de respectivement 102 et 135 W. Pour autant, ces condensateurs n'ont pas présenté de signes d'emballement extérieurs lors de l'examen visuel post-mortem. Ils ne font donc pas partie des condensateurs ayant subi un emballement, référencés dans le tableau 4-2. Le phénomène a été trop court pour entretenir et étendre la fusion du diélectrique.

Il est probable qu'il s'agisse en fait d'auto-cicatrisations qui ont remplis leur rôle. Les décharges électriques ont immédiatement mis le composant en circuit-ouvert et interrompu l'emballement.

Dans la même situation, le condensateur $5C_{95^\circ\text{C}-85\%-1U_n}$ a réagi différemment. Il a aussi été pré-vieilli avant d'être mis hors-tension dans les conditions climatiques de l'essai pendant 3 jours. A sa remise sous-tension, une puissance active non négligeable de l'ordre de 10 W a été observée. Au fil des secondes, cependant, le déphasage s'est rétabli. Le processus d'emballement ne s'est pas mis en place. Les chronogrammes de ce phénomène sont visibles sur la figure 4-17.

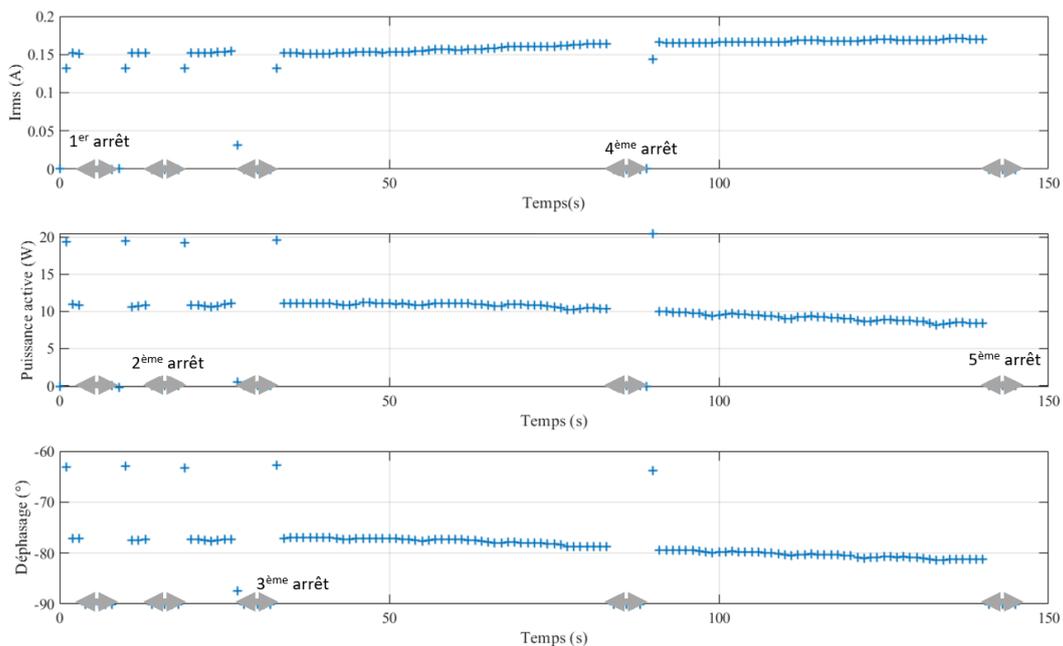


Figure 4-17 : Pic de puissance sans emballement du condensateur $5C_{95^\circ\text{C}-85\%-1U_n}$

Lors de l'examen post-mortem, ce condensateur n'a pas affiché de traces d'emballement. Son diélectrique n'a pas fondu. En revanche, les films métallisés situés à l'extérieur de son bobinage ne présentaient plus aucune trace de métallisation. Une illustration de leur état est affichée sur la figure ci-dessous :



Figure 4-18 : Photographie de deux films métallisés superposés du condensateur 5C_95°C-85%-1U_n après l'évènement de la figure 4-17

Au microscope optique, des petits points de fusion ont été retrouvés entre les films.

Ici aussi, l'hypothèse la plus probable est que les auto-cicatrisations n'ont pas dégénéré et ont continué à remplir leur rôle. Au fur et à mesure du rétablissement de la rigidité diélectrique du composant, la puissance active diminue. Le composant maintient donc sa fonctionnalité, moyennant une perte de capacité.

Cependant, même si les auto-cicatrisations s'effectuent, il reste problématique d'autoriser la présence d'une puissance active sur une longue durée. L'augmentation de la température interne induite peut suffire à déclencher le processus d'emballement.

4.7 Discussion sur la prédictibilité d'un emballement

Il a été démontré que la probabilité d'apparition d'impuretés à l'origine d'un emballement n'est pas seulement fonction des facteurs environnementaux, du vieillissement et de caractéristiques propres aux fabricants mais aussi des durées des mises hors-tension.

La présence de tension réduit les probabilités par le fait de l'auto-cicatrisation.

Un arrêt de tension pendant une longue durée est corolaire d'apparition d'impuretés. Plus la période de vieillissement avant la mise hors-tension est longue et s'est déroulée dans des conditions sévères, plus le risque d'emballement augmente à la remise sous tension.

Les impuretés s'accumulent dans le diélectrique du fait des conditions climatiques du vieillissement. Non-éliminées en l'absence de tension, les défauts s'aggravent. A la prochaine mise sous-tension, les défauts peuvent déclencher des décharges électriques avec des énergies plus importantes. Des températures plus hautes sont alors atteintes. Le risque que les décharges s'auto-entretiennent, augmente, tout comme le risque d'emballement.

En outre, l'emballement peut ne pas avoir lieu immédiatement après la mise sous tension, mais survenir après une dizaine de minutes. Si des défauts sont présents dans le diélectrique, des auto-cicatrisations vont s'effectuer. Les auto-cicatrisations induisent une puissance active qui diminue au fil des auto-cicatrisations. La chaleur générée pendant cette première phase peut suffire à déclencher un emballement. Ainsi, s'assurer qu'il n'y a pas de défaut au démarrage, ne suffit pas pour conclure qu'un condensateur ne subira pas un emballement. Un temps d'attente de la stabilisation de la puissance active du condensateur est nécessaire.

Il a également été montré qu'une fois la fusion survenue, le chemin conducteur responsable de l'emballement peut disparaître si la tension est coupée.

Tous ces éléments mettent en lumière le caractère assez imprévisible du phénomène. Si les éléments de l'étude permettent de détecter assez tôt les emballements, leur prédiction reste très complexe. Une loi de prévision robuste doit s'appuyer sur les conditions climatiques et de tension du diélectrique en tout point de son vieillissement. Les ruptures de contraintes ont une influence. En outre, le caractère ambivalent du comportement de la tension doit être pris en compte. Si son effet est positif par le biais de l'auto-cicatrisation, elle contribue aussi à fragiliser le diélectrique (cf. paragraphe 1.4.2.3). En outre, si la tension est trop élevée, les décharges électriques entre films ne s'auto-éliminent pas.

4.8 Résultats expérimentaux relatifs aux défaillances par dérive

4.8.1 Résultats des caractérisations périodiques

Les résultats des caractérisations effectuées à l'impédancemètre tout au long des essais pour tous les condensateurs sont affichés de la figure 4-19 à la figure 4-22. Il y figure aussi leur moyenne, mise en évidence en gras, accompagnée d'une représentation visuelle de leur écart-type, indiqué par une zone grisée.

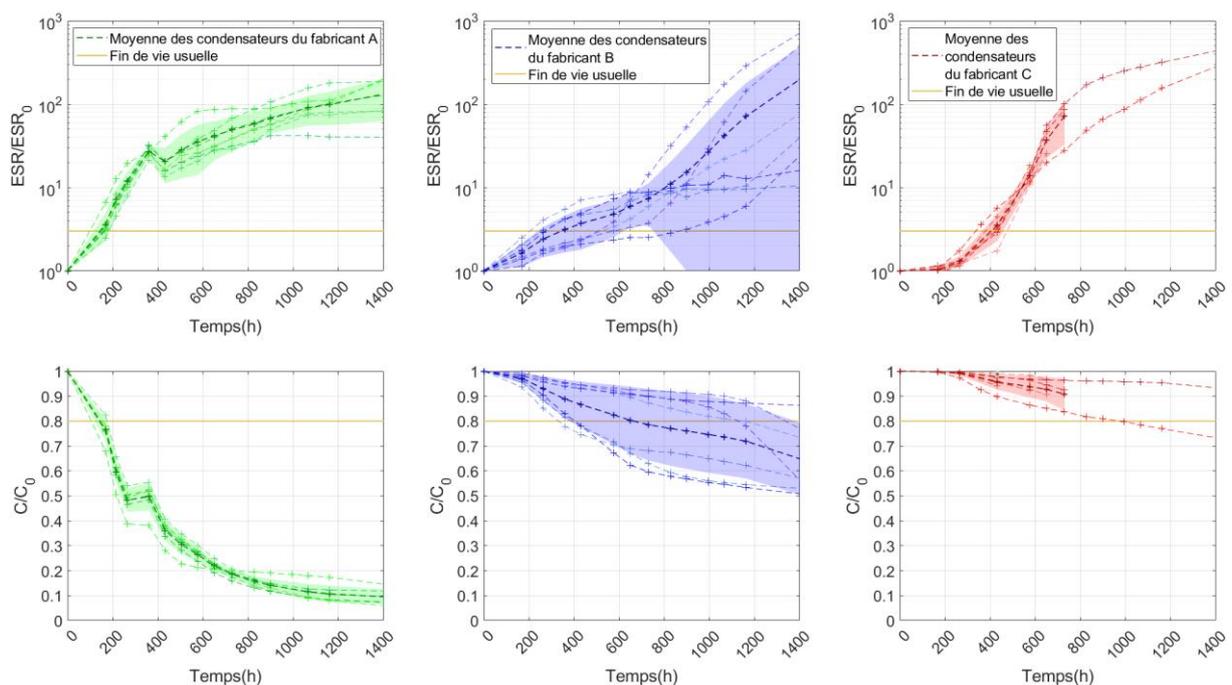


Figure 4-19 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 85 °C, 85 % RH) des condensateurs pendant l'essai 4 : 85°C/ 85 % RH/ 1 U_n

Sur l'essai 85°C-85%-1 U_n , entre les caractérisations à 264 et à 360 h de vieillissement, les condensateurs du fabricant A ont subi une interruption de 3 jours de la contrainte de tension. En revanche, ils sont restés dans les conditions climatiques de l'essai. Cette interruption n'a pas eu lieu pour les autres condensateurs.

Durant ce laps de temps, la capacité est restée stable, démontrant l'effet accélérateur de la contrainte de la tension AC. La résistance d'isolement est aussi restée stable (cf. figure 4-23). En revanche, les mesures de l'ESR à 360 h sont incongrues. Les valeurs à 360 h

sont plus élevées que les valeurs à 432 h. Cela est assez inexplicable étant donné que la détérioration de la résistance de métallisation R_s est irréversible. Une erreur de calibration ne peut pas être mise en cause car cet effet ne se retrouve pas chez les condensateurs des autres fabricants.

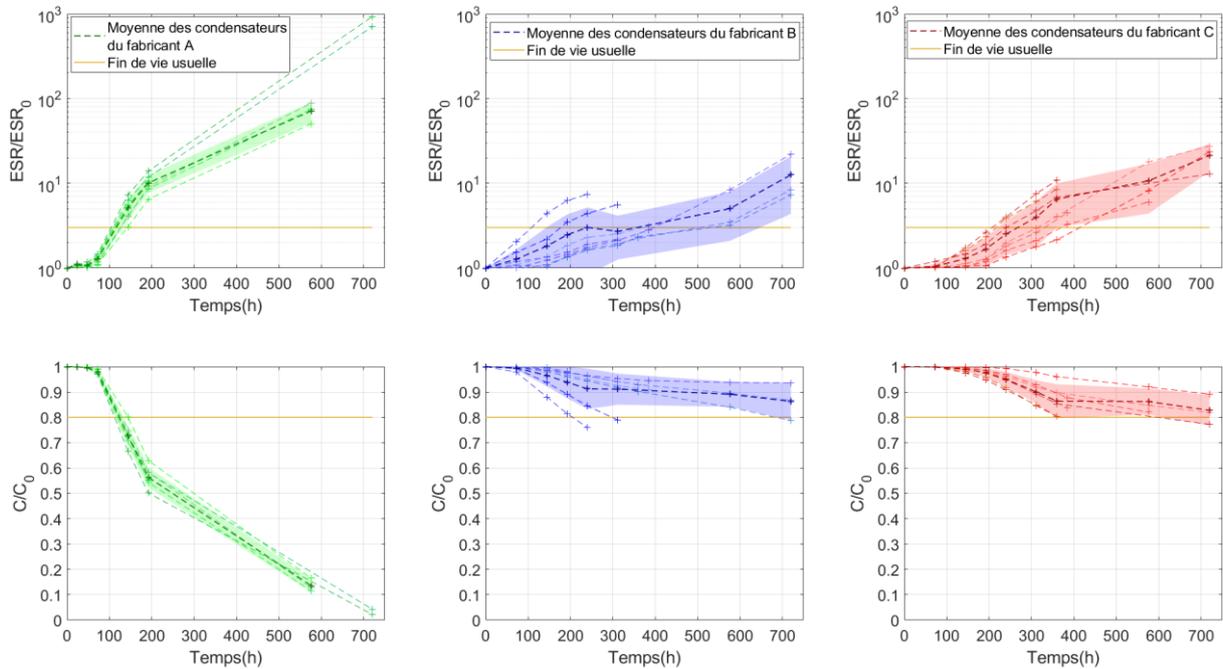


Figure 4-20 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 85 °C, 85 % RH) des condensateurs pendant l'essai 5 : 85°C/ 85 % RH/ 1,1 U_n

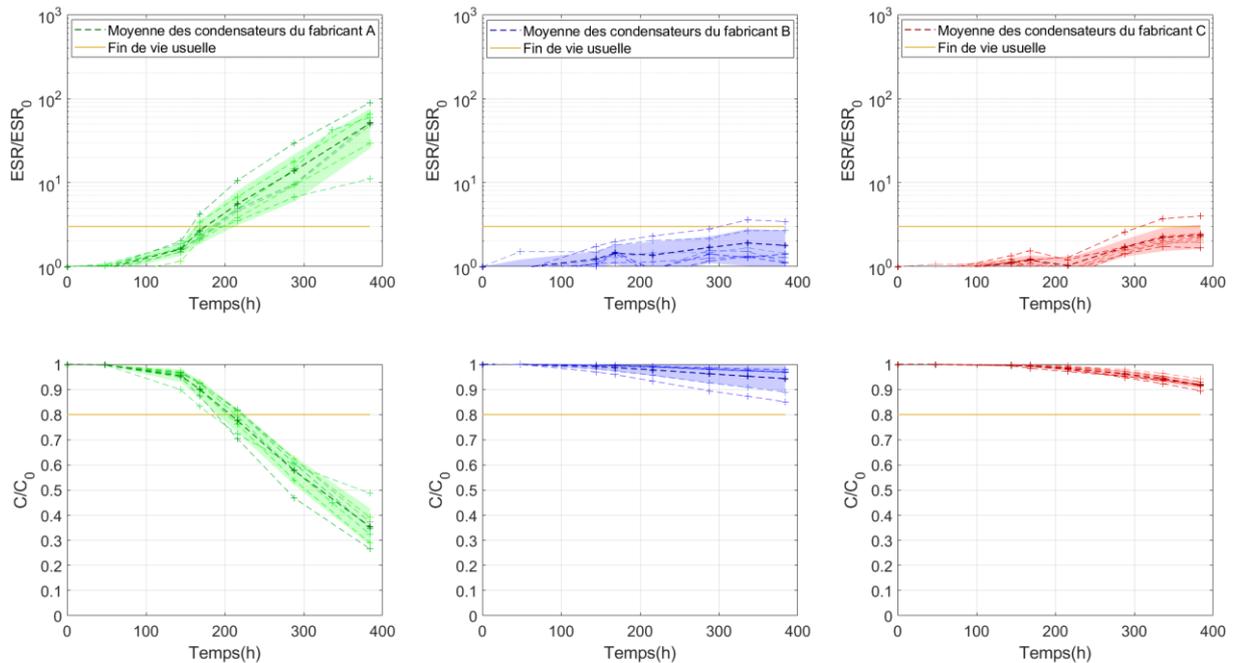


Figure 4-21 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 85 °C, 75 % RH) des condensateurs pendant l'essai 6 : 85°C/ 75 % RH/ 1 U_n

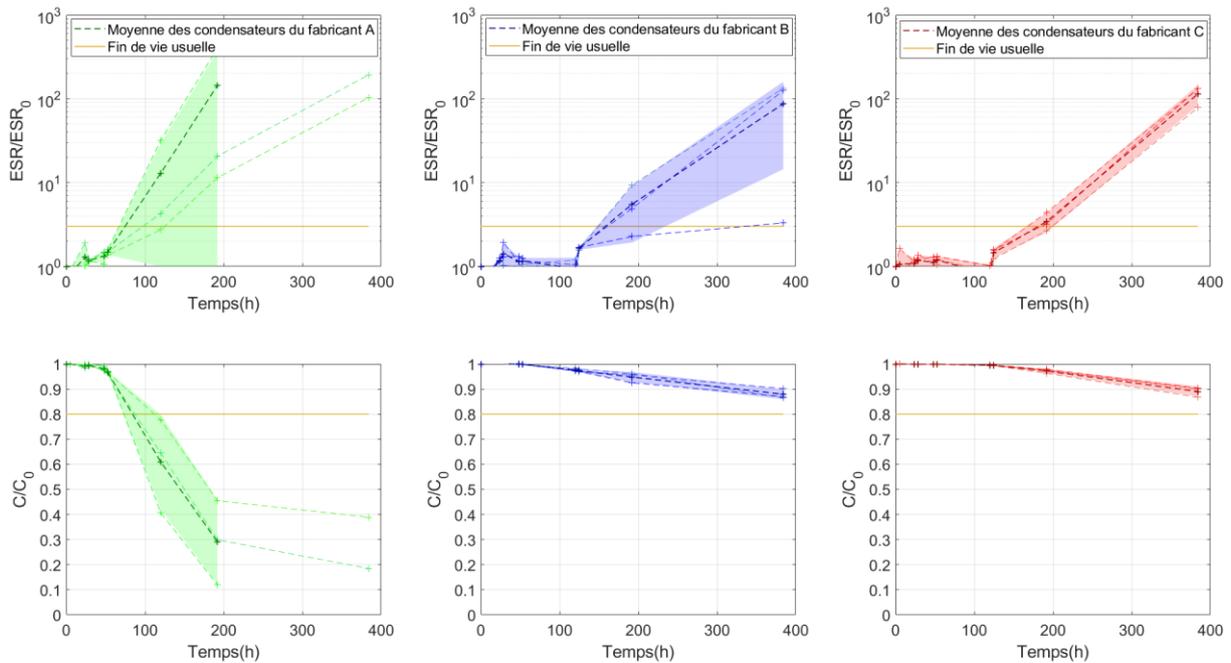


Figure 4-22 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 95 °C, 85 % RH) des condensateurs pendant l'essai 7 : 95°C/ 85 % RH/ 1 U_n

La cinétique de dégradation des indicateurs de santé diffère d'un fabricant à un autre. De plus, même au sein d'une même référence, il peut exister des dispersions fortes. Il y a un écart-type de $\pm 13,5 \%$ sur la valeur des capacités des condensateurs B_85°C-85%-1 U_n au moment où leur valeur moyenne franchit le seuil de fin de vie des 20 %. Ainsi, le procédé de fabrication a un impact majeur sur le vieillissement. Une loi de vieillissement robuste doit en tenir compte.

Ces résultats remettent en cause la méthode usuelle d'estimation de la durée de vie des condensateurs à partir de coefficients empiriques v_{S_i} des lois basées sur l'impact des facteurs de défaillances ($v_T, v_{RH}, v_{U_1}, v_{U_2}, v_{1T}, v_{2T}, v_{1S_i}, v_{2S_i}$ des équations (2-8) et (2-13) présentées dans le paragraphe 2.3.2). Il y a une erreur intrinsèque importante à estimer la durée de vie d'une référence de condensateur à partir de la valeur moyenne d'un de leurs indicateurs de santé (C, ESR). L'erreur est encore plus grande si la moyenne d'une référence d'un fabricant est utilisée pour déduire la durée de vie de références équivalentes d'autres fabricants.

Aussi, il convient de remarquer que la forme des courbes, en particulier celle de la capacité, sont différentes de celles observées dans les vieillissements en tension et température présentées dans le paragraphe 3.4.1. Cela montre que les facteurs de défaillance n'agissent pas de manière indépendante sur la durée de vie des condensateurs à films métallisés. L'effet de la température n'est pas le même si le condensateur est aussi soumis à de l'humidité. Il est facile de mettre en évidence les effets cumulés en se basant sur les mécanismes de défaillance (cf. paragraphe 1.4.3). Ainsi, il convient d'utiliser les coefficients empiriques donnés par l'état de l'art avec prudence. Pour un même condensateur, le coefficient codant l'effet de la température de l'équation (2-8) prendra des valeurs différentes selon s'il est associé avec l'équation (2-9) ou avec l'équation (2-10).

Sans surprise, la température est le paramètre accélérant le plus le vieillissement des composants. Augmenter la tension de 10 % ici semble avoir un impact mineur. L'essai

85°C-85%-1,1U_n engendre des dégradations du même ordre que l'essai 85°C-85%-1U_n. Diminuer le taux d'humidité ralentit le processus de dégradation de la capacité et de R_s. Outre la température, le mécanisme de dégradation majeur est donc surtout fonction de l'humidité et peu des variations de tension.

L'évolution de la résistance d'isolement des condensateurs lors de l'essai 4 : 85°C-85%-1U_n est présentée sur la figure 4-23. La moyenne est mise en évidence en gras et leur écart-type est indiqué par une zone grisée.

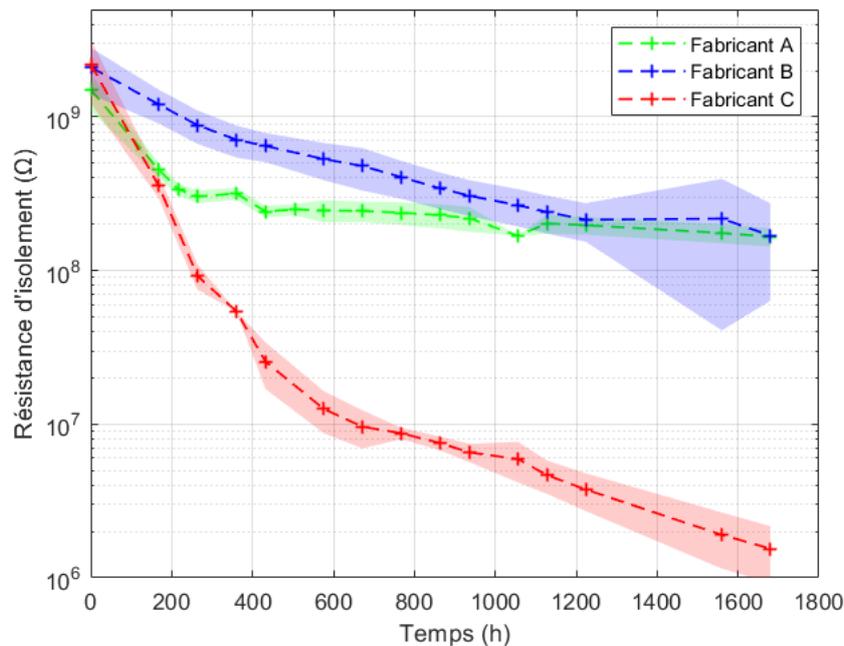


Figure 4-23 : Evolution de la résistance d'isolement à 85 °C et 85 % d'humidité relative des condensateurs lors de l'essai 4 : 85 °C/ 85 % RH/ 1 U_n

Le diélectrique est bien affecté par les contraintes de vieillissement. Le courant de fuite augmente d'un facteur 1000. La dégradation est cependant beaucoup plus prononcée au début du vieillissement et va de pair avec celle de la capacité. Cela peut être dû à la diffusion de l'humidité dans le diélectrique.

Les faibles valeurs de la résistance d'isolement des condensateurs du fabricant C sont une piste d'explication à leur plus forte probabilité d'emballage. C'est une preuve que leur diélectrique a été le plus fragilisé.

4.8.2 Dégradation de la capacité en temps réel

La dégradation de la capacité des condensateurs de chaque essai est représentée sur les figures ci-dessous. A la différence du paragraphe précédent, les valeurs ont été obtenues grâce aux mesures de la tension et du courant à 50 Hz selon l'équation (4-2).

Les valeurs aberrantes de la capacité dues aux mises hors-tension, notamment lors les caractérisations, ont été enlevées. Seules subsistent les valeurs de la capacité des condensateurs pendant leur vieillissement en tension, dans les conditions climatiques des essais. L'affichage des courbes en fonction des différents fabricants est disponible en annexe (cf. annexe C.)

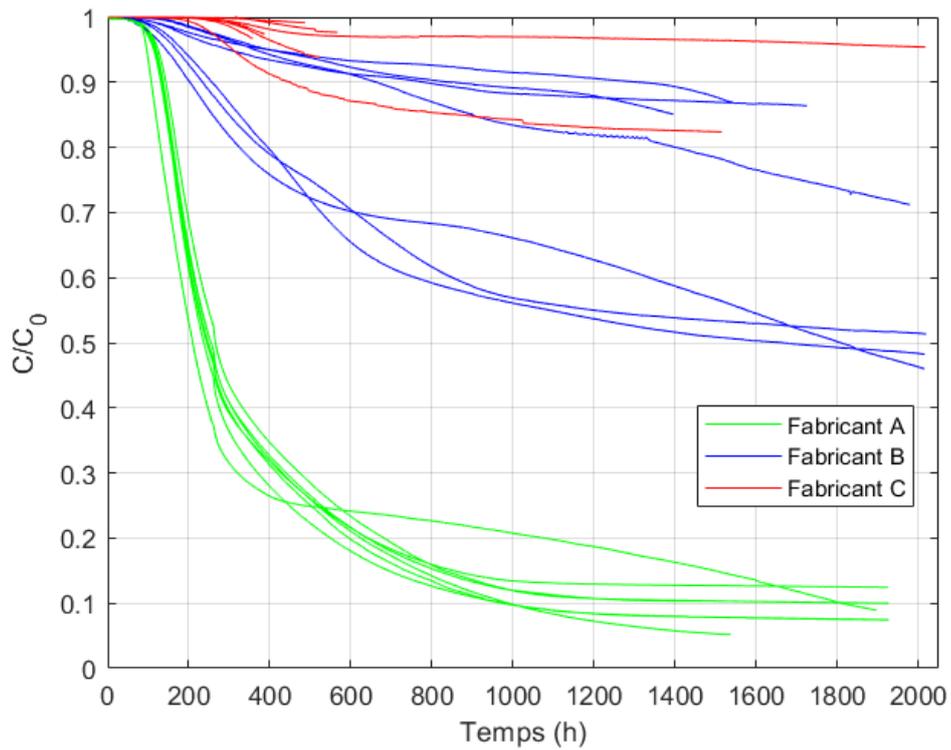


Figure 4-24 : Evolution de la capacité des condensateurs de l'essai 4 : 85°C/ 85% RH/ 1 U_n

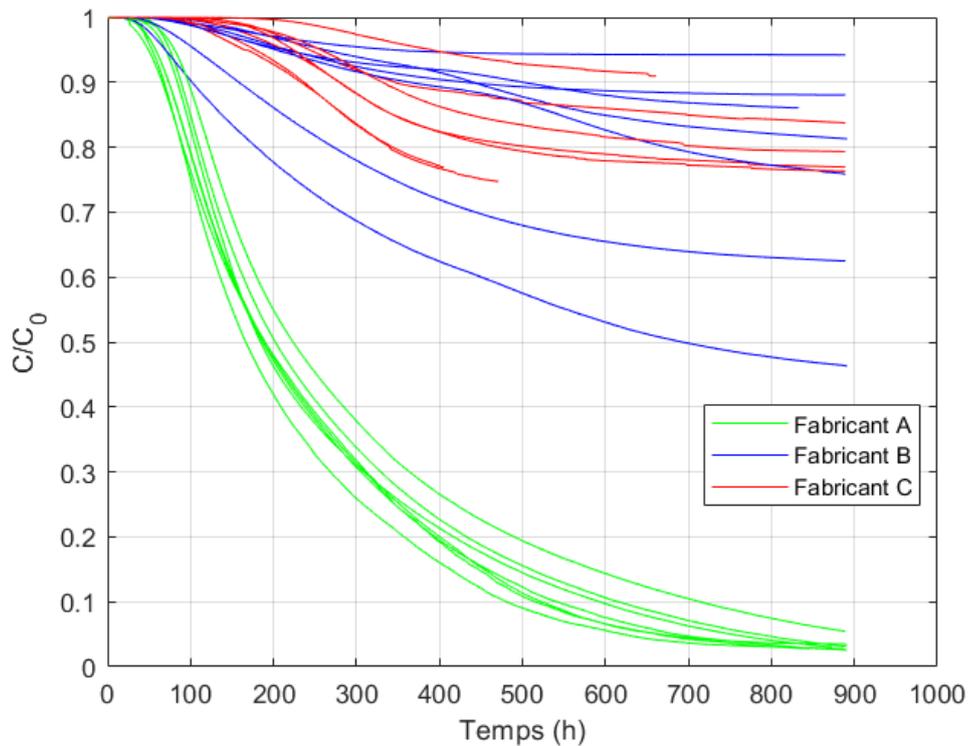


Figure 4-25 : Evolution de la capacité des condensateurs de l'essai 5 : 85°C/ 85% RH/ 1,1 U_n

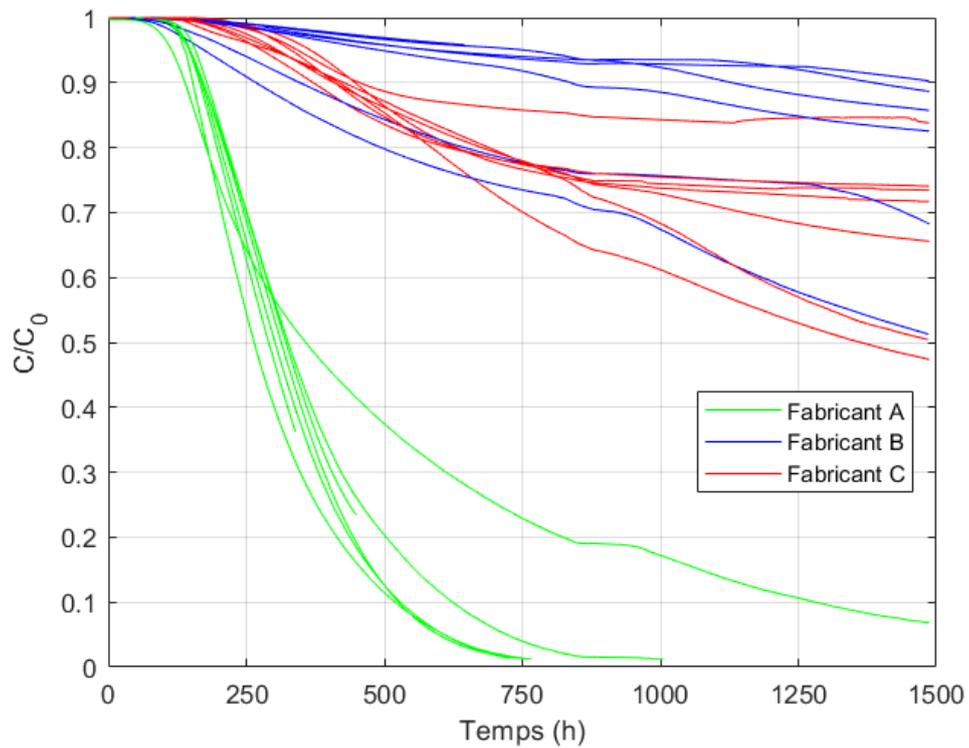


Figure 4-26 : Evolution de la capacité des condensateurs de l'essai 6 : 85°C/ 75% RH/ 1 U_n

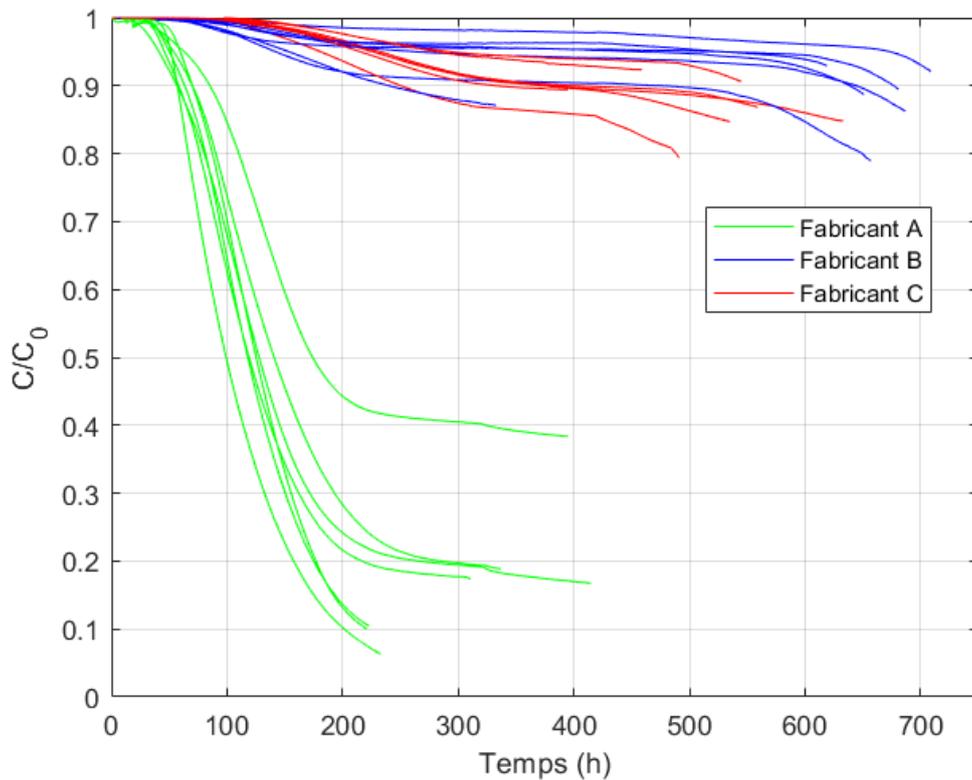


Figure 4-27 : Evolution de la capacité des condensateurs de l'essai 7 : 95°C/ 85% RH/ 1 U_n

Les résultats sont cohérents avec ceux des autres études ayant étudié l'impact des contraintes en tension, température et humidité sur des condensateurs à films polypropylène métallisés (cf. paragraphe 3.1.1). Les défaillances à l'origine des dégradations sont donc dues aux mêmes mécanismes. A un facteur d'échelle près, les formes des courbes sont similaires d'un essai à un autre. Les nouvelles contraintes ne semblent donc pas révéler d'autres types de défaillances.

La dégradation de la capacité semble comporter majoritairement 3 phases. Pendant les premières centaines d'heures de vieillissement, la capacité reste stable et ne varie quasiment pas. Ensuite, elle chute brusquement et sa dégradation s'accélère. Enfin, à un certain point, la dégradation décélère et semble atteindre un plateau. Chez certains condensateurs, ce plateau n'est pas à une valeur de 0 μF . Une quatrième phase est donc observée, particulièrement visible chez les condensateurs des fabricants B et C de l'essai 95°C-85%-1U_n. Après un certain temps, la dégradation se remet à s'accélérer.

C'est l'observation des premières et deuxièmes phases qui a mené à l'équation (2-14), l'équation Exp⁺. Cependant, cette fonction ne permet pas la représentation de la phase de décélération de la dégradation. Nos résultats montrent donc qu'elle est incomplète.

La première phase, celle du maintien de la capacité à sa valeur initiale, n'est pas observée dans les études ayant fait vieillir des condensateurs sans leur boîtier [82]. Ainsi, celle-ci est certainement due à la résine isolante enveloppant les condensateurs. La première phase comporte très peu de dégradations car l'humidité n'a, a priori, pas encore atteint les films métallisés. 4.1.2

4.8.3 Analyse post-mortem

L'état des films métallisés après l'essai 85°C-85%-1U_n est affiché sur la figure 4-28 pour un condensateur de chaque fabricant.

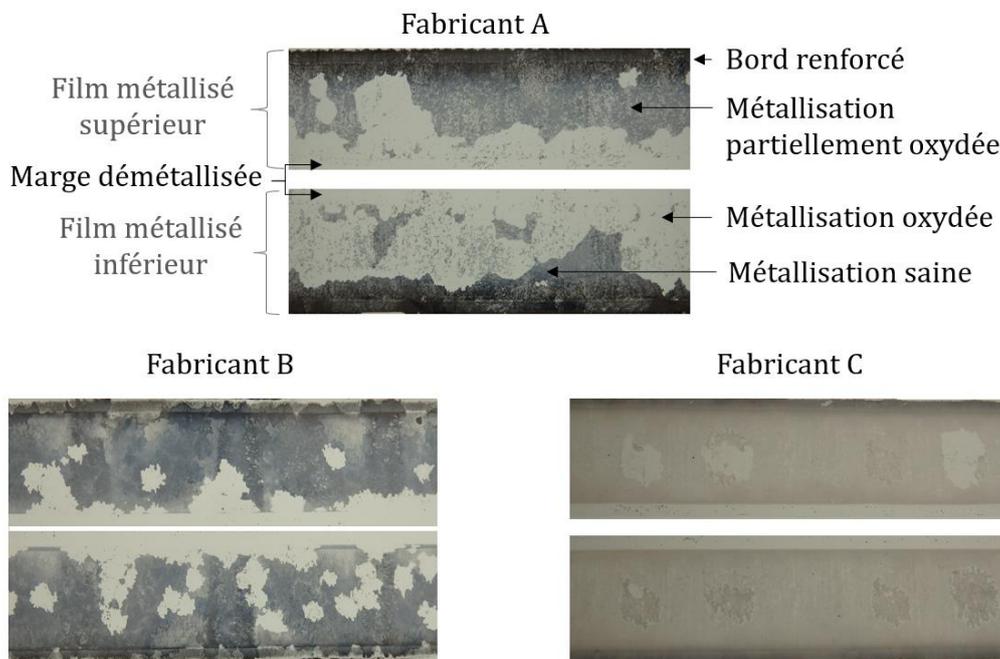


Figure 4-28 : Etat des films métallisés pour un condensateur de chaque fabricant après l'essai 4 : 85°C-85%-1U_n.

Les deux films photographiés étaient initialement placés l'un sur l'autre, leur marge du côté opposé l'un de l'autre. S'ils ont été prélevés au milieu du bobinage, leur apparence est néanmoins représentative de l'entièreté des films métallisés du condensateur : de l'extérieur du bobinage jusqu'à l'intérieur. L'apparence des films métallisés des autres condensateurs qui ont été ouverts au fur et à mesure de l'étude, est similaire à celles affichées sur la figure 4-28.

On peut y voir qu'une partie de la surface des électrodes a visiblement disparu. La métallisation a plus fortement été attaquée pour les condensateurs du fabricant A. Les condensateurs du fabricant C sont ceux ayant subi le moins de dommage. La quantité de surface perdue est cohérente avec les réductions de capacité (cf. paragraphe 4.8.2). Les condensateurs du fabricant A ont vu leur capacité être réduite d'au moins 80 % tandis que la réduction n'a pas dépassé les 25 % pour les condensateurs du fabricant C (cf. figure 4-24). Tout comme les niveaux de dégradation de l'état des films, les niveaux de la dégradation de la capacité des condensateurs du fabricant B se positionnent entre ceux des composants des deux autres fabricants.

En conclusion, il semble bien que la réduction de capacité soit directement liée à la diminution de la surface des électrodes causée par le vieillissement.

Les parties démétallisées ne sont pas symétriques d'une électrode à l'autre. Il n'y a pas de traces visibles de perforation des films. Aucun signe de fusion n'a été relevé au microscope optique. En revanche, des variations dans l'intensité de la teinte de la métallisation sont observées. Elles n'étaient pas présentes initialement (cf. figure 3-4) et sont particulièrement présentes près des zones démétallisées. C'est une preuve que la perte de métallisation a été progressive. La surface des électrodes a été détruite couche par couche. Plus la quantité de métallisation est forte en un point, plus sa teinte est foncée, voire noire. Si l'oxydation attaque l'électrode sur son épaisseur, elle s'éclaircit peu à peu avec le remplacement des éléments métalliques par leur forme oxydée. Elle apparaît alors grise jusqu'à sa disparition complète. Les auto-cicatrisations, elles, subliment complètement et instantanément l'électrode au point d'impact et l'électrode n'arbore pas une teinte faiblement grisâtre.

Toutes ces observations montrent que la corrosion est la principale cause de défaillance. Si des auto-cicatrisations ont eu lieu, leur proportion est insignifiante par rapport à celle de la corrosion. Cette conclusion est cohérente avec les observations faites aux paragraphes 4.8.1 et 4.8.2. Les formes de courbes sont différentes de celles du chapitre précédent car les mécanismes à l'œuvre sont différents.

Si des tâches symétriques sont présentes sur les films métallisés du fabricant C, aucun signe de décharges électriques n'est visible en leur centre. Lorsqu'une zone transparente, i.e. démétallisée, est présente sur une électrode, la zone symétrique sur l'électrode opposée est plus sombre. Cela indique qu'elle contient plus de métallisation. Ainsi, ces tâches semblent être la conséquence d'un transfert de métallisation d'un film à l'autre qui a eu lieu lors du débobinage du condensateur (cf. paragraphe 3.4.2.1).

Sur la figure 4-28, nous pouvons constater que les zones de corrosions sont de tailles variées. On peut supposer que les plus grandes zones sont le résultat de l'expansion de zones originellement plus petites qui ont fini par se chevaucher. L'humidité a eu le temps de se propager sur toutes les couches des composants, même celles situées en son cœur. Pour les condensateurs des fabricants A et B, la métallisation a été oxydée préférentiellement du côté de la marge des électrodes. Les condensateurs du fabricant C

ne présentent que peu de zones complètement démetallisées. L'oxydation n'a sans doute pas eu le temps de traverser toute l'épaisseur des électrodes. Cela peut être le signe d'une épaisseur initiale de métallisation plus importante ou d'une composition métallique plus résistante à la corrosion.

Au vu de l'état des électrodes du fabricant A, il est compréhensible que la probabilité d'emballlement de ces condensateurs ait été plus faible. La perte « précoce » de leur métallisation a diminué de fait les décharges entre films. Si la distance entre les défauts et les électrodes augmente, la tension nécessaire au claquage augmente elle aussi. Quant aux condensateurs du fabricant C, une épaisseur de métallisation plus importante va de pair avec un processus d'auto-cicatrisation moins efficace. Et comme l'énergie requise pour sublimer l'électrode augmente avec l'épaisseur de la métallisation (cf. équation (1-16)), la probabilité qu'une décharge électrique ne s'auto-élimine pas, augmente aussi, entraînant avec elle un accroissement de la probabilité d'emballlement.

Enfin, il convient de noter que le bord des électrodes du côté du schoopage (à l'opposé de la marge) apparaît encore noir. L'impact de l'oxydation dans cette zone est minime sur le fonctionnement du condensateur en raison de sa plus grande épaisseur (cf. paragraphes 1.2.1 et 3.2.3).

4.9 Discussion sur le phénomène de corrosion

La corrosion attaque la métallisation en la transformant en oxyde. Elle ronge les électrodes sur ses trois dimensions : dans son épaisseur, sa longueur et sa largeur. Pour les condensateurs vieilliss, ses dimensions sont respectivement de l'ordre du nm, du μm ($\sim 50 \text{ nm}$) et du cm ($\sim 2,5 \text{ cm}$). En considérant la présence d'humidité sur chaque surface de la métallisation constituant l'électrode et une vitesse d'oxydation identique en tout point, la perte de l'épaisseur survient en premier. Ainsi, c'est l'oxydation de l'épaisseur qui régit les constantes de temps de la perte de surface des électrodes. Plus l'épaisseur est faible, plus la dégradation par corrosion est rapide.

Le polypropylène étant hydrophobe, il est probable que la diffusion de l'humidité se fasse préférentiellement dans les espaces d'air initialement présents dans le condensateur, c'est-à-dire entre les films métallisés et le long de leur marge. Pour rappel, lors de la fabrication des films métallisés, la marge est formée par manque de dépôt métallique [14]. Un espace d'air équivalent à l'épaisseur des électrodes existe donc à cet endroit par défaut. Ensuite, le processus d'adhésion d'un film métallisé sur l'autre n'est jamais parfait. Selon la pression appliquée lors du bobinage, des bulles d'air plus ou moins grandes peuvent subsister. Les zones des électrodes en contact avec des espaces d'air sont ainsi plus aisément atteints par l'humidité.

Ces hypothèses expliquent que le bord du côté de la marge soit particulièrement touché par la corrosion mais aussi l'existence de points de corrosion aléatoires sur toute la surface des électrodes (cf. figure 4-28).

4.10 Modélisation de l'impact de la corrosion

4.10.1 Hypothèses

De la même façon que dans le paragraphe 3.5.1, la permittivité du diélectrique $\epsilon_0\epsilon_r$ est considérée constante tout au long du vieillissement dans les conditions des essais. Cette hypothèse se justifie par les faibles variations de la permittivité du polypropylène en cas d'humidité ($\sim < 1 \%$) [19] par rapport aux dégradations effectives de la capacité observées dans les paragraphes 4.8.1 et 4.8.2.

La corrosion entraîne une réduction de l'épaisseur des électrodes, ce qui provoque une augmentation de la distance entre électrodes. Cependant, cette augmentation reste très minime par rapport à l'épaisseur du diélectrique. Il convient de rappeler que compte-tenu du principe même de constitution des condensateurs par films métallisés, l'épaisseur du diélectrique est 1000 fois plus grande que l'épaisseur des électrodes. L'impact de la corrosion sur la distance entre électrodes est donc négligeable. De la même façon que dans le paragraphe 3.5.1, l'effet de la pression électrostatique sur le diélectrique est négligé. Ainsi, la distance entre électrodes d est considérée constante.

S'il ne peut pas être prouvé qu'aucune auto-cicatrisation n'a eu lieu lors des vieillissements avec humidité, leur impact sur la capacité est assurément très faible face à la corrosion. La corrosion est donc considérée ici comme le seul mécanisme de vieillissement ayant affecté la capacité des condensateurs pendant les essais.

Par conséquent, en cumulant les hypothèses précédentes, l'équation (3-5) se retrouve vraie ici aussi. La capacité du condensateur ne dépend donc que de la variation de la surface de ses électrodes. Il convient de rappeler que la surface concernée est la surface active des électrodes, celle où sont réellement stockées les charges électriques. Le bord renforcé des électrodes se retrouvant tête-bêche à la marge n'en fait donc pas partie.

Comme discuté précédemment, c'est la croissance de la couche d'oxyde au travers de l'épaisseur de la métallisation qui donne la cinétique de la perte de la surface des électrodes. La fréquence de destruction d'une unité de surface des électrodes touchée par l'humidité est égale à l'inverse de ce temps de croissance. Elle peut également être vue comme une probabilité ou un taux de défaillance.

La vitesse de croissance de la couche d'oxyde est par définition dépendante des mêmes facteurs que la corrosion, i.e. la température, la tension et l'humidité. Elle dépend également des éléments chimiques en jeu : de la composition de l'oxyde à celle des électrodes.

Pour simplifier le modèle, il est supposé ici que pour chaque condensateur, l'épaisseur et la composition métallique de la partie active des électrodes est identique en tout point de leur surface. Il est aussi supposé que la composition ionique de l'eau une fois diffusée est identique en tout point des électrodes et invariante lors des essais. Ainsi, l'équivalence des réactions chimiques est assurée.

Les contraintes appliquées sont fixes tout au long du vieillissement. Elles accélèrent le temps de réaction du processus de corrosion (cf. paragraphe 1.4.2.2). Toutefois, si elles sont présentes de façon uniforme et constante sur toute la longueur des électrodes, la vitesse de réaction sera également constante. C'est le cas de la tension qui s'applique immédiatement sur l'ensemble du condensateur. Les effets de bords ne sont pas considérés ici. La température prend un peu plus de temps à s'homogénéiser du fait des capacités thermiques. Néanmoins, le retard induit est faible par rapport à la durée des essais. Il est de l'ordre de quelques minutes à quelques heures vis-à-vis de plusieurs centaines d'heures pour la durée des essais. Les échauffements locaux pouvant advenir au cours du vieillissement ne sont pas pris en compte. C'est pourquoi, la répartition de la température est considérée homogène et immédiate comme la tension. Nos hypothèses

impliquent que la variation du taux de défaillance des électrodes dépend exclusivement de la diffusion de l'humidité.

4.10.2 Modélisation de la capacité

Tout comme proposé dans le paragraphe 3.5.2, la surface de la partie active des électrodes peut être décomposée en petites unités de surfaces A_i . Cependant, cette fois-ci, une unité de surface correspond à la surface perdue par corrosion.

Notons λ_c , le taux de défaillance d'une unité de surface A_i par corrosion.

De manière analogue à la méthode présentée dans le paragraphe 3.5.2, la fréquence λ_c de la perte des unités A_i peut se relier à l'évolution de la capacité au cours du temps selon l'équation suivante :

$$C(t) = C_0 e^{-\Lambda_c(t)} \quad (4-6)$$

$$\text{avec } C_0 = C(0) \text{ et } \Lambda_c(t) = \int_0^t \lambda_c(t) dt$$

avec C_0 , la capacité initiale.

Il convient de noter que la surface active des électrodes est l'intersection des parties conductrices de la surface active de l'électrode positive et de l'électrode négative. La corrosion attaque les électrodes indépendamment les unes des autres. Au contraire des auto-cicatrisations, la destruction de la surface ne se fait pas symétriquement.

Posons λ_e , la fréquence associée au temps de croissance de la couche d'oxyde à travers l'épaisseur d'une électrode. Il s'agit donc du taux de défaillance d'une unité de surface inférieure ou supérieure par corrosion.

La probabilité d'oxyder une unité de surface A_i notée $P(A_i)$ correspond à la probabilité d'oxyder la surface correspondante sur l'électrode inférieure $P(A_{i_inf})$ ou de celle sur l'électrode supérieure $P(A_{i_sup})$. La probabilité de perdre une unité de surface sur une électrode $P(A_{i_inf})$ étant supposée indépendante de perdre son symétrique sur l'autre $P(A_{i_sup})$, on obtient :

$$P(A_i) = P(A_{i_inf} \cup A_{i_sup}) = P(A_{i_inf}) + P(A_{i_sup}) - P(A_{i_inf}) P(A_{i_sup}) \quad (4-7)$$

$P(A_i)$ correspond à λ_c . $P(A_{i_inf})$ est égale à $P(A_{i_sup})$. Toutes deux correspondent à λ_e . Le principe est illustré sur la figure 4-29. Ainsi, λ_c devient fonction de λ_e selon l'équation suivante :

$$\lambda_c(t) = 2 \lambda_e(t) - \lambda_e(t)^2 \quad (4-8)$$

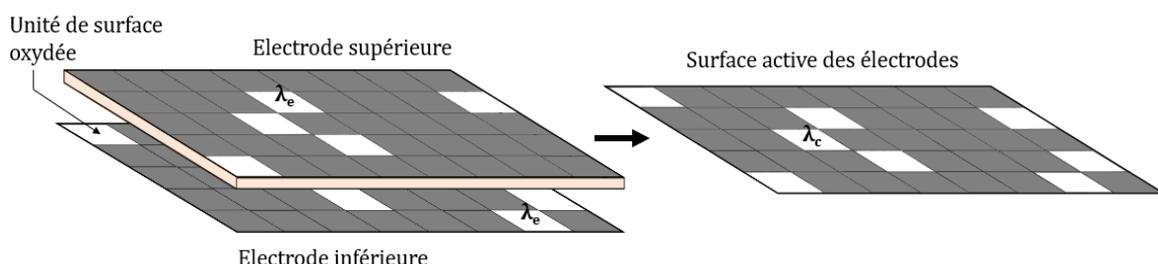


Figure 4-29 : Schéma de principe de l'influence du taux de défaillance d'une unité de surface d'électrode sur son unité correspondante de surface active

Le taux de défaillance d'une unité de surface d'électrode est considéré indépendant de sa position sur l'électrode. La proximité d'une unité A_i avec des espaces d'air comme la marge n'est pas pris en compte. Une fois l'humidité présente au contact de l'électrode, son coefficient de diffusion d'une unité de surface d'électrode à une autre est supposé constant.

Etant donné les hypothèses énoncées plus haut, λ_e (et donc λ_c) varie au cours du temps uniquement à cause de la diffusion de l'humidité. Or, la diffusion de l'humidité possède une composante spatiale. Pour s'en affranchir, il sera considéré que $\lambda_e(t)$ correspond à la moyenne des taux de défaillance de chaque unité de surface d'électrode au cours du temps.

Pour simplifier le modèle, nous considérons que chaque unité de surface d'électrode ne peut être que dans deux états possibles. Soit l'humidité est déjà présente et son taux de défaillance est de λ_{e1} , soit l'humidité extérieure n'a pas encore atteint l'unité de surface d'électrode et son taux de défaillance est λ_{e0} . λ_{e0} n'est pas automatiquement égal à 0 en raison des potentielles impuretés qui se seraient infiltrées lors de l'assemblage des films métallisés ou pendant la période de stockage. En posant $\alpha(t)$ le pourcentage des unités de surface d'électrode avec un taux de défaillance de λ_{e1} , la valeur moyenne $\lambda_e(t)$ s'exprime selon l'équation ci-dessous :

$$\lambda_e(t) = \lambda_{e0} (1 - \alpha(t)) + \lambda_{e1} \alpha(t) \quad (4-9)$$

avec,

$$\alpha(t) = \frac{A_0 - A_{\lambda_{e0}}(t)}{A_0} \quad (4-10)$$

A_0 est la surface initiale de la partie active des électrodes avant vieillissement. $A_{\lambda_{e0}}(t)$ est la surface de la partie active des électrodes ne contenant que les unités de surface avec un taux de défaillance λ_{e0} .

Par définition, $\lambda_{e1} > \lambda_{e0} \geq 0$. La fréquence de destruction des électrodes par corrosion est forcément plus importante avec l'humidité.

Il est supposé que l'humidité se propage de proche en proche en modifiant au fur et à mesure le taux de défaillance des unités de surface de λ_{e0} à λ_{e1} . Ainsi, la diffusion de l'humidité est comparable par analogie à la propagation d'une épidémie. Dans les deux cas, il y a une contamination de proche en proche et la population est finie. Le modèle de propagation de type SI (Sains-Infecteds) devient applicable à la situation. Il s'agit d'un modèle ne considérant qu'un individu ne peut se retrouver que dans deux états : sain ou infecté. Une fois infecté, aucune guérison n'est possible.

Par analogie, la population saine est la surface $A_{\lambda_{e0}}(t)$. La population infectée est la surface $A_{\lambda_{e1}}(t) = A_0 - A_{\lambda_{e0}}(t)$. Le taux de contagion est assimilé au taux de diffusion de l'humidité noté β . Ainsi :

$$\frac{dA_{\lambda_{e0}}(t)}{dt} = -\beta A_{\lambda_{e0}}(t)(A_0 - A_{\lambda_{e0}}(t)) \quad (4-11)$$

$$\Rightarrow \frac{d(1-\alpha(t))}{dt} = -\beta A_0 \alpha(t) (1 - \alpha(t)) \quad (4-12)$$

En résolvant l'équation (4-12) et en la combinant avec l'équation (4-9), λ_e s'exprime ainsi :

$$\lambda_e(t) = \lambda_{e0} + \frac{\lambda_{e1} - \lambda_{e0}}{1 + D e^{-\beta A_0 t}} \quad (4-13)$$

où, $D = \frac{1 - \alpha(0)}{\alpha(0)}$. Comme β et A_0 sont des constantes, il sera posé par la suite $\beta' = \beta A_0$.

En théorie, à $t=0$, toutes les unités de surface des électrodes ont un taux de défaillance λ_{e0} . Ainsi $\alpha(0) = 0$, D est infini. D peut être assimilé au facteur de translation de la fonction sigmoïde, définie sur $]-\infty, +\infty[$, pour la ramener sur le domaine de définition $[0, +\infty[$. Cependant, poser que D est infini rend l'équation (4-13) inutilisable et l'équation (4-12) insoluble en restant dans les domaines de définition des fonctions rencontrées. Pour résoudre rigoureusement l'équation (4-12) et garder une cohérence avec la réalité physique du phénomène de corrosion, $\alpha(0)$ doit être approximé à une valeur très proche mais néanmoins différente de 0. Dans la suite du manuscrit, $\alpha(0)$ sera fixé à 0,01% et $D \approx 10\,000$.

En implémentant la formulation de $\lambda_e(t)$ de l'équation (4-13) dans l'équation (4-8), l'intégrale de λ_c devient :

$$\begin{aligned} \Lambda_c(t) = & (2 \lambda_{e0} - \lambda_{e0}^2) t + \frac{(\lambda_{e1} - \lambda_{e0})}{\beta'} 2 (1 - \lambda_{e0}) [\ln(D + e^{\beta' t}) - \ln(D + 1)] \\ & - \frac{(\lambda_{e1} - \lambda_{e0})^2}{\beta'} \left[-\frac{1}{1 + D e^{-\beta' t}} + \ln(D + e^{\beta' t}) + \frac{1}{(1 + D)} - \ln(D + 1) \right] \end{aligned} \quad (4-14)$$

Ainsi, l'équation (4-6) est définie. Seulement trois coefficients sont à connaître : λ_{e0} , λ_{e1} et β' . Par définition, ils sont tous positifs.

Si on considère qu'il n'y a pas d'humidité au début du vieillissement, $\lambda_{e0} = 0$. L'expression de la capacité se simplifie alors :

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{2 \lambda_{e1}}{\beta'} [\ln(D + e^{\beta' t}) - \ln(D + 1)]} e^{\frac{\lambda_{e1}^2}{\beta'} \left[\ln(D + e^{\beta' t}) - \ln(D + 1) - \frac{1}{1 + D e^{-\beta' t}} + \frac{1}{1 + D} \right]} \quad (4-15)$$

Physiquement, λ_{e1} pourrait être déterminé en amont avec la connaissance exacte de l'épaisseur des électrodes et sa composition (cf. paragraphe 1.4.2.2). Une vérification de la pertinence du modèle serait de calculer la valeur théorique de λ_{e1} et de la comparer aux valeurs obtenues par identification de l'équation (4-15).

4.11 Evaluation du modèle de vieillissement par corrosion

4.11.1 Ajustement avec les données de vieillissement en tension, température et humidité

Afin d'identifier les paramètres de l'équation (4-15), le même algorithme d'optimisation que celui présenté dans le paragraphe 3.6 est utilisé. Le critère à optimiser reste la MSE (Mean Square Error).

Les résultats de l'ajustement de la fonction sont présentés sur la figure 4-30 pour six condensateurs. Ils ont été sélectionnés de manière à représenter la diversité des formes des courbes et d'en avoir au moins un par essai et par fabricant.

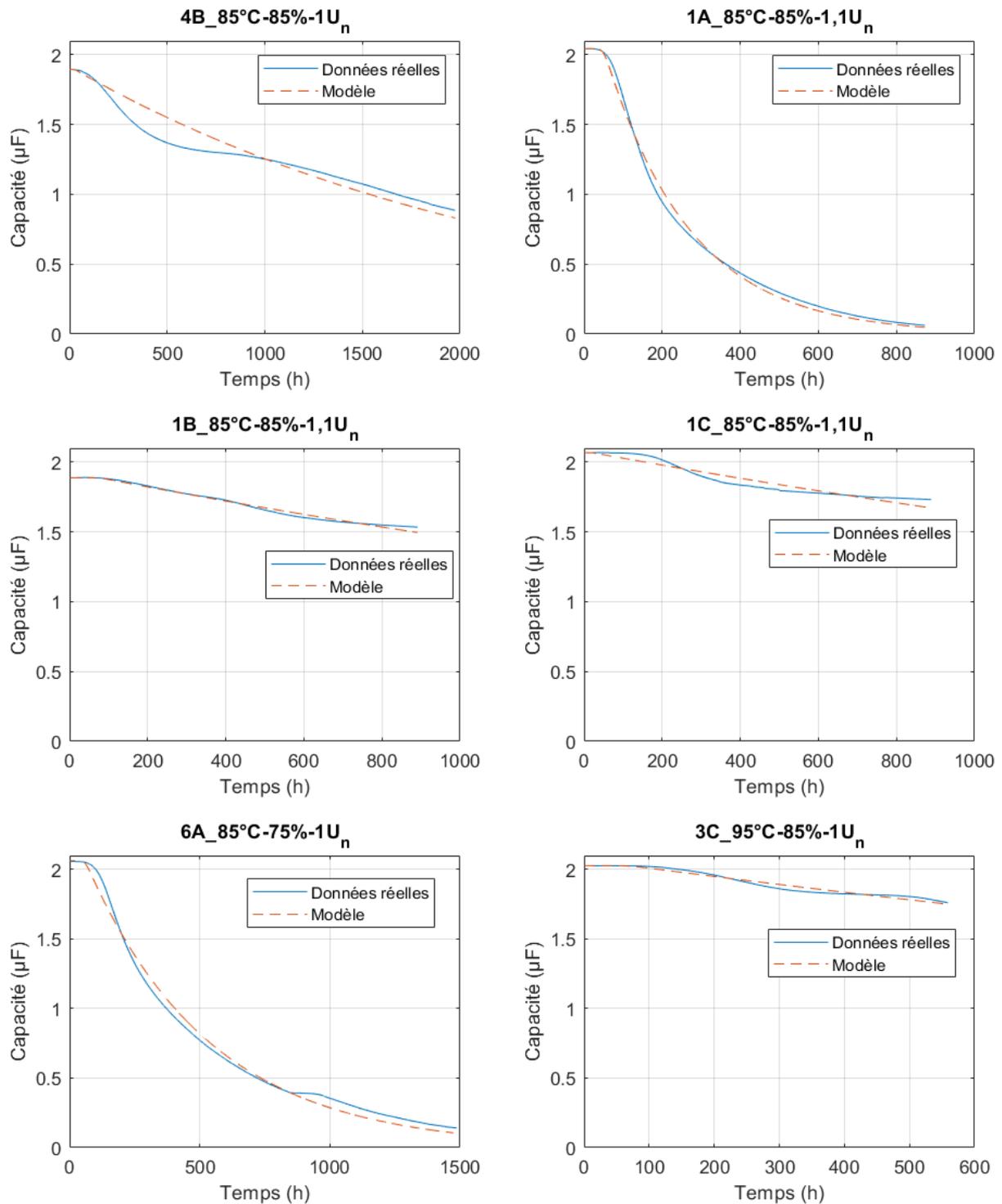


Figure 4-30 : Ajustement du modèle sur les données de condensateurs représentatifs du comportement général sur l'ensemble des essais

Les résultats sont plutôt pertinents dans l'ensemble. La détérioration des condensateurs du fabricant A est particulièrement bien reproduite.

Cependant, il existe des différences notables au début de la dégradation des condensateurs entre le modèle et les données. Certaines courbes comportent un palier intermédiaire qui n'est pas prévu par le modèle : elles se stabilisent à une valeur qui n'est ni la capacité initiale, ni $0 \mu\text{F}$. Le condensateur 4B de l'essai $85^\circ\text{C}-85\%-1U_n$ en est un bon exemple.

Une partie des disparités pourrait venir du fait que l'épaisseur de la partie active des électrodes n'est en réalité pas uniforme. Le profil des électrodes pourrait être de forme triangulaire. Comme explicité au paragraphe 1.2.1, les fabricants jouent spécifiquement sur l'épaisseur de la métallisation pour améliorer les performances des condensateurs. Il faudrait donc connaître le profil précis de la métallisation des électrodes pour améliorer le modèle proposé.

Cependant, les fabricants partagent peu cette information pour des raisons de confidentialité. Il est aussi possible que certaines hétérogénéités viennent du processus de fabrication en lui-même. L'ordre de grandeur de l'épaisseur des électrodes, le nm, rend leur homogénéisation ardue à atteindre. Enfin, s'il reste possible de mesurer l'épaisseur d'un film métallisé en débobinant un condensateur, en pratique la mesure est peu accessible et coûteuse. Elle requiert par ailleurs des instruments de mesure avec une forte précision pour mesurer des épaisseurs de l'ordre du nm.

Une autre hypothèse, non exhaustive, serait de remettre en question la constance du coefficient de diffusion de l'humidité β . La diffusion n'est sans doute pas homogène sur toute la zone des électrodes. Comme observé sur les films et discuté dans le paragraphe 4.9, l'humidité atteint plus rapidement certaines zones spécifiques des électrodes comme les bords adjacents aux marges. La variation de la diffusion de l'humidité du fait de changement de milieu entre l'air et les films serait donc à prendre en compte.

4.11.2 Extrapolation à visée prédictive

L'objectif de l'obtention d'une loi de vieillissement est de pouvoir l'utiliser afin de prédire l'évolution des données. Comme pour le chapitre précédent, il est nécessaire d'évaluer la portée prédictive du modèle.

Ici, pour ajuster le modèle, l'identification des paramètres a été effectuée pour une dégradation de la capacité de 2 %, 7 % et enfin 12 %. La dernière mesure prise en compte est indiquée respectivement par un marqueur jaune, violet et rose sur la figure ci-dessous.

Les ajustements obtenus sont affichés sur la figure 4-31 et sont comparés aux mesures réelles et à l'ajustement du modèle sur la totalité des mesures.

On observe d'abord que les prédictions sont majoritairement de la forme des courbes.

La dégradation de la capacité n'est pas encore assez avancée à 2 % pour donner de bons résultats. Les résultats sont bien meilleurs à 12 %. L'extrapolation de l'évolution des condensateurs $1A_{85^\circ\text{C}-85\%-1,1U_n}$, $1B_{85^\circ\text{C}-85\%-1,1U_n}$ et $6A_{85^\circ\text{C}-75\%-1,1U_n}$ donne des estimations assez justes.

L'erreur de prédiction de la dernière mesure du condensateur $1A_{85^\circ\text{C}-85\%-1,1U_n}$ est de $0,05 \mu\text{F}$ (2,3 % de C_0) pour un horizon de prédiction de 784 h sachant que la capacité a chuté de 85 %. L'erreur est encore plus basse pour le condensateur $6A_{85^\circ\text{C}-75\%-1,1U_n}$, $0,02 \mu\text{F}$ (1% de C_0) pour un horizon de 1340 h.

Pour le condensateur $1B_{85^\circ\text{C}-85\%-1,1U_n}$, l'ajustement à 7 % donne les mêmes résultats que celui à 12 %. L'erreur de prédiction à 20 % est de $0,05 \mu\text{F}$ (2,6 % de C_0).

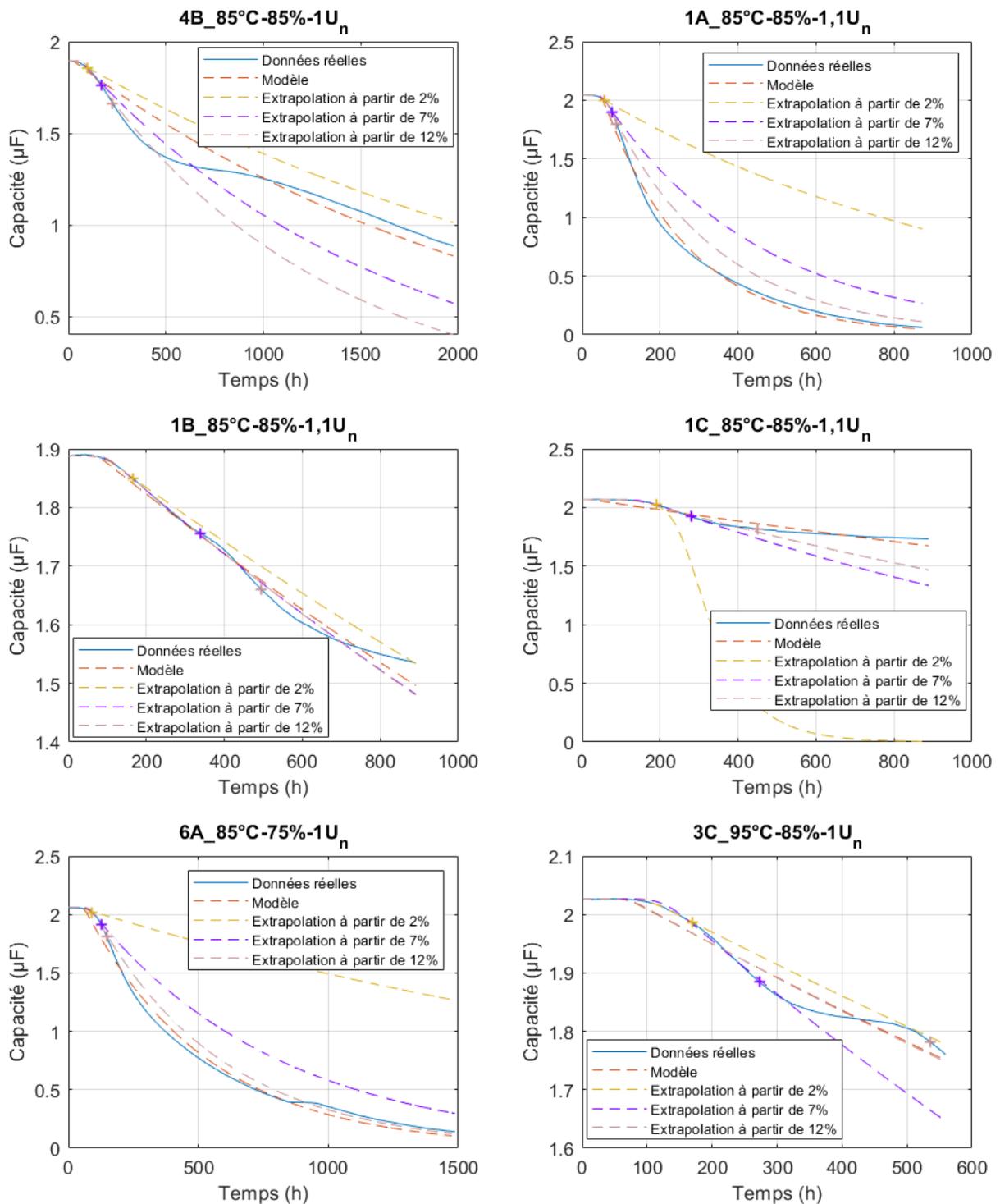


Figure 4-31 : Extrapolation du modèle à visée prédictive pour différents condensateurs

Cependant, les prédictions sont questionnables pour les courbes comportant un plateau intermédiaire comme le condensateur 4B_85°C-85%-1U_n. De ce fait, un ajustement du modèle sur les premiers 2 % de pertes de la capacité donne un meilleur résultat qu'un ajustement sur les premiers 12 %. La dégradation de la capacité ayant lieu en deux temps, une identification des paramètres au creux du premier coude de dégradation, avant le

palier intermédiaire, entraîne inévitablement une estimation beaucoup trop basse de la capacité. La dégradation des condensateurs 1C_85°C-85%-1U_n et 3C_95°C-85%-1U_n n'ayant pas atteint les 20 %, la prédiction donnée par notre modèle ne peut pas être totalement évaluée sur ces condensateurs. Leurs courbes de dégradations possédant un plateau intermédiaire, la prédiction à 12 % pour l'un et à 7 % pour l'autre ne semble pas pertinente à première vue.

Ces résultats confirment que notre modèle n'est pas capable de reproduire tous les stades possibles de la dégradation par la corrosion. Il n'est pas capable de modéliser une chute de la capacité en deux temps, moyennant des plateaux intermédiaires. En revanche, plus les dégradations sont avancées, plus il devient pertinent. Il donne d'excellents résultats sur certains types de condensateurs, comme ceux du fabricant A.

4.11.3 Comparaison avec les modèles existants

4.11.3.1 Comparaison entre les ajustements

Comme dans le chapitre précédent, le modèle (4-15) est confronté aux fonctions de la littérature présentées dans les paragraphes 2.3.2 à 2.3.4.

Les premières sont les équations proposées pour décrire l'évolution de la capacité face à la corrosion : l'équation (2-14) notée Exp⁺ et l'équation (2-20), une fonction puissance, notée Psn. L'équation (2-18) n'a pas été ajoutée. A cause de son intégrale, son identification était longue et coûteuse en ressources numériques et produisait au premier abord des résultats incohérents.

La fonction (2-33), Exp⁻, est aussi évaluée. Elle peut correspondre à la troisième phase : la décélération de la dégradation jusqu'à un plateau.

Ensuite, il est possible de faire d'autres hypothèses quant à la forme du taux de défaillance $\lambda_c(t)$ (cf. équation (4-6)). Les lois les plus utilisées dans l'étude des défaillances demeurent la loi exponentielle et la loi de Weibull. C'est pourquoi, les équations (3-24) et (3-25), respectivement I_{Exp} et I_{Weibull}, restent pertinentes. Elles sont donc aussi testées.

Enfin, il convient de comparer toutes ces fonctions à des fonctions usuelles pour décrire la forme des courbes : cela est réalisé grâce à une fonction polynômiale du troisième ordre notée Poly₃ et une fonction sigmoïde, notée Sigm, définie par l'équation suivante :

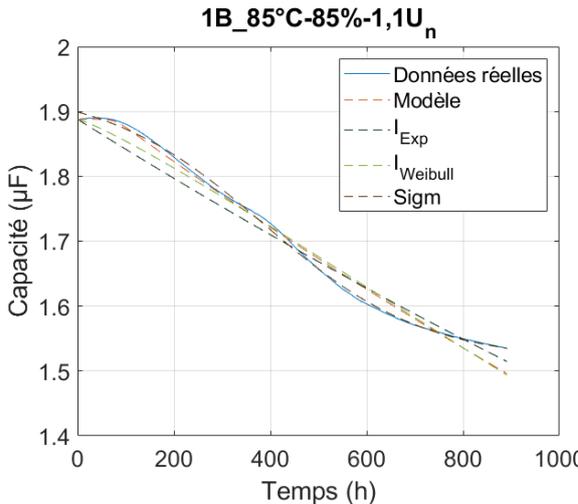
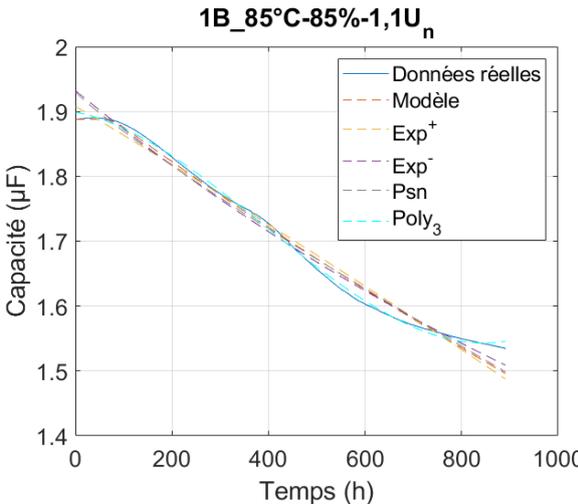
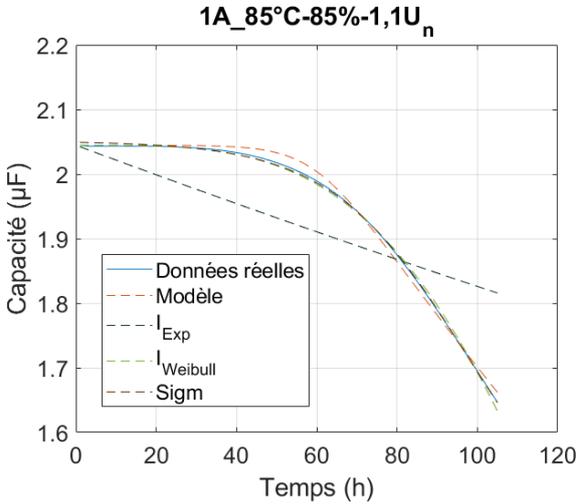
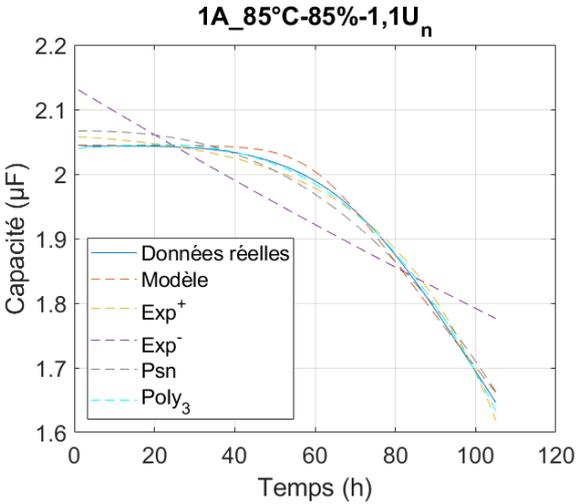
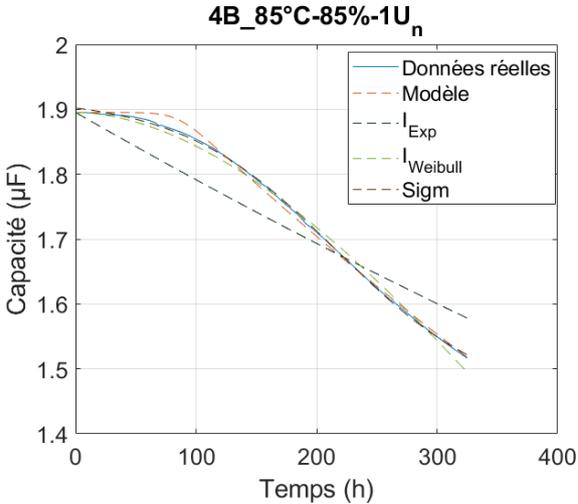
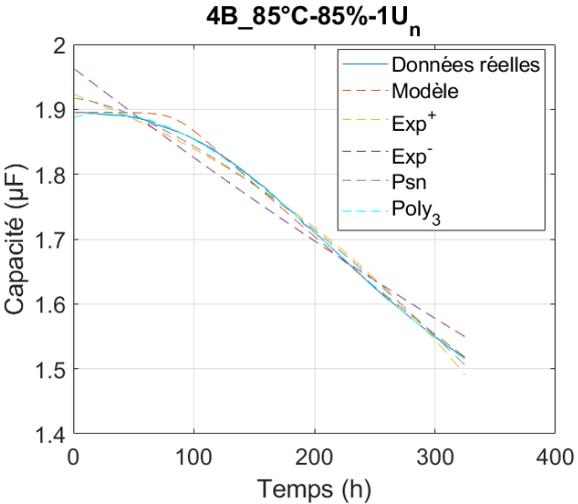
$$C(t) = A_7 - \frac{1}{B_7 + E_7 e^{-F_7 t}} \quad (4-16)$$

avec A₇, B₇, E₇ et F₇ des constantes positives.

Les fonctions polynômiales du 1^{er} et 2nd ordre, ne sont pas évaluées. Bien qu'elles possèdent un nombre de coefficients égal aux modèles (4-6) et (4-15), les courbes ne suivent ni le tracé d'une parabole ni celui d'une droite. Elles sont donc inadaptées. Toutes les équations sont récapitulées dans le tableau 4-5.

De façon analogue au le chapitre précédent, sur l'ensemble des essais en température, tension et humidité, la moyenne des MSE du meilleur ajustement de chaque condensateur a été calculée pour chaque fonction. Cependant, ici, deux ajustements ont été effectués. Le premier considère uniquement les dégradations jusqu'au premiers 20 % de perte de capacité, le seuil de fin de vie usuel. Le second prend en compte la totalité des données

disponibles. Les résultats sont illustrés respectivement sur la figure 4-32 et la figure 4-33 indiqués dans le tableau 4-5.



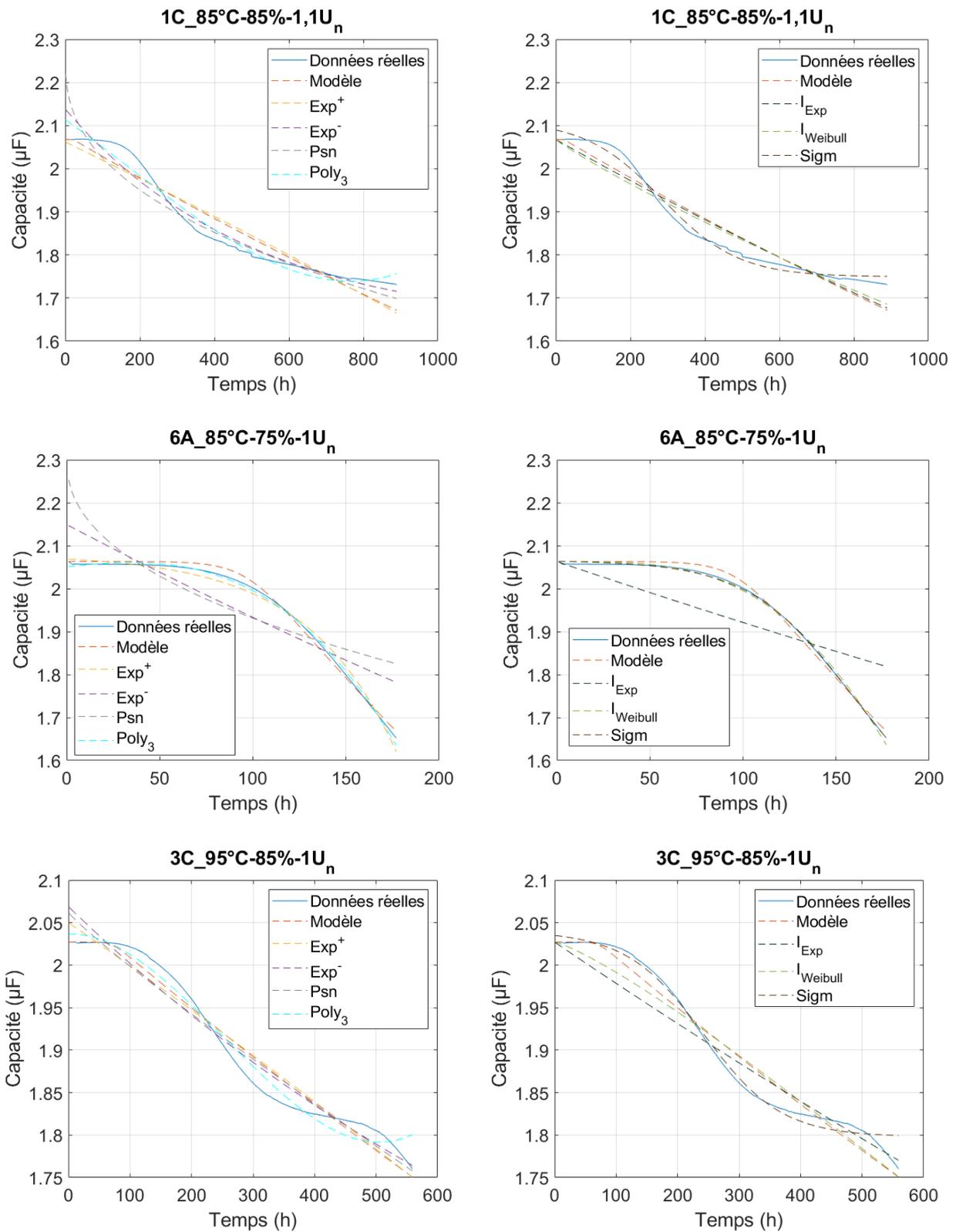


Figure 4-32: Ajustement des équations du tableau 4-5 jusqu'au premiers 20 % de pertes de la capacité de quelques condensateurs représentatifs

Les condensateurs 1B_85°C-85%-1,1U_n, 1C_85°C-85%-1,1U_n et 3C_95°C-85%-1U_n n'ont pas été représentés sur la figure 4-33 car ils n'ont pas dépassé le seuil de 20 % de pertes de leur capacité pendant leur vieillissement.

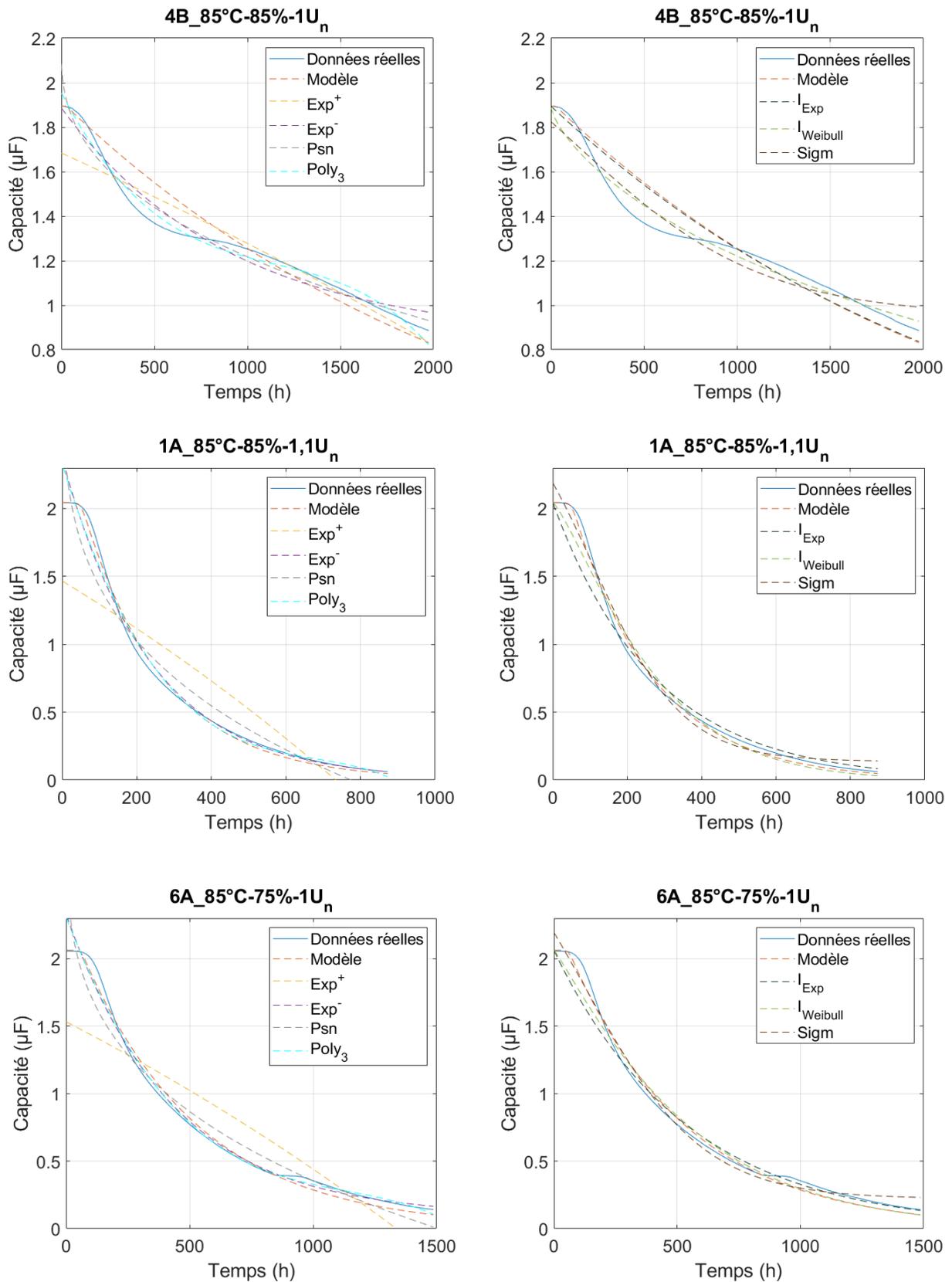


Figure 4-33 : Ajustement des équations du tableau 4-5 sur l'évolution de la capacité de quelques condensateurs représentatifs.

Nom	Réf- rence	Equations et nombre de paramètres associés	MSE (nF)		
			20 %	Totale	
Exp ⁺	(2-14)	$C(t) = A_1 - B_1 e^{-D_1 t}$	3	0,41	27,8
Exp ⁻	(2-33)	$C(t) = A_2 + B_2 e^{-D_2 t}$	3	1,6	7,0
Psn	(2-20)	$C(t) = A_3 - B_3 t^{D_3}$	3	1,6	9,7
Poly ₃		$C(t) = A_4 t^3 + B_4 t^2 + E_4 t + F_4$	4	0,07	2,2
I _{Exp}	(3-24)	$C(t) = C_0 e^{-\lambda_5 t}$	1	2,8	15,0
I _{Weibull}	(3-25)	$C(t) = C_0 e^{-\left(\frac{t}{\beta_6}\right)^{m_6}}$	2	0,25	4,6
Sigm	(4-16)	$C(t) = A_7 - \frac{1}{B_7 + E_7 e^{-F_7 t}}$	4	0,09	1,3
Modèle	(4-15)	$C(t) = C_0 e^{\left[\frac{\lambda_{e1}^2}{\beta^7} - \frac{2\lambda_{e1}}{\beta^7}\right] [\ln(D + e^{\beta^7 t}) - \ln(D+1)]} e^{\frac{\lambda_{e1}^2}{\beta^7} \left[-\frac{1}{1+D e^{\beta^7 t}} + \frac{1}{1+D}\right]}$	2	0,32	4,4

Tableau 4-5 : Erreur quadratique moyenne de l'ajustement des fonctions testées

Sans surprise, les meilleurs résultats sont pour les fonctions Sigm et Poly₃ qui possèdent le plus de degrés de liberté. Pour un nombre de coefficient équivalent ou inférieur, notre modèle (4-15) et la fonctions I_{Weibull} font mieux que les fonctions Exp⁺, Exp⁻ et Psn, présentées dans la littérature.

Les inexactitudes de notre modèle (4-15) le rendent moins bon que I_{Weibull} sur les premiers 20 % de perte de la capacité. En prenant en compte l'ensemble des dégradations, notre modèle est meilleur.

Ainsi, il semble plus judicieux d'approximer le taux de défaillance par une loi de Weibull si on ne s'intéresse qu'aux premiers 20 % de perte de capacité.

Cependant, au contraire de notre modèle (4-15), I_{Weibull}, tout comme les équations Exp⁺, Exp⁻ et Psn, ne peuvent pas à la fois représenter l'accélération et la décélération des dégradations. Ainsi, il faut remarquer que la forme de I_{Weibull} varie grandement au fur et à mesure des identifications. Lors des ajustements sur les premiers 20 %, son coefficient m₆ (3-25) est supérieur à 1. I_{Weibull} décrit une dégradation qui s'accélère. Mais, si la totalité des dégradations jusqu'à 0 μF est considéré, le coefficient m₆ (3-25) est inférieur à 1. I_{Weibull} décrit une dégradation qui décélère. Notre modèle (4-15) est donc moins sujet aux changements de formes.

4.11.3.2 Comparaison entre les prédictions

Il convient maintenant d'évaluer la portée prédictive des équations s'étant le mieux ajustées aux données. L'identification de leurs paramètres est alors effectuée sur les 7 premiers % de dégradation de chaque condensateur. Cela correspond à 1/3 de leur durée de vie usuelle. Les modèles ajustés ont ensuite été comparées aux données sur les 20 premiers % de dégradation, puis sur leur totalité. La moyenne des MSE obtenues est présentée dans le tableau suivant. Les erreurs étant plus conséquentes, elles sont cette fois affichées en μF.

Nom	Réf- rence	Equations	MSE (μF)	
			20%	Totale
Poly ₃		$C(t) = A_4 t^3 + B_4 t^2 + E_4 t + F_4$	6,300	$> 10^3$
Sigm	(4-16)	$C(t) = A_7 - \frac{1}{B_7 + E_7 e^{-F_7 t}}$	0,050	$> 10^3$
IWeibull	(3-25)	$C(t) = C_0 e^{-\left(\frac{t}{\beta_6}\right)^{m_6}}$	0,074	0,276
Modèle	(4-15)	$C(t) = C_0 e^{\left[\frac{\lambda_{e1}^2}{\beta^2} - \frac{2\lambda_{e1}}{\beta^2}\right] [\ln(D+e^{\beta^2 t}) - \ln(D+1)]} e^{\frac{\lambda_{e1}^2}{\beta^2} \left[-\frac{1}{1+D e^{-\beta^2 t}} + \frac{1}{1+D}\right]}$	0,007	0,057

Tableau 4-6 : Etude de la portée prédictive des fonctions. Identification à 7% de dégradations

Cette fois-ci, notre modèle (4-15) donne les meilleurs résultats. On s'aperçoit que les excellents ajustements des équations Poly₃ et Sigm ne sont pas robustes. Leur MSE totale est beaucoup trop haute ($> 10^3$). Comme attendu, la fonction IWeibull perd en pertinence. Une identification faite dans la phase d'accélération ne pourra pas prédire la phase de décélération.

Ainsi, selon les besoins, il pourra être utile d'utiliser soit notre modèle (4-15), soit IWeibull. Toutefois, pour une utilisation à des fins prédictives, notre modèle reste meilleur. Au vu des résultats de cette étude, notre modèle est donc validé.

4.12 Généralisation du modèle de vieillissement

Pendant le fonctionnement des condensateurs en conditions standards, il est possible que les deux mécanismes de dégradations que sont les auto-cicatrisations et la corrosion se côtoient. Comme une unité de surface active détruite par la corrosion ne pourra pas l'être par une auto-cicatrisation, la surface des électrodes active peut se décomposer de la façon suivante :

$$A = A_a + A_c \quad (4-17)$$

avec A , la surface active totale des électrode, A_a la surface active des électrode affectée par les auto-cicatrisations et A_c , la surface active des électrodes affectée par la corrosion.

En reprenant toutes les hypothèses faites dans les paragraphes 3.5.1 et 4.10.1, la capacité d'un condensateur s'exprime donc ainsi :

$$C(t) = C_a(t) + C_c(t) \quad (4-18)$$

avec C_a la capacité perdue à cause des auto-cicatrisations et C_c , la capacité perdue par la corrosion. Ainsi :

$$C(t) = C_{0a} e^{-\Lambda_a(t)} + C_{0c} e^{-\Lambda_c(t)} \quad (4-19)$$

$$\Lambda_a(t) = \int_0^t \lambda_a(t) dt \quad \text{et} \quad \Lambda_c(t) = \int_0^t \lambda_c(t) dt$$

avec $C_{0a} = C_a(0)$, $C_{0c} = C_c(0)$, λ_a le taux de défaillance lié à une auto-cicatrisation et λ_c le taux de défaillance lié à la corrosion défini dans les paragraphes 3.5.1 et 4.10.2 .

C_{0a} n'étant pas connu, c'est donc un paramètre de plus à identifier. C_{0c} peut alors être déduite à partir de C_0 , la capacité initiale car $C_{0a} + C_{0c} = C_0$.

Les conditions de vieillissement impactent la prédominance d'un mécanisme sur un autre et leur taux de défaillance respectif. Toutes les lois proposées dans ce manuscrit (équations (3-13), (4-15) et (4-19)) ont l'avantage de s'affranchir de la connaissance en amont des caractéristiques de chaque condensateur comme l'épaisseur et la composition des électrodes ou la qualité d'isolement et l'imperméabilité du diélectrique. Les taux de défaillance λ_a et λ_c sont calculés par identification tout au long du vieillissement. Il conviendra à des travaux futurs d'évaluer les prédictions données par ces lois dans d'autres environnement de test, sur de plus longues durées de vieillissement et de les améliorer si besoin.

Conclusion

Quatre essais de vieillissement accélérés en température, humidité et tension ont été menés sur 21 condensateurs. L'objectif premier était d'observer des emballements thermiques. Il a été atteint. Plusieurs emballements ont été constatés. En lien avec cet objectif initial, de nombreux indicateurs de santé ont été surveillés tout au long du processus de vieillissement. Le courant, la tension, la température ont été mesurés en temps réel. Ils ont permis le calcul de la phase de l'impédance, de la puissance active et d'approximer la capacité. L'impédance réelle des condensateurs a pu être évaluée périodiquement grâce à la mesure de la résistance d'isolement, de la capacité et la résistance de la métallisation. Le comportement de ces indicateurs durant les emballements a révélé les conclusions suivantes :

1. Des emballements peuvent avoir lieu sur des condensateurs dont la capacité n'a pas dépassé les seuils usuels de fin de vie.
2. Les signatures des emballements sont la croissance du déphasage et un pic de puissance active.
3. Aucun court-circuit n'a été observé. Au contraire, un emballement peut avoir lieu sans accroissement du courant efficace.
4. L'emballement induit une montée de température au sein du condensateur. Cependant sa détection par la mesure de la température du boîtier du condensateur est tardive. Elle ne permet donc pas d'éviter le phénomène.
5. La durée d'un emballement est de l'ordre de la minute.
6. Un emballement peut en cacher un autre, tant qu'un courant subsiste dans le condensateur.
7. Limiter la montée de puissance active permet de réduire la quantité de fusion du diélectrique.
8. Mettre hors-tension les condensateurs interrompt le processus d'emballement.

Une analyse approfondie des résultats a permis de mieux comprendre le processus :

9. La présence de puissance active est due à la chute de la résistance du diélectrique.
10. Le phénomène s'entretient par la fusion du diélectrique. Des espèces chimiques ionisées sont créés.
11. L'emballement a pour effet d'augmenter la résistance de la métallisation. Il semble provoquer la sublimation des électrodes. Ainsi, à terme, l'emballement tend à s'interrompre de lui-même.

Le claquage thermique est caractérisé par le changement d'état électrique du condensateur. Il devient progressivement résistif pour finir en circuit ouvert à la fin du processus. Nos résultats ne permettent pas pour autant d'empêcher l'arrivée d'un emballement. Ils permettent seulement une détection précoce. Sur cette base, des méthodes peuvent être mises au point pour empêcher les dommages collatéraux d'un emballement. Certaines seront développées dans le chapitre suivant.

Les meilleurs indicateurs sont la croissance de la puissance active et de la phase de l'impédance. En plus de posséder l'avantage d'être non-intrusive et d'être réalisable pendant le fonctionnement du condensateur, leur mesure est facile à implémenter. Il suffit

d'un capteur de tension et d'un capteur de courant correctement placés. Ces capteurs sont déjà présents dans la plupart des convertisseurs d'énergie.

Le courant n'est pas un bon indicateur. Ses variations en début d'emballlement sont trop faibles.

En théorie, la température et la résistance du diélectrique devraient être de bons indicateurs. Cependant, en pratique, une mesure précise, non intrusive, sans impacter le fonctionnement du condensateur est difficile. La température nécessite d'être mesurée au cœur du condensateur. Une mesure de la température du boîtier induit un retard qui ne permet pas d'éviter l'emballlement. La mesure de la résistance du diélectrique nécessite quant-à-elle l'application d'une tension DC de durée contrôlée à intervalle régulier aux bornes du condensateur. Outre, les problématiques rencontrées lors de mesures statiques hors fonctionnement, un tel dispositif est difficilement envisageable sur un condensateur en fonctionnement au sein de son système électronique.

Le claquage thermique est profondément lié à la dégradation du diélectrique. Plus les contraintes subies par le condensateur sont élevées, plus le diélectrique se fragilise et plus la probabilité d'emballlement augmente. Si les effets de la température et de la tension sur le diélectrique sont étudiés dans la littérature, c'est moins le cas de l'humidité. Nos résultats montrent que c'est un facteur très aggravant. Elle augmente considérablement les risques d'emballlement.

Il conviendrait d'étudier dans des travaux futurs, la synergie de ces trois contraintes sur la conductivité du diélectrique. La prédiction du phénomène d'emballlement reste à être déterminée. Egalement, la compréhension des phénomènes physiques de dégradation du polymère pendant l'emballlement pourrait aussi être approfondie. A la suite de nos résultats, beaucoup d'hypothèses ont été proposées et partiellement démontrées. Parmi elles, il y a l'origine des déconnexions partielles et le rétablissement de la résistance d'isolement après une mise hors-tension et une baisse de la température.

Le second objectif consistait à suivre le vieillissement par dérive des condensateurs sous des contraintes fixes en humidité, tension et température. Il a pu être réalisé grâce aux mesures en temps réels. Une analyse post-mortem a démontré que la corrosion était le principal mécanisme de défaillance de ces essais. Sur la base de ces constatations et en utilisant des hypothèses explicites, un modèle a été développé pour évaluer la dégradation de la capacité due à la corrosion. Les résultats obtenus sont cohérents avec les données expérimentales. Il a été comparé aux autres modèles de la littérature puis validé. Malgré tout, quelques-unes de ces limites ont été identifiées. Notamment, des divergences avec les données réelles sont quelques fois observées en début de dégradation. Les hypothèses de l'invariabilité du coefficient de diffusion ou de l'homogénéité des électrodes peuvent alors être remises en cause.

Dans des travaux futurs, il conviendrait d'améliorer le modèle et d'évaluer sa robustesse face à d'autres types de condensateurs à films métallisés ainsi que sur des durées plus longues de vieillissement. Bien évidemment, il reste également à utiliser les résultats défendus dans ces travaux pour progresser dans la résolution du défi de l'estimation de la durée de vie utile restante en fonctionnement réel sous des contraintes variables.

Chapitre 5 Méthodes de prévention des défaillances catalectiques par claquage thermique

5.1 Principe de la méthode de prévention

5.1.1 Détection précoce

Nous nous sommes appuyés sur les observations détaillées dans le chapitre précédent et les connaissances bibliographiques présentées au chapitre 1, pour développer une méthode afin de prévenir les scénarios catastrophiques à la suite d'un emballement.

Comme cela a été précédemment exposé, le risque d'explosion et d'incendie est due à la production de gaz inflammables lors de la destruction du diélectrique. L'emballement réunit les conditions permettant leur émanation en quantité. Ces gaz deviennent dangereux quand leur concentration dépasse le seuil inférieur d'explosivité.

Mettre hors-tension un condensateur permet d'arrêter le processus d'emballement. Au plus tôt il est interrompu, moindre est la fonte du diélectrique et la production de gaz.

Ainsi, si l'emballement est détecté et interrompu précocement, le seuil inférieur d'explosivité ne sera pas atteint (cf. paragraphe 1.4.4.3). Il s'agit de limiter l'énergie dissipée dans le diélectrique, i.e. limiter la puissance active absorbée et la durée d'exposition. Il devient alors possible d'éviter les explosions et les départs de feu.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les brusques variations de la puissance active et de la phase de l'impédance peuvent être retenues comme les premiers signes d'un emballement. Nous pouvons donc proposer une méthode de prévention des défaillances catalectiques par claquage thermique qui consiste à surveiller ces indicateurs tout long de la vie des condensateurs. S'ils dépassent un seuil critique, inusuel lors d'un fonctionnement classique, l'emballement est confirmé. Un système de protection approprié doit s'enclencher et déconnecter le condensateur de son alimentation. La réponse doit être suffisamment rapide pour éviter que le processus dégénère.

5.1.2 Seuils limites des indicateurs d'emballement

L'énergie minimale requise pour déclencher un emballement est complexe à déterminer. Il est plus simple de déterminer des seuils critiques de puissance active et de faire en sorte que les protections se déclenchent rapidement. C'est pourquoi, cette approche sera privilégiée ici.

Il existe ensuite plusieurs méthodes pour déterminer ces seuils critiques.

La première est théorique. En cas d'emballement, il peut être supposé que la puissance active dissipée P soit uniquement due aux pertes de la résistance du diélectrique R_{is} , $P = \frac{U^2}{R_{is}}$. En connaissant la conductivité limite du diélectrique σ_b (cf. équation (2-41)), la puissance limite supportable par le diélectrique avant sa fonte se déduit alors de l'équation (2-42) :

$$P_{lim} = 4 \frac{\kappa \varepsilon_0 \varepsilon_r}{d d_{th}^2} A U^2 \approx 4 \frac{\kappa}{d_{th}^2} C U^2 \quad (5-1)$$

avec $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ la constante diélectrique du polypropylène, d l'épaisseur du diélectrique, d_{th} la distance traversée par le flux de chaleur, κ la diffusivité thermique du diélectrique, A la surface du diélectrique en contact avec la métallisation, C la capacité et U la tension aux bornes du condensateur.

En pratique, cette équation est inutilisable car d_{th} est inconnue. Avec l'hypothèse que $d_{th} = d$, P_{lim} est de l'ordre du millier de watt à tension nominale en utilisant les valeurs initiales de nos condensateurs (cf. paragraphe 3.1.2 et 3.2.3). Ce résultat est incohérent avec les observations du chapitre 4 où P_{lim} semble être de l'ordre de la dizaine de watt.

De plus, il faut tenir compte de l'influence du vieillissement sur les grandeurs. Si mesurer la capacité est simple, ce n'est pas le cas de κ , dépendant de l'état du diélectrique. De ce fait, il convient d'utiliser d'autres moyens de déterminer ce seuil.

Une deuxième approche consiste à observer expérimentalement quels sont les seuils minimums de puissance et de phase où des emballements ont été constatés. Concrètement, ce sont les valeurs minimales de puissance active et de déphasage corrélées à une fonte du diélectrique. Nos essais nous donnent respectivement les valeurs de 12 W et -67° (cf. paragraphe 4.4.3) pour un emballement. Ces seuils sont confirmés par le comportement d'un condensateur qui a subi une dissipation de puissance de 9 à 11 W pendant 2 minutes sans partir en emballement (cf. figure 4-17). Le déphasage était alors de -77° et diminuait avec le temps vers -90° .

Cependant, cette approche possède les défauts d'une approche empirique. Le seuil fixé n'est valable que pour nos condensateurs. L'énergie maximale supportée par le diélectrique peut varier d'un type de condensateur à un autre. Ensuite, il y a un risque que l'alarme soit donnée trop tardivement pour empêcher un accident. Lors du dépassement des seuils, la fonte du diélectrique est déjà visible à l'œil nu sur plusieurs couches de films. L'état du condensateur est déjà problématique. La mise hors-tension doit s'effectuer de toute urgence. Or, un retard inévitable existe du fait des temps de réactions des processus de détection du seuil, de la confirmation du défaut et de la commande de coupure. Ce retard permet à l'emballement de s'aggraver, c'est pourquoi il doit être limité en deçà de la seconde.

Ces seuils de 12 W et -67° nous indique toutefois la limite à ne pas dépasser pour nos condensateurs. Les seuils critiques ne doivent pas leur être supérieurs.

Une troisième méthode est d'établir les valeurs maximales prises par ces indicateurs dans le cas d'un vieillissement par dérive. La relation entre le déphasage initial φ_0 d'un condensateur et le déphasage en fin de vie φ_{Final} est donnée par la relation suivante (cf. équations (1-11) et (2-4)) :

$$\frac{\tan \varphi_0}{\tan \varphi_{Final}} = \frac{ESR_{Final} C_{Final}}{ESR_0 C_0} \quad (5-2)$$

avec ESR_0, C_0 respectivement l'ESR et la capacité initiale et ESR_{Final}, C_{Final} respectivement l'ESR et la capacité en fin de vie.

Le décalage entre φ_{Final} et φ_0 est maximal quand le ratio $\frac{\tan \varphi_0}{\tan \varphi_{Final}}$ est maximal, c'est-à-dire quand le gain d'ESR est maximum et la perte de capacité minimum.

En considérant le pire des cas admis, en fin de vie, l'ESR a triplé par rapport à sa valeur initiale (cf. paragraphe 1.4.1). Ce constat mène à l'équation suivante :

$$\varphi_{\text{Final}} = \arctan\left(\frac{\tan \varphi_0}{3}\right) = \arctan\left(-\frac{1}{3 \text{ ESR}_0 C_0 \omega}\right) \quad (5-3)$$

avec ω la pulsation.

En prenant ESR_0 et C_0 dans les ordres de grandeurs des valeurs du tableau 3-2, $\varphi_{\text{Final}} (50 \text{ Hz}) \approx -89,99^\circ$. La dépendance à la fréquence de l'ESR et de la capacité a déjà longuement été discutée dans les chapitres précédents (cf. paragraphes 1.1.3, 3.2.1 et 3.2.2), ainsi ces grandeurs peuvent ici être considérées constantes de 50 Hz à 10 kHz.

Ainsi, en théorie, une valeur de phase à -88° est déjà problématique. En pratique, les méthodes de mesure amènent du bruit sur les valeurs mesurées. L'amplitude du bruit déterminera les marges à considérer.

Dans un condensateur soumis à des défaillances par dérive, l'impact de la résistance de métallisation R_s et de la résistance du diélectrique R_{is} sur son courant reste négligeable. En négligeant l'ESR pour calculer le courant, le déphasage maximal φ_{Final} renseigne ensuite sur la puissance active maximale P_{max} admissible dans un condensateur fonctionnel :

$$P_{\text{max}} = U_{\text{rms}}^2 C_0 \omega \cos(\varphi_{\text{Final}}) \quad (5-4)$$

U_{rms} est la tension efficace de fonctionnement appliquée au condensateur.

La puissance active est maximale quand le courant dans le condensateur est maximal. Lors du vieillissement par dérive des condensateurs à films polypropylène, le courant ne fait que diminuer à cause de la réduction de la capacité.

Cette troisième approche nous semble très pertinente. Elle s'appuie sur les seuils de fin de vie retenus généralement pour les condensateurs et permet quelques secondes de marge de manœuvre pour déclencher la coupure. La puissance active aux seuils n'est pas encore critique. Le seuil P_{max} s'adapte en fonction des grandeurs nominales U_{rms} et C_0 . Enfin, même si les faux positifs sont possibles, ils ne sont pas un problème puisqu'ils signifient que le condensateur ne remplit plus les exigences fonctionnelles. Si une maintenance prévisionnelle ou a minima un suivi des indicateurs de santé sont mis en place, ce cas de figure ne devrait dans les faits jamais se produire.

Enfin, une quatrième approche consiste à estimer les seuils à l'aide de méthodes d'apprentissage automatique. Par exemple, il serait possible de délimiter l'absence et la présence d'emballement à l'aide de classifieurs.

Il est possible de considérer un espace de n dimensions où chaque axe serait associé à un indicateur d'emballement. Une des classes serait une région de cet espace avec des coordonnées associées à un fonctionnement sain. Une autre serait associée à un fonctionnement en emballement. L'infirmité ou l'affirmation de l'emballement vient alors avec la connaissance des coordonnées d'un composant à un instant t . Sur un espace à deux dimensions, là où définir des seuils fixes revient à définir la région saine comme un parallélogramme, l'utilisation de classifieurs permet de définir d'autres formes de zone. L'intérêt est de permettre d'extraire une information tirant profit de l'ensemble des indicateurs et éventuellement de leur durée d'application. Le couple limite (puissance active, phase) peut par exemple être ajusté en fonction du courant réel, de la résistance

de la métallisation R_s et de la capacité pour déterminer l'état du condensateur. Il peut aussi s'agir d'associer la puissance active à une durée avant de déclarer un emballement. Un grand nombre d'approches sont possibles. La robustesse et l'efficacité de la détection d'emballement sont alors améliorées.

Cependant, comme toute méthode d'apprentissage automatique, cette méthode en possède les défauts, c'est-à-dire qu'elle nécessite une base de données suffisamment riche. Notre base de données souffre d'un manque de représentativité des différents types de condensateurs pour décrire l'emballement. Aussi, nous ne la retiendrons pas.

5.2 Principe général des mesures des indicateurs

Un premier moyen de suivi des indicateurs d'emballement est celui adopté dans le chapitre précédent (cf. paragraphe 4.3.3) : utiliser un capteur de tension et un capteur de courant pour remonter à la puissance active, puis à la phase de l'impédance. Cette méthode est appelée M_0 .

Cela nécessite l'acquisition des signaux concernés avec une fréquence d'échantillonnage relativement élevée, ainsi que l'utilisation d'une unité de calcul.

Un deuxième moyen serait de s'affranchir de la numérisation des données pour déterminer le déphasage. Par définition, le déphasage représente le décalage temporel entre deux signaux de même fréquence. Pour remonter au déphasage d'un condensateur, il suffit donc d'obtenir le décalage entre deux signaux synchrones de sa tension et de son courant.

Si le calcul de la puissance active nécessite la mesure continue du courant et de la tension, la mesure du déphasage, elle, ne nécessite que la mesure d'un point par période de chacun des signaux. Ce point doit être un repère fixe pour une période donnée. Dans le cas d'un signal sinusoïdal, cela peut être par exemple la valeur maximale. Pour des raisons pratiques, il est plus pertinent d'utiliser les passages par 0. Concrètement, il s'agit de mesurer l'écart temporel entre les fronts montants ou descendants des signaux de courant et de tension.

En premier lieu, l'intérêt de cette méthode est sa simplicité fonctionnelle. Elle peut être réalisée uniquement à l'aide de circuits analogiques. Ensuite, elle permet plus de souplesse dans l'acquisition des signaux. Ces derniers peuvent être échantillonnés. Seul le passage aux points de référence ne doit pas être entaché d'erreur.

Le déphasage φ est directement proportionnel à la durée Δt_φ entre le passage des signaux au même point de référence. Le front doit être identique. Il peut s'agir typiquement du décalage entre le passage à 0 de la tension et du courant sur front descendant. Le déphasage s'exprime alors en degré selon l'équation suivante :

$$\varphi = \frac{360 \Delta t_\varphi}{T} \quad (5-5)$$

avec T la période des signaux. Il est usuel pour les angles de plus de 180° de les exprimer en négatif en leur retranchant 360° . Le déphasage d'un condensateur parfait est donc de 270° , exprimé usuellement par -90° .

Si le point de référence et le front ne sont pas les mêmes pour les deux signaux, il conviendra de prendre en compte le délai les séparant pour en déduire le déphasage φ .

Soit ΔT_φ le délai mesuré entre deux passages à 0. En fonction des fronts choisis et de leur ordre de passage, ΔT_φ est fonction de Δt_φ selon les relations explicitées sur la figure ci-dessous :

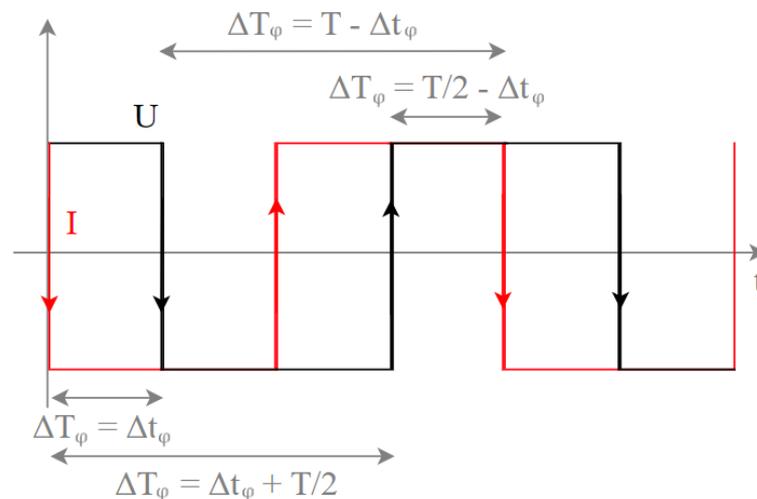


Figure 5-1 : Illustration du rapport entre ΔT_φ et Δt_φ correspondant au déphasage entre deux signaux

Une fois, la valeur du déphasage obtenue numériquement ou analogiquement (en tant que l'image de Δt_φ), le signal de dépassement du seuil peut aussi être donné numériquement ou analogiquement. A titre d'exemple, le signal de dépassement peut provenir de l'utilisation d'un intégrateur et d'un comparateur sur un signal fonction de Δt_φ ou par la charge ou la décharge d'un condensateur sur une durée dépendante de Δt_φ .

5.3 Propositions de circuits analogiques de mesure de déphasage

5.3.1 Contraintes

Le comportement du condensateur ne doit pas être affecté par les circuits de mesure. En pratique, cela signifie que l'impédance d'entrée des circuits de mesure doit être grande devant le condensateur.

Le circuit de mesure doit comporter une isolation galvanique pour séparer la partie de puissance des circuits traitant les mesures.

Si possible, le déphasage induit par les circuits de mesure doit être contrôlé, connu et limité au strict minimum. Notamment, la présence de filtres sur les signaux mesurés peut induire un déséquilibre entre les retards induits par chaque voie de mesure. Dans ce cas, une symétrie dans le déphasage entre les signaux de courant et de tension sera recherchée.

5.3.2 Méthode des triggers de Schmitt

Une première méthode consiste à récupérer les passages à 0 des signaux U et I à l'aide de triggers de Schmitt (ou comparateurs à hystérésis). Les signaux en créneaux en sortie seront des signaux rectangulaires synchrones respectivement images de la tension et du courant.

Ensuite, il suffit de combiner ces signaux en créneaux à travers une ou plusieurs portes logiques pour obtenir un signal créneau dont le rapport cyclique est fonction du déphasage φ . La relation explicite liant les deux dernières grandeurs sera dépendante des portes logiques utilisées et du déphasage induit par les étages en amont des triggers de Schmitt.

Un circuit résultant de de cette technique est présenté sur la figure ci-dessous :

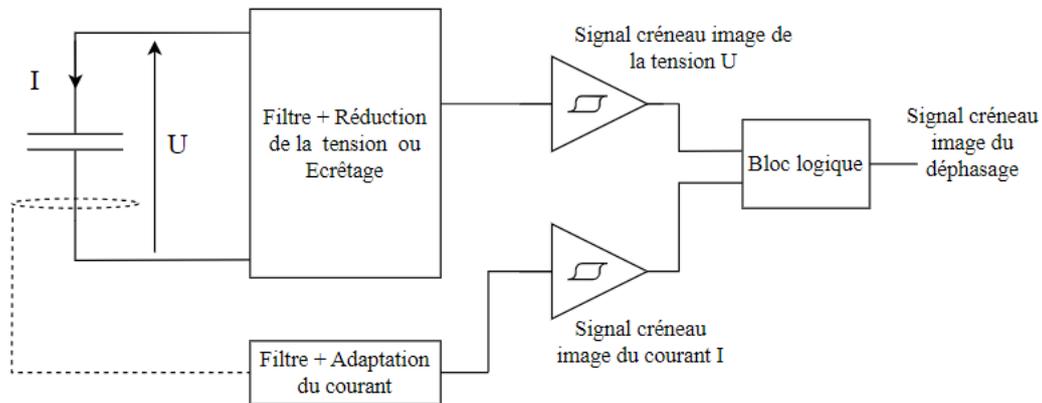


Figure 5-2 : Principe de la méthode avec des triggers de Schmitt

Afin d'adapter le signal de mesure aux conditions nominales d'entrée des triggers de Schmitt, plusieurs étages de fonctions peuvent être ajoutés en amont. Typiquement, la tension peut être préalablement réduite au moyen d'un pont diviseur ou écrêtée à l'aide de diodes. En fonction du type de capteur de courant utilisé, des montages convertisseur courant/tension ou intégrateurs peuvent être à prévoir. L'usage d'un amplificateur opérationnel d'isolement peut permettre de garantir l'isolation galvanique.

A titre d'exemple, une variante de cette méthode a été simulé. Elle est appelée M_1 . Les résultats de simulation sont affichés sur la figure 5-3.

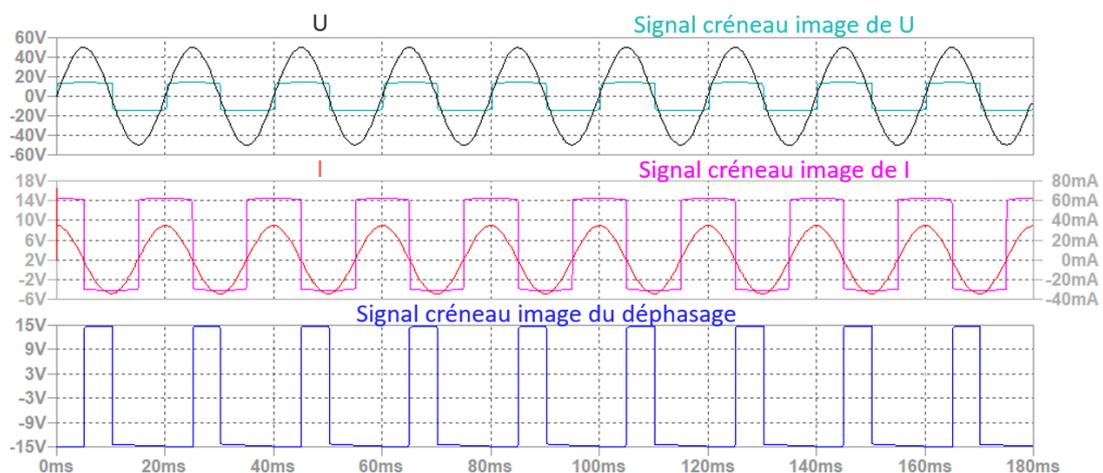


Figure 5-3 : Signaux obtenus grâce par la méthode M_1

La méthode M_1 utilise un pont diviseur de tension pour réduire la tension, suivi d'un filtre RC (passe bas du premier ordre) et d'un étage d'amplificateur opérationnel monté en suiveur afin de réaliser l'adaptation d'impédance du circuit de mesure. Elle comprend aussi un amplificateur d'isolement pour garantir l'isolation des étages traitant le signal de

tension. L'image du courant est obtenue grâce à un capteur à effet Hall. Un filtre RC, identique à celui utilisé sur la voie de tension, se situe en aval. Le bloc logique, réalisé à l'aide d'un comparateur, consiste en la fonction logique $(U \cdot \bar{I})^1$. La méthode M_1 permet donc de récupérer le délai entre le passage à 0 sur front descendant du courant et le passage à 0 sur front descendant de la tension. Ce délai est proportionnel au déphasage φ selon l'équation (5-5).

5.3.3 Méthode basée sur l'association transistor / optocoupleur

Une seconde méthode consiste à regrouper la fonction d'isolement galvanique et de porte logique en utilisant un transistor bipolaire et un optocoupleur.

Elle s'appuie sur la possibilité de conduction discontinue de ces composants. La photo-diode de l'optocoupleur ne conduit que si la tension a ses bornes est positive et supérieure à sa tension de seuil. Le transistor bipolaire ne conduit que si sa tension base-émetteur V_{BE} est positive et supérieure à 0,7 V. De fait, les deux composants peuvent être associés pour former une porte logique. Il s'agit ensuite de tirer parti de l'isolation galvanique assurée par l'optocoupleur, en émettant le signal de sortie de la porte logique via son photo-transistor.

Typiquement, une configuration possible est de connecter la photo-diode en série avec les bornes collecteur-émetteur du transistor bipolaire. Le passage du courant dans la photo-diode est alors contrôlé par le transistor. De cette manière, le photo-transistor de l'optocoupleur ne peut conduire que si la tension aux bornes de la photo-diode et de la tension base-émetteur du transistor bipolaire V_{BE} sont simultanément positives et supérieures à leur tension de seuil. Ils forment ainsi une porte logique ET. Cette configuration est illustrée sur le schéma ci-dessous :

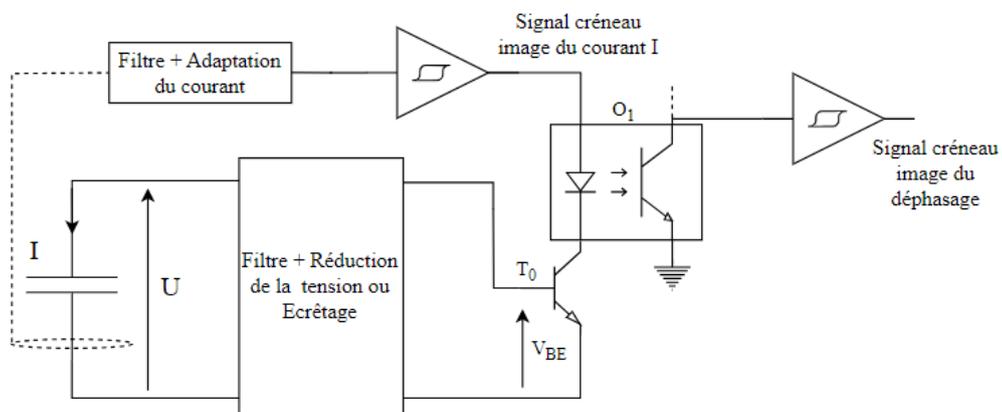


Figure 5-4 : Exemple d'une méthode basée sur l'association transistor/optocoupleur

La tension qui contrôle le transistor peut être directement dérivée de la tension aux bornes du condensateur. Il peut en être fait de même pour la tension aux bornes de la photo-diode qui peut être dérivée du courant traversant le condensateur.

L'avantage de cette méthode est de permettre de se passer d'un amplificateur d'isolement, ce qui réduit le coût du circuit. Cependant, elle comporte une erreur intrinsèque dans la détection des passages à 0. L'atteinte des seuils de commutation du transistor et de la diode induit un léger retard entre le passage à 0 réel et celui mesuré. Si

¹ Les signaux U et I font ici respectivement référence aux signaux logiques à l'image de la tension et du courant traversant le condensateur.

ce retard n'est pas compensé, il amène une erreur systématique dans la mesure du déphasage. Toutefois, plus la tension sinusoïdale aux bornes du condensateur a une amplitude élevée relativement à ces tensions de seuil, plus l'influence de ce retard est négligeable.

Le circuit présenté sur la figure 5-4 n'a pas été utilisé tel quel par la suite. La présence d'une tension composée aux bornes du condensateur entraîne l'ajout de composants additionnels, ce qui augmente sa complexité, son coût et ramène potentiellement du bruit.

5.3.4 Méthode mixte

Une variante améliorant la méthode précédente est présentée sur le schéma ci-dessous. Elle sera appelée méthode M₂. Elle possède l'avantage de permettre une tension composée aux bornes du condensateur, de consommer peu de puissance et de se passer d'un amplificateur d'isolement.

De la même façon que pour la méthode M₁, le courant est capté grâce à un capteur à effet Hall. Le capteur permet d'assurer l'isolation galvanique en aval des étages traitant le signal du courant. Les passages à 0 du courant sont ensuite récupérés grâce à un trigger de Schmitt. Sur l'autre voie, la tension est réduite grâce à un pont diviseur. Les filtres utilisés sont des filtres RC, identiques pour les deux voies et placés directement en aval de l'étage de réduction de la tension et du capteur de courant. L'association d'un optocoupleur et d'un transistor permet de récupérer l'impulsion marquant le passage à 0 de la tension sur front descendant. Enfin, la bascule RS, réalisée à l'aide de comparateurs, forme la fonction logique ($\bar{U} \cdot \bar{I}$) : le déphasage est mesuré grâce au décalage entre les passages à 0 du front descendant de la tension et du front montant du courant.

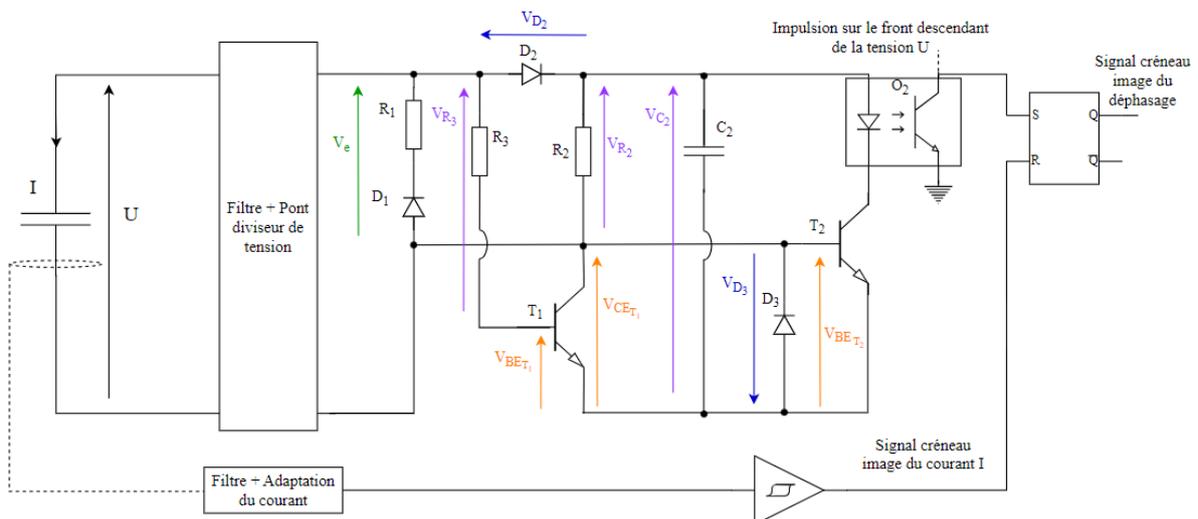


Figure 5-5 : Schéma électrique de la méthode M₂

Le fonctionnement du circuit pour récupérer le passage par 0 sur front descendant de la tension est décrit plus en détail ci-dessous. Les chronogrammes issus de sa simulation sont affichés sur la figure 5-6.

Le circuit sur la figure 5-5 implique les lois des mailles suivantes :

$$\begin{cases} V_e = V_{D_2} + V_{C_2} + V_{D_3} \\ V_e = V_{D_2} + V_{R_2} \\ V_{BE_{T_1}} = V_e - V_{R_3} - V_{D_3} \end{cases} \quad (5-6)$$

Quand U est positive et suffisamment grande, V_e permet la conduction des diodes D_2 et D_3 . Le condensateur C_2 se charge. Comme la tension aux bornes de la diode D_3 est positive, la tension $V_{BE_{T_2}}$ est négative. Le transistor T_2 est bloqué et il n'y a pas de courant dans l'optocoupleur O_2 . La tension V_e permet aussi la conduction de T_1 . Cependant, la tension $V_{CE_{T_1}}$ est négative. Un courant inverse traverse T_1 .

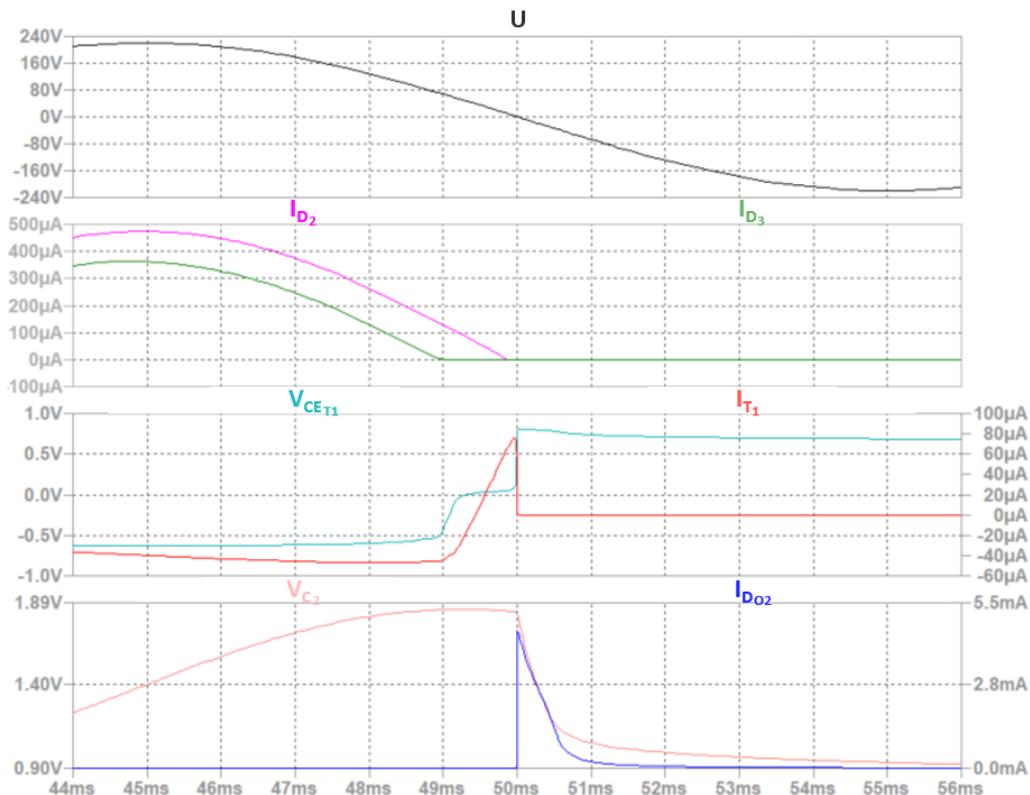


Figure 5-6 : Chronogrammes des signaux de la méthode M2

A un moment, la tension $V_e - V_{C_2}$ n'est plus suffisante pour atteindre la somme des tensions de seuil des diodes D_2 et D_3 . La résistance R_2 est dimensionnée de telle sorte que c'est la diode D_3 qui se bloque. D_2 continue de conduire ($V_{D_2} = V_e - V_{R_2}$). Comme la tension V_e reste suffisante pour assurer la conduction de T_1 , le condensateur C_2 continue de se charger via T_1 . L'optocoupleur O_2 reste bloqué.

D_2 se bloque avant le transistor T_1 . La tension $V_{CE_{T_1}}$ est alors positive. Durant ce court laps de temps, le condensateur C_2 commence à se décharger dans R_2 . Cependant, le courant du collecteur de T_1 est très faible et la tension $V_{CE_{T_1}}$ est proche de 0. De fait, la décharge du condensateur C_2 est quasi-nulle ($V_{C_2} = V_{R_2} + V_{CE_{T_1}}$) et le transistor T_2 demeure bloqué. Il n'y a toujours pas de courant dans O_2 .

Il faut attendre que transistor T_1 se bloque pour que le transistor T_2 devienne passant. Le potentiel aux bornes de $V_{CE_{T_1}}$ n'étant plus fixé, la décharge du condensateur C_2 dans R_2 permet alors à la tension $V_{BE_{T_2}}$ d'atteindre sa tension de seuil. Une fois le transistor T_2 passant, le condensateur C_2 finit sa décharge à travers la photo-diode de l'optocoupleur O_2 . Un signal lumineux est émis.

Une fois la décharge du condensateur terminée, plus aucun courant ne circule dans O_2 . Le temps de décharge de C_2 est très faible devant la période du signal de la tension U . De fait, durant le temps où la tension U reste négative, D_3 , D_2 et T_1 restent bloqués. La résistance R_1 et la diode D_1 servent alors à limiter la tension aux bornes du circuit de détection pour en protéger les composants.

Le cycle se perpétue au grès des changements de polarité de la tension U .

Ainsi, l'optocoupleur O_2 émet un signal à chaque fois que la tension U passe par 0 sur front descendant. La bascule RS permet de garder en mémoire ce passage jusqu'à ce que le courant devienne positif et réinitialise la bascule.

Les signaux obtenus sont présentés sur la figure ci-dessous :

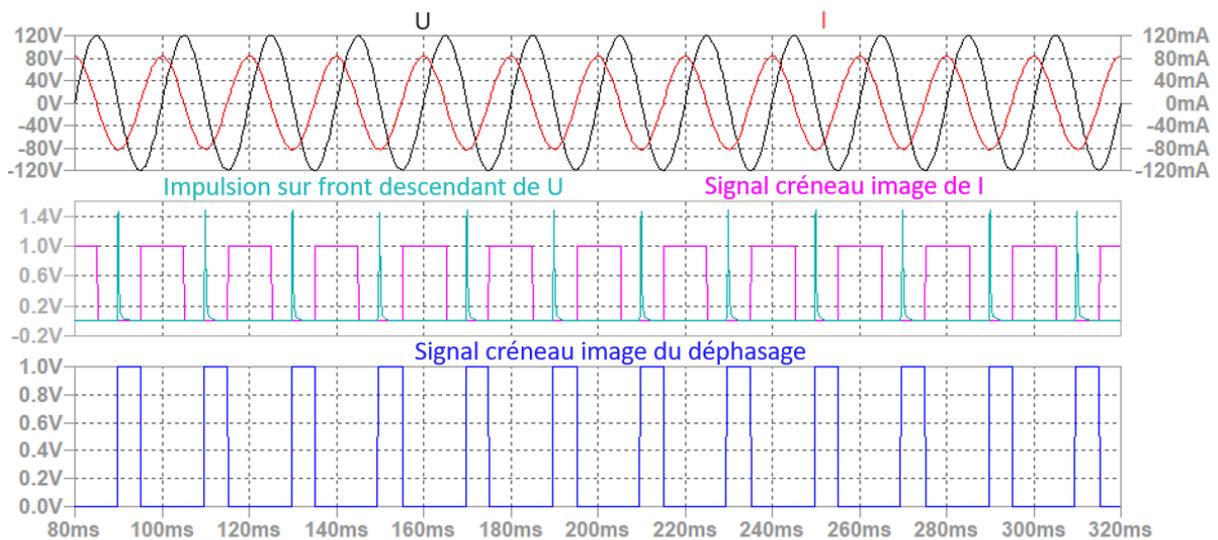


Figure 5-7 : Signaux obtenus avec la méthode M_2

Un autre intérêt de ce circuit est de réduire l'erreur de précision de la mesure du déphasage. La décharge de C_2 est commandée par le transistor T_1 dont le mode de conduction est fixé invariablement par la tension $V_{BE_{T_1}}$.

Comme discuté dans le paragraphe 5.3.3, notre approche induit des erreurs systématiques de mesure. La tension V_e n'est pas tout à fait égale à 0 V quand la tension $V_{BE_{T_1}}$ passe sous le seuil de 0,7 V. Cependant, avec notre méthode, cette erreur reste limitée car elle n'est due qu'à un seul composant.

Ensuite, en rendant la décharge du condensateur C_2 indépendante de la tension à ses bornes, l'erreur de répétabilité diminue. Les variations de la tension U ou de la capacité du condensateur C_2 en cas de vieillissement n'ont plus aucun impact.

5.4 Validation expérimentale des circuits dans le cadre d'un emballement

5.4.1 Résultats expérimentaux sur une impédance connue

Afin de valider les deux méthodes proposées, les schémas associés ont été implémentés sur des circuits imprimés.

Dans les deux cas, le même capteur de courant à effet Hall a été utilisé pour mesurer le courant. Pour les deux circuits de mesure, la fréquence de coupure des filtres RC (passe bas) a d'abord été fixée à 1 kHz (cf. figure 5-2 et figure 5-5).

Afin d'évaluer les circuits, la mesure du déphasage s'est effectuée dans un premier temps en remplaçant le condensateur par des charges d'impédance connue Z_1 et Z_2 soumises à une tension alternative sans harmoniques. Les deux charges étaient constituées d'un condensateur mis en parallèle avec une résistance dont les valeurs respectives de capacité et de résistance ont été caractérisées préalablement à l'impédancemètre.

Les signaux obtenus par les méthodes M_1 et M_2 sont affichés sur la figure ci-dessous :

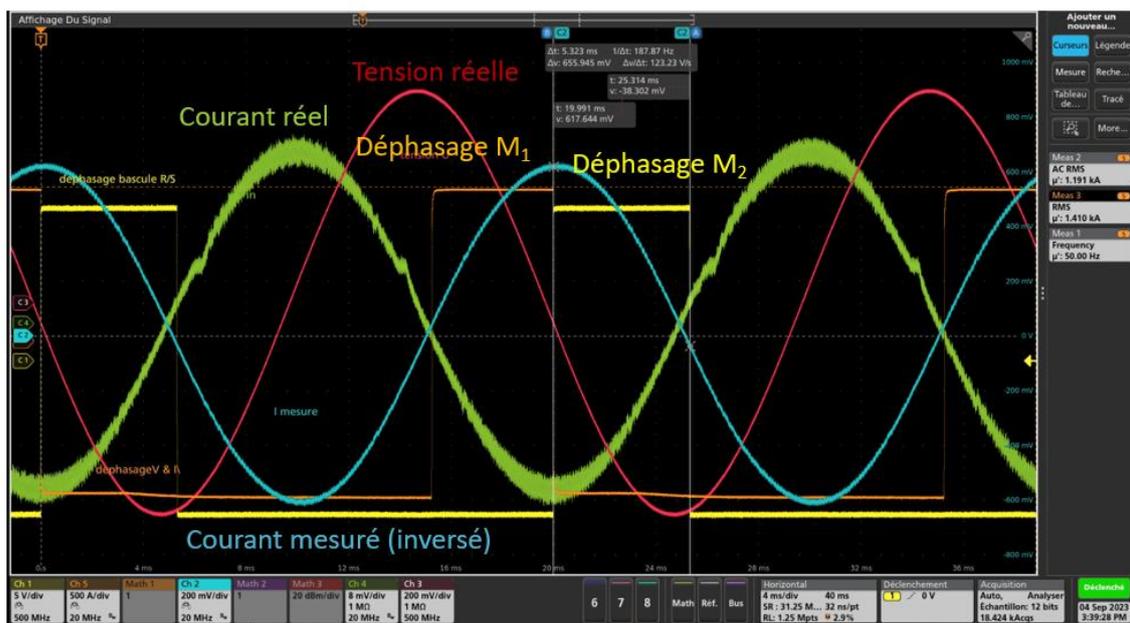


Figure 5-8 : Affichage des signaux de mesure à l'oscilloscope

Les signaux expérimentaux correspondent à ceux simulés. Les étages des différents circuits de mesures remplissent leur fonction.

Pour les deux méthodes, le rapport cyclique du signal créneau image du déphasage a été mesuré puis utilisé pour remonter à la valeur du déphasage, selon les équations présentées dans le paragraphe 5.2. Les valeurs recueillies φ_{M_1} et φ_{M_2} ont ensuite été comparées à la valeur réelle du déphasage de l'impédance des charges $\varphi_{\text{théorique}}$. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	Impédance Z_1	Impédance Z_2
$\varphi_{\text{théorique}}$	$-85,97^\circ$	$-81,21^\circ$
φ_{M_1}	$-85,52^\circ$	$-80,59^\circ$
φ_{M_2}	$-84,19^\circ$	$-79,33^\circ$

Tableau 5-1: Déphasages obtenus selon les différentes méthodes M_1 et M_2

La mesure via la méthode M_1 est plus proche de la réalité que celle obtenue via la méthode M_2 . La méthode M_2 possédant une erreur systématique de mesure non compensée, cela était prévisible (cf. paragraphe 5.3.4). Néanmoins, les imprécisions restent acceptables pour détecter un emballement.

Ensuite, la robustesse des deux circuits face à différentes contraintes a été évaluée. Parmi ces contraintes, il y a l'influence d'une variation de température entre 10 et 35 °C, de la fréquence du fondamental des signaux de courant et tension entre 40 et 60 Hz, de la tension efficace entre 184 et 276 V (sans harmoniques) et enfin de l'exposition des circuits aux harmoniques du réseau.

Dans un premier temps, nous avons remarqué que l'influence des harmoniques sur les passages à 0 induisaient une variation sur la mesure du déphasage pouvant aller jusqu'à 19°. L'environnement étant celui d'un laboratoire de recherche en électronique de puissance, le courant était particulièrement bruité. Cette valeur de 19° est trop haute pour permettre une détection précoce. Ainsi, une décision a été prise de réduire la fréquence de coupure des filtres passe bas à 10 Hz. Bien que l'amplitude des signaux à 50 Hz soit réduite, le passage à 0 des signaux reste observable. Outre, la diminution drastique des harmoniques des rangs 1 à 20 (notamment les rangs 5, 7 et 11), l'intérêt de ce filtre à 10 Hz est de rendre robuste le déphasage qu'il induit par nature aux variations de l'élément RC (association d'une résistance et d'un condensateur) qui le compose. En considérant une variation du produit RC de 5 %, la variation induite sur le déphasage du filtre est de 1°.

A la suite de cette correction, la mesure du déphasage selon la méthode M_2 a été effectuée sous la tension du réseau pendant 2 jours (un week-end) alors que celle de la méthode M_1 n'a pu être réalisée que pendant 2h30 (en semaine).

Les variations de la mesure sur le déphasage en réponse des variations de chaque contrainte sont affichées dans le tableau ci-dessous :

Contraintes	$\Delta\varphi M_1$	$\Delta\varphi M_2$
Δ Fréquence [40 -60 Hz]	0,1°	0,3°
Δ Tension [184 - 276 V]	0,5°	1°
Δ Température [10 - 35°C]	0,5°	0,7°
Harmoniques du réseau	2,5°	4,5°

Tableau 5-2 : Variations sur la mesure de phase induites par les contraintes

La méthode M_1 reste la plus performante.

Malgré la présence des filtres avec une fréquence de coupure de 10 Hz, les circuits de mesures restent très sensibles à la présence d'harmoniques. Les seuils critiques d'emballement doivent tenir compte des imprécisions engendrées. En cumulant toutes les erreurs dues à l'influence de la variation des contraintes, l'erreur sur la mesure de déphasage (maximale pour la méthode M_2) est de 6,5°. Il convient donc de décaler le seuil critique de -88° de 6,5°. Le seuil obtenu de $-81,5^\circ$ équivaut à 5,5 W selon l'équation

(5-4) pour nos condensateurs de $2,2 \mu\text{F}$ sous leur tension nominale de 330 V. Le couple ($5,5 \text{ W}$; $-81,5^\circ$) restant largement en dessous du couple maximal (12 W ; -67°), ce seuil de $-81,5^\circ$ reste acceptable pour une détection d'emballlement précoce (cf. paragraphe 5.1.2).

Par la suite, une autre cause d'imprécision a été décelée. Les capteurs de courant généraient un offset dont la valeur variait à chaque mise sous tension. Cet offset induisait un décalage entre les véritables passages à 0 du courant et leur détection. L'erreur a été éliminée à l'aide de filtre passe haut d'une fréquence de coupure de 1 Hz. Par manque de temps, les mesures de robustesse n'ont pas pu être réestimées. Ainsi les erreurs affichées dans le tableau 5-2 sont probablement surévaluées.

5.4.2 Résultats expérimentaux dans le cadre d'un emballlement de condensateur

Nous avons ensuite confronté les circuits de détection à un emballlement réel de condensateur. Les condensateurs proviennent des mêmes références que les chapitres précédents et sont au nombre de trois par fabricant. Ils ont été soumis à des contraintes fixes en température, humidité de respectivement 95°C , 85 % d'humidité relative ainsi qu'à leur tension AC nominale. La tension appliquée provenait d'un auto-transformateur triphasé directement connecté au réseau EDF. Au contraire des essais réalisés dans le chapitre 4, la tension appliquée comportait donc cette fois-ci les harmoniques du réseau. Seuls les condensateurs ont été placés dans une enceinte climatique, les circuits de mesures demeuraient dans un environnement climatique standard ($\sim 25^\circ\text{C}$) près de l'enceinte.

Afin de valider les mesures de déphasages effectuées par nos circuits et d'apporter une redondance en cas de défaut de nos méthodes, une mesure de la puissance active a été réalisée en parallèle selon la méthode M_0 .

Une photographie des circuits est représentée ci-dessous :

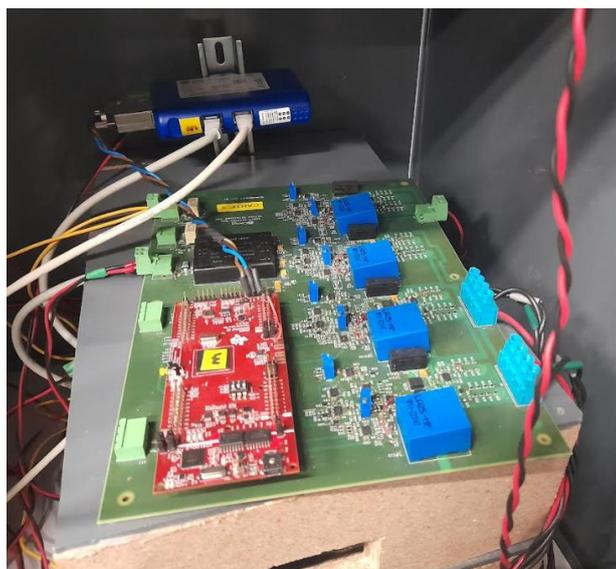


Figure 5-9 : Photographie des circuits de détection d'emballlement

5.4.2.1 Validation du principe de la méthode de prévention

Au bout de 24 h de vieillissement, un condensateur a subi un début d'emballlement. Sa puissance active était de 10 W et son déphasage de respectivement $-81,7^\circ$, $-83,2^\circ$ et $-80,7^\circ$ pour les méthodes M_0 , M_1 et M_2 quand le système de déconnexion du banc s'est déclenché.

Après un arrêt d'un jour, le condensateur a été remis sous tension. Il est apparu qu'il ne présentait plus le moindre défaut. Sa capacité a été restaurée et sa puissance active est redevenue quasi-nulle. Il a ensuite été sorti du banc pour être étudié. Lors de son ouverture, aucune trace de fonte n'a été observée. Notre système de prévention d'emballlement semble avoir fonctionné.

Les chronogrammes sont présentés sur la figure ci-dessous :

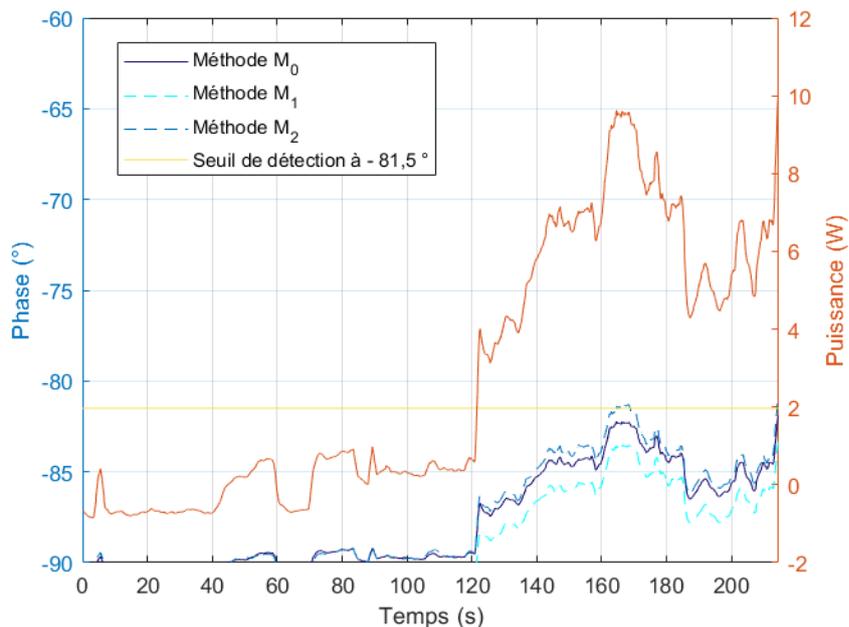


Figure 5-10 : Montée de puissance active et du déphasage d'un condensateur avant mise hors-tension du condensateur

Aucune trace de corrosion n'a également été aperçue, le temps de vieillissement étant trop court pour permettre la diffusion de l'humidité.

5.4.2.2 Validation des méthodes de mesure proposées

Outre, ce premier évènement, aucun emballlement n'a été observé pendant le premier mois de vieillissement. Ensuite, les essais ont dû être stoppés à cause d'une coupure hivernale. Cette coupure a duré deux semaines, les condensateurs ont été retirés de l'enceinte climatique et conservés à l'air libre, en conditions climatiques standard. C'est lors d'une première remise sous tension à 25°C afin de vérifier le bon fonctionnement du banc que des emballlements ont été aperçus.

L'évolution des mesures du déphasage selon les méthodes M_0 , M_1 et M_2 pendant un emballlement est affiché sur la figure 5-11. Le condensateur en question a subi une explosion entre la 44^{ème} et la 50^{ème} seconde du chronogramme.

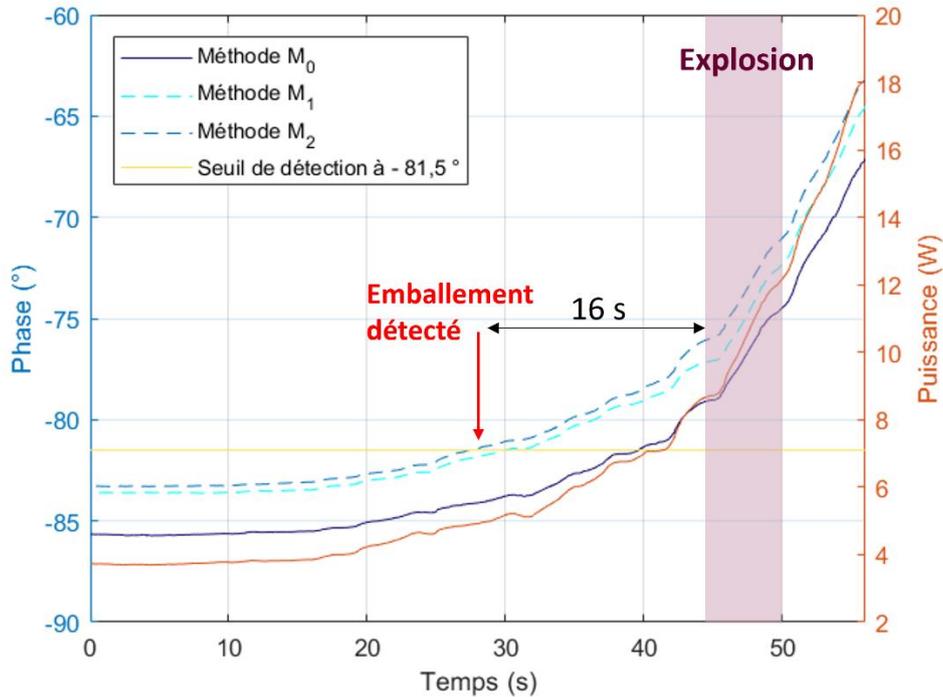


Figure 5-11 : Mesures du déphasage pendant un emballement selon les méthodes M_0 , M_1 et M_2

Toutes les méthodes permettent de détecter l’emballement par le franchissement du seuil de $-81,5^\circ$ avant l’incident. Une déconnexion effectuée dans les secondes suivantes permet d’éviter l’explosion. En conséquence, toutes les méthodes sont validées.

Toutes les méthodes réussissent à suivre la dynamique de l’emballement. Le temps de réaction de mesure est suffisamment rapide et leur précision de mesure apparaît suffisante.

On remarque cependant un écart de 2° sur le déphasage entre les méthodes M_0 et M_1 ou M_2 . Il est probable que cet écart vienne d’une erreur de calibration plutôt que d’un écart de mesure réel. En effet, l’objectif de cette remise en tension étant de vérifier le bon fonctionnement du banc, la tension U_{rms} appliquée n’a pas été rigoureusement fixée à 330 V. La tension réelle appliquée était de 310 V. Cependant, le correctif appliqué sur les mesures de tension et courant à cause du filtre passe bas à 10 Hz était resté dimensionné pour 330 V, ce qui a induit une erreur sur la lecture des signaux de courant et de tension. L’écart diminuant avec l’augmentation de la puissance active tend à confirmer cette hypothèse. Plus la puissance active est importante, plus l’influence de cette erreur est négligeable. Cet écart de mesure de 2° entre la méthode M_0 et les méthodes M_1 ou M_2 implique tout de même un retard d’environ 10 secondes entre leur franchissement respectif du seuil critique posé à $-81,5^\circ$. Le délai pour donner l’alarme et mettre hors-tension le condensateur en défaut est réduit.

L’écart de la mesure du déphasage entre les méthodes M_1 et M_2 est quant à lui relativement faible. Sa moyenne sur l’ensemble des points présentés sur la figure 5-11 est égal à $0,6^\circ$, ce qui correspond à l’écart préalablement observées entre leurs erreurs systématiques (cf. tableau 5-1).

Il faut enfin remarquer que l'explosion a eu lieu avant le dépassement de nos seuils maximums empiriques de 12 W et - 67 °. Si cela peut être mis sur le compte des imprécisions de mesure pour le seuil de 12 W, ce n'est pas le cas de celui de - 67 °. Un seuil aux alentours de - 80 ° semblerait finalement plus approprié.

5.5 Analyse critique des différentes méthodes

Comme il a été démontré précédemment, toutes les méthodes permettent de détecter l'emballement. Compte-tenu du temps de variation des grandeurs lors d'un emballement toutes permettent de réagir à temps. Cependant, leur implémentation a permis de relever leurs faiblesses et leurs forces. Toutes ne permettent pas la même marge de manœuvre en termes de temps de réaction. Meilleure est la précision, plus grande est la marge de manœuvre.

La synthèse des observations est récapitulée dans le tableau ci-dessous :

Méthode	M ₀	M ₁	M ₂
Composants	Capteurs + Etage d'adaptation d'impédance + CAN + Microprocesseur	Capteurs + Etage d'adaptation d'impédance et des signaux + porte logique analogique	
Sensibilité aux bruits sur le courant	Robustesse aux harmoniques grâce au moyennage	Sensibilité aux harmoniques, à l'offset de courant induit par le capteur de courant	
	+	-	
Précision absolue	/	+	-
Robustesse	/	+	-
Pertes joules	Négligeables		

Tableau 5-3 : Tableau comparatif des différentes méthodes

Si un microprocesseur est déjà implémenté dans le convertisseur et des ressources sont disponibles, la méthode M₀ est celle nécessitant le moins d'ajout de composants. A priori c'est alors la moins coûteuse en termes de matériel. Cependant, les méthodes M₁ et M₂ permette une économie des coûts et ressources de calculs. D'un point de vue purement fonctionnel, des circuits analogiques suffisent pour détecter un emballement.

Cependant, dans l'optique d'un système de protection purement analogique, il reste à concevoir un circuit permettant à partir du signal crête image du déphasage de générer un signal d'alarme avec un temps de réaction suffisamment court.

Conclusion

Ce chapitre propose une méthode pour prévenir les conséquences catastrophiques des défaillances à la suite d'un emballement thermique. Il s'agit de surveiller les variations de la puissance active et du déphasage au sein du composant et de détecter quand elles dépassent un seuil critique. La détection précoce de l'emballement doit être suivie d'une mise hors-tension immédiate du condensateur. Le temps de réaction doit être de la seconde. Si l'emballement est immédiatement interrompu, la production de gaz inflammables sera limitée à des niveaux où les concentrations restent inoffensives. Les risques d'explosion et d'incendie sont alors écartés.

Plusieurs pistes ont été proposées et évaluées afin de définir les seuils critiques des indicateurs. Celle qui nous semble la plus pertinente et la plus facile à mettre en place consiste à reprendre les seuils usuels de fin de vie. Au-delà de ces seuils usuels de fin de vie, le condensateur est logiquement soit déjà hors service, soit en emballement. Avec un suivi et une maintenance adaptée, les condensateurs peuvent être remplacés avant d'atteindre ces seuils, ce qui élimine le risque de faux positifs.

Ensuite, des méthodes de mesures de ces indicateurs ont été discutées. La plus commune consiste à mesurer le courant et la tension et de les numériser via un microprocesseur pour en déduire la puissance active et le déphasage. Cependant, le déphasage, en tant que mesure de décalage de deux signaux de même fréquence, ne nécessite pas obligatoirement une numérisation des signaux. Une détection des passages à 0 suffit. Sur la base de cette approche, deux méthodes ont été présentées. L'une d'entre elle se base sur l'utilisation de triggers de Schmitt et la seconde sur l'association d'un optocoupleur et d'un transistor bipolaire. Les deux méthodes ont été simulées puis implémentées sur des circuits imprimés. Leur mesure du déphasage a été validée sur des charges d'impédance connue puis sur de véritables condensateurs en emballement. L'erreur systématique et la robustesse de ces deux méthodes a été évaluées. La méthode des triggers de Schmitt donne les meilleurs résultats. Cependant, les deux méthodes restent valides pour détecter un emballement dans les temps. Leurs limites, révélées grâce à leur implémentation, ont été décrites en détail.

Ainsi, des méthodes de prévention des défaillances catalectiques par claquages thermiques en ligne des condensateurs à films métallisés ont été proposées, évaluées et validées. Elles ont mené au dépôt du brevet EP 23306366, nommé "Detection of thermal runaway in film capacitors"[116].

Dans la pratique, pour réduire les coûts, la mesure des signaux de courant et de tension est souvent unique sur un banc de condensateurs. De fait, les systèmes électroniques n'ont accès qu'à une mesure commune pour évaluer l'état individuel de chaque condensateur au sein du banc. Il reste à déterminer l'influence de l'imprécision apportée sur la détection précoce d'un emballement.

Enfin, ces méthodes reposent sur une dynamique de l'emballement de l'ordre de la minute. Il convient de vérifier que cette dynamique se vérifie sur les autres types de condensateurs à films métallisés, notamment ceux contenant plus de polypropylène et dimensionnés pour supporter de plus fortes puissances apparentes.

Conclusion générale

L'étude des défaillances des condensateurs à films métallisés est nécessaire pour obtenir une estimation de leur durée de vie utile restante lors de leur fonctionnement et prévenir les dommages collatéraux de leurs pannes. Les lois de durée de vie classiques contiennent des coefficients qui sont coûteux à obtenir et ne sont pas robustes à un changement de type de condensateur ou de contraintes. Pour qu'une loi puisse s'adapter à tous les condensateurs, elle doit s'appuyer des comportements communs. C'est le cas des mécanismes de défaillances. Une piste prometteuse pour l'extraction d'une loi robuste consiste donc à modéliser ces mécanismes. Dans la littérature, de telles lois commencent à apparaître. Identifiées sur des petits échantillons de condensateurs pour des contraintes définies, il reste à valider la portée prédictive de ces lois et leur robustesse face à d'autres types de condensateurs à films métallisés.

Les travaux de cette thèse se sont donc focalisés dans un premier temps sur la caractérisation des mécanismes de défaillance (cf. paragraphe 1.4). Trois principaux ont été identifiés : ceux liés aux auto-cicatrisations, à la corrosion et à la fragilisation du diélectrique. Ils affectent la capacité du condensateur et sa résistance équivalente série. En conséquence, les pertes augmentent et accroissent la probabilité d'une défaillance catalectique. Leur étude a permis de mettre à jour les corrélations et les interdépendances de ces mécanismes.

Afin d'évaluer les lois existantes et d'étudier la dynamique des mécanismes de vieillissement, des essais de vieillissement accélérés ont été menés. Le troisième chapitre a présenté les résultats des essais en conditions de tension alternative et de température. Le quatrième chapitre s'est focalisé quant à lui sur les résultats d'essais en conditions de tension alternative, de température et d'humidité. Des études post-mortem ont montré qu'un type de mécanisme prédominait dans chaque cas. Ainsi, les phénomènes d'auto-cicatrisations et de corrosion ont été étudiés distinctement. Dans les deux cas, l'analyse a permis d'effectuer une modélisation de leurs impacts sur la dégradation de la capacité. Pour les auto-cicatrisations, une modélisation supplémentaire a été proposée pour définir le début de la dégradation de la résistance de métallisation. Toutes reposent sur la caractérisation du taux de défaillance d'une unité de métallisation. Les modèles ont été confrontés aux données et comparés aux modélisations existantes pour évaluer leur ajustement et leur portée prédictive. Le modèle (3-13) présenté dans le chapitre 3, tiré de la loi de Weibull a été complètement validé sur les résultats des essais en température et tension. Il s'avère qu'il peut aussi être pertinent en présence conjointe d'humidité, de température et de tension AC. Le modèle (4-15) présenté dans le chapitre 4 a quant-à-lui été validé d'un point de vue prédictif en cas d'électro-corrosion. Il comporte, cependant, des divergences avec les données au début de la dégradation. Les limites de tous les modèles proposés ont été discutées en détail afin de proposer des pistes d'amélioration. Ainsi, dans le cas du modèle basé sur l'impact de la corrosion, le coefficient de diffusion de l'humidité à travers la métallisation n'est probablement pas constant.

Des lois de la littérature ont donc été évaluées et de nouveaux modèles (3-13) et (4-15) ont été proposés. Ces nouveaux modèles sont théoriquement plus robustes car basés directement sur les mécanismes de défaillance. L'effet des contraintes est pris en compte indirectement dans les coefficients des modèles. Enfin, ils ne nécessitent pas d'effectuer des essais préalables afin d'identifier leurs paramètres. L'identification peut se réaliser tout au long de la durée de vie du composant sur la base de la mesure de sa capacité, voire de son ESR.

Il restera à confronter ces modèles à d'autres types de condensateurs à films métallisés et à d'autres niveaux de contraintes. Ensuite, il s'agira de trouver le meilleur moyen de les utiliser pour déterminer une méthode permettant d'estimer la durée de vie utile restante.

Ces travaux se sont également focalisés sur la prévention des défaillances cataclysmiques à la suite d'un emballement thermique. Avec la fonte du diélectrique, des gaz inflammables peuvent être émis. Ils sont à l'origine du risque d'explosion ou d'incendie des condensateurs à films métallisés. Le processus d'emballement a été décrit en détail dans le premier chapitre. Une première difficulté a été de sélectionner des conditions d'essais suffisamment contraignantes pour observer plusieurs emballements en restant dans des plages de fonctionnement admissibles usuellement. Ce verrou scientifique a été levé avec succès. Les résultats expérimentaux ont montré que le risque d'emballement était très fortement accru en présence d'humidité dans le diélectrique. Les durées des mises hors-tension des condensateurs ont aussi un impact. Plus les conditions climatiques sont sévères, plus les défauts dans le diélectrique sont conséquents. Hors-tension, ces défauts peuvent s'étendre et s'aggravent au fil du temps. Les auto-cicatrisations ne peuvent pas s'effectuer. Ainsi, lors de la remise sous tension, une décharge a plus de probabilité de provoquer un emballement.

Des emballements ont été observés sur trois séries de condensateurs provenant de fabricants différents. Des signatures du phénomène ont été identifiées. Il s'agit de l'augmentation drastique de la puissance active et du déphasage (cf. paragraphe 4.4.2). La température est en théorie un bon indicateur mais en pratique, les méthodes usuelles de mesures non-intrusives induisent un retard à la détection à cause de la résistance thermique du composant. L'élévation du courant n'est pas un bon indicateur car la résistance d'isolement reste souvent importante. Des constantes de temps ont pu être mises en évidence. Les emballements observés s'étendaient sur des durées de l'ordre de la minute. Des mesures annexes de la résistance d'isolement et de la résistance métallisation pendant des emballements, couplées à une analyse des différences entre les emballements, ont permis d'approfondir nos connaissances (cf. paragraphe 4.4.3 et 4.4.5). Ainsi, un emballement est dû à une chute brutale de la résistance du diélectrique. Électriquement, le condensateur change d'état, son déphasage augmente. En conséquence, une forte puissance active se dissipe et chauffe le composant. Elle a pour effet de faire fondre le diélectrique. Avec la chaleur générée, d'autres défauts se créent dans le diélectrique et abaissent d'autant plus sa résistance. Un cercle vicieux se met alors en place qui prend fin grâce à la sublimation des électrodes. Nous avons supposé qu'à la différence des auto-cicatrisations, les décharges entre les films se forment alors plus vite, qu'elles ne s'auto-éliminent.

Ensuite, il a été observé que la quantité de fonte du diélectrique dépend du temps d'exposition du condensateur à une forte puissance active. En limitant directement la puissance active, ou indirectement en passant par le déphasage, la quantité des gaz inflammables émis peut être restreinte. De fait, il devient possible d'éliminer les risques associés. Le temps de réaction doit être de l'ordre de la seconde. Les seuils critiques de ces indicateurs ont été discutés dans le dernier chapitre. Des méthodes ont été proposées pour détecter à temps les emballements. Parmi elles, certaines sont basées sur des circuits analogiques détectant la variation du déphasage entre le courant et la tension du condensateur. À l'inverse d'une détection basée sur la puissance active, la numérisation des signaux n'est pas obligatoirement nécessaire. Deux circuits analogiques ont été présentés, implémentés et testés. Les résultats montrent qu'ils permettent une mesure du

déphasage assez réactive pour anticiper les défauts. Leurs limites ont été présentées et discutées en détail dans les paragraphes 5.4 et 5.5.

En conclusion, les travaux de cette thèse ont permis de mettre au point des méthodes de surveillance en ligne des condensateurs à films métallisés afin de prévenir les risques d'un claquage thermique. En s'appuyant directement sur la physique des phénomènes, les méthodes proposées sont valides pour des composants de différents fabricants.

Dans des travaux futurs, il conviendra de vérifier que la dynamique de l'emballement reste assez lente et donc détectable sur tous les condensateurs à films métallisés indépendamment de leur volume, de leur puissance apparente nominale et de la nature de leur diélectrique. Les seuils limites pourraient être plus faibles ou atteints plus rapidement et ne pas permettre de restreindre la quantité de gaz à des concentrations tolérables. Également, des méthodes plus robustes basées sur des techniques d'apprentissage automatique pourraient être mises en place pour déterminer ces seuils critiques en fonction de chaque situation.

Ensuite, les méthodes proposées dans ces travaux exploitent uniquement la détection précoce des emballements thermiques. Aucune méthode permettant leur prédiction n'a été établie. Il restera donc à étudier la probabilité d'occurrence de défaut diélectrique menant à un emballement. Pour ce faire, plusieurs verrous sont à lever. Le premier est l'obtention d'une mesure robuste et précise d'un indicateur d'état du diélectrique d'un condensateur en fonctionnement. Le deuxième concerne l'étude des influences des contraintes sur la survenue des défauts.

Références

- [1] M. Patra, "European Ecodesign Material Efficiency Standardization Overview for Circular Economy Aspects in Motor and Power Drive Systems," in *Energy Efficiency in Motor Systems*, P. Bertoldi, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 231–242. doi: 10.1007/978-3-030-69799-0_18.
- [2] ISO 14044, *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, 2006.
- [3] ISO 14040, *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, 2006.
- [4] L. Fang, T. T. Romano, M. Rio, J. Melot, and J.-C. Crebier, "L'apport des normes et de la réglementation pour la soutenabilité en électronique de puissance," in *Symposium de Génie Electrique (SGE 2023)*, Lille, France, Jul. 2023.
- [5] *Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. [En ligne]. Disponible sur : « <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/indice-durabilite> » (Visité le 19/07/2024).*
- [6] J.-M. Bureau, "Propriétés diélectriques des polymères," *Techniques de l'Ingénieur*, Réf. : E1850 v4. 2016.
- [7] TDK, "Film Capacitors - Typical applications." 2018.
- [8] K. C. Kao, "2 - Electric Polarization and Relaxation," in *Dielectric Phenomena in Solids*, San Diego: Academic Press, 2004, pp. 41–114. doi: 10.1016/B978-012396561-5/50012-8.
- [9] A. De Lustrac, "Matériaux composites en électromagnétisme," *Techniques de l'Ingénieur*, Réf. : E1164 V2. 2018.
- [10] W. Benhadjala, "Fiabilité et miniaturisation des condensateurs pour l'aéronautique : de l'évaluation de composants céramique de puissance à l'étude de nanoparticules hybrides céramique / polymère pour technologies enterrées," Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2013.
- [11] R. Fournié and R. Coelho, "Diélectriques - Bases théoriques," *Techniques de l'Ingénieur*, Réf. : D2300 V1. 2000.
- [12] A. Beauger, J.-M. Haussonne, and J.-C. Niepce, "Condensateurs," *Techniques de l'ingénieur*, Réf. : E1925 V1. 2007.
- [13] P. Venet, "Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie," Habilitation à diriger des recherches, France, 2007.
- [14] M. Makdessi, "Modélisation, vieillissement et surveillance de l'état de santé des condensateurs films utilisés dans des applications avioniques," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon1, France, 2014.
- [15] A. El Hayek, "Analyse de vieillissement, estimation de la durée de vie et méthode de surveillance de l'état de santé des condensateurs électrolytiques," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2020.
- [16] TDK, "Aluminum Electrolytic Capacitors - General technical information," 2022.
- [17] M.-J. Pan and C. A. Randall, "A brief introduction to ceramic capacitors," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 26, no. 3, pp. 44–50, May 2010, doi: 10.1109/MEI.2010.5482787.
- [18] B. Seguin, "Les pertes dans les condensateurs bobinés utilisés en électronique de puissance: mesure calorimétrique et modélisation.," Thèse de doctorat, INP Grenoble, 1997.
- [19] TDK, "Film Capacitors - General technical information." 2018.

- [20] C. Joubert, "Etude des phénomènes électromagnétiques dans les condensateurs à films métallisés : Nouvelle génération de condensateur," Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 1996.
- [21] VISHAY, "General Technical Information -Film Capacitors." 2017.
- [22] V. Belko and O. Emelyanov, "Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design," *Journal of Applied Physics*, vol. 119, p. 024509, Jan. 2016, doi: 10.1063/1.4939954.
- [23] INRS. [En ligne]. Disponible sur : « <https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques> » (Visité le 28/11/2023).
- [24] C. Duval, "Polypropylènes (PP)," *Techniques de l'Ingénieur, Réf. : AM3320 V1*. 2004.
- [25] J. Ho and T. R. Jow, "High field conduction in biaxially oriented polypropylene at elevated temperature," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 3, pp. 990–995, Jun. 2012, doi: 10.1109/TDEI.2012.6215104.
- [26] Exxelia, "Film Capacitors - Product Catalog 154."
- [27] Dearborn Electronics Inc., "Film & Mica capacitors."
- [28] D. Allal, "Mesures en radiofréquences - Méthodes de mesure et appareillage," *Techniques de l'Ingénieur, Réf. : R1135 V2*. 2012.
- [29] Keysight Technologies, "Impedance measurement handbook- A guide to measurement technology and techniques (6th Edition)."
- [30] Agilent Technologies, "Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer - Service Manual." 2009.
- [31] S. A. Chakra, "La boucle locale radio et la démodulation directe de signaux larges bandes à 26GHz," Thèse de doctorat, Télécom ParisTech, France, 2006.
- [32] Keysight Technologies, "Impedance Measurement Handbook - A Guide to Measurement Technology and Techniques - 6th Edition."
- [33] Chauvin Arnoux, "Guide de la mesure d'isolement." 2010.
- [34] SEFELEC, "Operating manual M1501 SERIES."
- [35] N. Valentine, M. H. Azarian, and M. Pecht, "Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review," *Microelectronics Reliability*, vol. 92, pp. 123–135, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.11.003>.
- [36] KEMET. K-LEM: Life Expectancy Model v2.0. [En ligne]. Disponible sur : « <https://ksim3.kemet.com/film-lifetime> » (Visité le 09/01/2023).
- [37] IEC 60384-14, *Fixed capacitors for use in electronic equipment - Part 14: Sectional specification – Fixed capacitors for electromagnetic interference suppression and connection to the supply mains*, 60384–14, Jul. 2016.
- [38] COMPOTEC, "Film Capacitors -Robustness and Fail-Safe,"
- [39] H. Li *et al.*, "Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film," *Microelectronics Reliability*, vol. 55, no. 12, Part B, pp. 2721–2726, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.09.007>.
- [40] C. W. Reed and S. W. Cichanowski, "The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, no. 5, pp. 904–922, 1994, doi: 10.1109/94.326658.
- [41] M.-H. El-Husseini, "Amélioration de la fiabilité des condensateurs à films polypropylène métallisés," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon1, France, 2001.
- [42] Q. Chen *et al.*, "Moisture Ingress of Metallized Film Capacitor under High Temperature and Different Humidity Condition," in *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Oct. 2018, pp. 422–425. doi: 10.1109/CEIDP.2018.8544882.

- [43] D. F. Taylor, "On the Mechanism of Aluminum Corrosion in Metallized Film AC Capacitors," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-19, no. 4, pp. 288–293, 1984, doi: 10.1109/TEI.1984.298801.
- [44] H. Li *et al.*, "Capacitance Loss Mechanism and Prediction Based on Electrochemical Corrosion in Metallized Film Capacitors," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 2, pp. 654–662, Apr. 2021, doi: 10.1109/TDEI.2020.009220.
- [45] M. Michelazzi *et al.*, "RFI X2 capacitors for high humidity environment," *CARTS International 2014*, Jan. 2014.
- [46] C. Wagner, "Reaktionstypen bei der Oxydation von Legierungen," *Zeitschrift für Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, vol. 63, no. 7, pp. 772–782, 1959, doi: 10.1002/bbpc.19590630713.
- [47] H. M. Umran, F. Wang, and Y. He, "Ageing: Causes and Effects on the Reliability of Polypropylene Film Used for HVDC Capacitor," vol. 8, 2020.
- [48] S. W. Rowe, "Electrical Ageing of Composites: An Industrial Perspective," in *2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Jul. 2007, pp. 401–406. doi: 10.1109/ICSD.2007.4290837.
- [49] R. Boukadoum, "Étude des décharges partielles et de leur transition à l'arc dans la connectique aéronautique du futur," Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, France, 2018.
- [50] Y. Chen, H. Li, F. Lin, F. Lv, Z. Li, and M. Zhang, "Effect of interlayer air on performance of dry-type metalized film capacitor in DC, AC and pulsed applications," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 4, pp. 1301–1306, Aug. 2011, doi: 10.1109/TDEI.2011.5976131.
- [51] D. Xin, L. Fuchang, L. Jin, Y. Zonggan, and W. Nanyan, "Influence factors for the self-healing of metallized polypropylene capacitors," in *2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.00CH37132)*, 2000, pp. 461–465 vol.2. doi: 10.1109/CEIDP.2000.883998.
- [52] Z. Jiang, H. Li, and B. Wang, "Fracture Behavior of Metallized Electrode for Capacitor Under Pulsed Current," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 5, pp. 2517–2525, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.7736808.
- [53] J.-M. Petit and J.-L. Poyard, "Les mélanges explosifs." INRS, 2004.
- [54] J. Bond, "A New Mitigation Strategy for Failures in Metallized Polypropylene." Electronic Concepts, Inc.
- [55] Y. Mortureux, "La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques," *Techniques de l'Ingénieur, Réf. : AG4670 V1*. 2001.
- [56] Shaoyong Yang, A. Bryant, P. Mawby, Dawei Xiang, Li Ran, and P. Tavner, "An industry-based survey of reliability in power electronic converters," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA: IEEE, Sep. 2009, pp. 3151–3157. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316356.
- [57] H. Wang, K. Ma, and F. Blaabjerg, "Design for reliability of power electronic systems," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2012, pp. 33–44. doi: 10.1109/IECON.2012.6388833.
- [58] H. Soliman, H. Wang, and F. Blaabjerg, "A Review of the Condition Monitoring of Capacitors in Power Electronic Converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pp. 4976–4989, 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2591906.
- [59] W. Zhou *et al.*, "Accelerated Life Testing Method of Metallized Film Capacitors for Inverter Applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 1, pp. 37–49, Mar. 2021, doi: 10.1109/TTE.2020.3021614.

- [60] M. Karlsson, J. Malmberg, and F. Wahledow, "System and method to determine a capacitance of a capacitor," EP 3482486 B1, Mar. 25, 2020
- [61] B. Yao, Y. Zhang, S. Song, I. Trintis, H. Wang, and H. Wang, "Accelerated Degradation Testing and Failure Mechanism Analysis of Metallized Film Capacitors for AC Filtering," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 5, 2024.
- [62] Y. He, J. Zheng, Z. Li, Q. Luo, W. Yu, and X. Wu, "Method for measuring and predicting capacitor ESR values of switching power supplies on line," CN 103235188B B, May 02, 2013
- [63] P. Venet, F. Perisse, M. H. El-Husseini, and G. Rojat, "Realization of a smart electrolytic capacitor circuit," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 16–20, Jan. 2002, doi: 10.1109/2943.974353.
- [64] R. Baburaj, "Capacitor failure indication circuit," EP 2887077 A1, Jun. 24, 2015
- [65] Z. Gajic, M. Ibrahim, and J. Wang, "Method and arrangement for an internal failure detection in a y-y connected capacitor bank," EP 2676146 B1, May 07, 2014
- [66] S. M. Bhandakar and S. I. Benitez Escobar, "Filter capacitor degradation identification using computer power," EP 2919024 B1, Sep. 16, 2015
- [67] A. Hassanpoor and S. Valdemarsson, "Sensing failure of a capacitor in a converter," WO 2017/071754 A1, Apr. 05, 2017
- [68] Y. Xiao, N. Zargari, M. Pande, and V. Khatri, "Filter capacitor fault detection for a variable frequency drive," EP 2390997 B1, Apr. 10, 2019
- [69] F. Salameh, "Méthodes de modélisation statistique de la durée de vie des composants en génie électrique," Ph.D. dissertation, INP Toulouse, 2016.
- [70] A. Gautam and V. Singh, "Parametric Versus Non-Parametric Time Series Forecasting Methods: A Review," *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 13, pp. 165–171, Jun. 2020, doi: 10.25103/jestr.133.18.
- [71] Y. Ran, Z. Meimei, L. Hui, L. Wei, W. Xiao, and L. Haiyang, "Reliability Modeling and Analysis on Metallized Film Capacitors for MMC," in *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia)*, May 2019, pp. 1854–1860. doi: 10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8797013.
- [72] C. Lv, J. Liu, Y. Zhang, W. Lei, R. Cao, and G. Lv, "Reliability Modeling for Metallized Film Capacitors Based on Time-Varying Stress Mission Profile and Aging of ESR," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 4, pp. 4311–4319, Aug. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3001604.
- [73] H. S. Endicott, B. D. Hatch, and R. G. Sohmer, "Application of the Eyring Model to capacitor aging data," in *Annual Report 1962 Conference on Electrical Insulation*, 1962, pp. 47–50. doi: 10.1109/EIC.1962.7466672.
- [74] C. Lv, J. Liu, Y. Zhang, W. Lei, and R. Cao, "An improved lifetime prediction method for metallized film capacitor considering harmonics and degradation process," *Microelectronics Reliability*, p. 5, 2020.
- [75] P. Vassiliou and A. Mettas, "Understanding Accelerated Life-Testing Analysis," presented at the Annual Reliability and Maintainability symposium, 2003, pp. 1–21.
- [76] C. Stancu *et al.*, "Thermal Lifetime Calculation of Capacitor Insulation Using the Activation Energy Method," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 10, no. 10, pp. 1647–1656, Oct. 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.3019275.
- [77] TDK. *CLARA: Capacitor Life and Rating Application*. [En ligne]. Disponible sur : « <https://captools.tdk-electronics.tdk.com/CLARA/> » (Visité le 01/02/2024).

- [78] H. Wang, D. A. Nielsen, and F. Blaabjerg, "Degradation testing and failure analysis of DC film capacitors under high humidity conditions," *Microelectronics Reliability*, p. 5, 2015.
- [79] C. Lv *et al.*, "A Method to Characterize the Shrinking of Safe Operation Area of Metallized Film Capacitor Considering Electrothermal Coupling and Aging in Power Electronics Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 2, pp. 1993–2002, Feb. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3161823.
- [80] Z. Li *et al.*, "Lifetime investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors," *Microelectronics Reliability*, vol. 53, no. 12, pp. 1962–1967, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.06.005>.
- [81] Y.-X. Zhang *et al.*, "Long-term capacitance variation characteristics, law extraction, single and collaborative prediction of film capacitors at room temperature and humidity," *Microelectronics Reliability*, vol. 139, p. 114845, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.microrel.2022.114845.
- [82] H. Li, T. Qiu, Z. Li, F. Lin, and Y. Wang, "Capacitance Loss Evolution of Zn–Al Metallized Film Capacitors Under Atmospheric Corrosion," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 6, pp. 2363–2369, Dec. 2022, doi: 10.1109/TDEI.2022.3204510.
- [83] K. Hauffe, "The Mechanism of Oxidation of Metals—Theory," in *Oxidation of Metals*, Boston, MA: Springer US, 1965, pp. 79–143. doi: 10.1007/978-1-4684-8920-0_3.
- [84] D. J. Young, "Chapter 1 - The Nature of High Temperature Oxidation," in *High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals (Second Edition)*, Elsevier, 2016, pp. 1–30. doi: 10.1016/B978-0-08-100101-1.00001-7.
- [85] C. Xu and W. Gao, "Pilling-Bedworth ratio for oxidation of alloys," *Materials Research Innovations*, vol. 3, no. 4, pp. 231–235, Mar. 2000, doi: 10.1007/s100190050008.
- [86] H. Li, T. Qiu, Z. Li, F. Lin, and Y. Wang, "ESR Modeling for Atmospheric Corrosion Behavior of Metallized Film Capacitors," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 23, no. 4, pp. 486–493, Dec. 2023, doi: 10.1109/TDMR.2023.3309914.
- [87] R. Scorretti, S. Ciliberto, and A. Guarino, "Disorder enhances the effects of thermal noise in the fiber bundle model," *EPL*, vol. 55, no. 5, p. 626, Sep. 2001, doi: 10.1209/epl/i2001-00462-x.
- [88] M. Makdessi, A. Sari, and P. Venet, "Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation," *Microelectronics Reliability*, vol. 54, no. 9, pp. 1823–1827, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.07.103.
- [89] Z. Li *et al.*, "Lifetime Prediction of Metallized Film Capacitors Based on Capacitance Loss," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 41, no. 5, pp. 1313–1318, 2013, doi: 10.1109/TPS.2013.2243476.
- [90] Z. W. Birnbaum and S. C. Saunders, "Estimation for a Family of Life Distributions with Applications to Fatigue," *Journal of Applied Probability*, vol. 6, no. 2, pp. 328–347, 1969, doi: 10.2307/3212004.
- [91] H. W. Gómez, J. F. Olivares-Pacheco, and H. Bolfarine, "An extension of the generalized Birnbaum–Saunders distribution," 2009.
- [92] X. Ye *et al.*, "Reliability assessment of film capacitors oriented by dependent and nonlinear degradation considering three-source uncertainties," *Microelectronics Reliability*, vol. 126, p. 114277, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114277.
- [93] S. Arlot, M. Maumy-Bertrand, G. Saporta, and C. Thomas-Agnan, "Fondamentaux de l'apprentissage statistique," in *Apprentissage statistique et données massives*, Editions Technip, 2018.

- [94] H. Liu, T. Claeys, D. Pissoort, and G. A. E. Vandenbosch, "Prediction of Capacitor's Accelerated Aging Based on Advanced Measurements and Deep Neural Network Techniques," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 11, pp. 9019–9027, Nov. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.3001368.
- [95] M. Lucu *et al.*, "Data-driven nonparametric Li-ion battery ageing model aiming at learning from real operation data – Part A: Storage operation," *Journal of Energy Storage*, vol. 30, p. 101409, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101409.
- [96] R. Yao, H. Li, W. Lai, A. S. Bahman, and F. Iannuzzo, "Lifetime Analysis of Metallized Polypropylene Capacitors in Modular Multilevel Converter Based on Finite Element Method," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 4, pp. 4248–4259, Aug. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.2981806.
- [97] J. Bond, "AC Capacitors for inverter output filters." Electronic Concepts, Inc., 2013.
- [98] W. Erhardt, "Electrical Capacitor," EP 0284927 B1, Jul. 15, 1992
- [99] TDK, "Film Capacitors - Power Electronic Capacitors - Installation Manual FilterCap MKD AC." 2018.
- [100] J. Flicker, R. Kaplar, M. Marinella, and J. Granata, "Lifetime testing of metallized thin film capacitors for inverter applications," in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Jun. 2013, pp. 3340–3342. doi: 10.1109/PVSC.2013.6745166.
- [101] M. Makdessi, A. Sari, P. Venet, P. Bevilacqua, and C. Joubert, "Accelerated Ageing of Metallized Film Capacitors Under High Ripple Currents Combined With a DC Voltage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 2435–2444, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2351274.
- [102] H. Li, P. Lewin, and J. C. Fothergill, "Aging mechanisms of X2 metallized film capacitors in a high temperature and humidity environment," in *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, 2016, pp. 804–807. doi: 10.1109/ICD.2016.7547738.
- [103] IEC 60384-1, *Fixed capacitors for use in electronic equipment - Part 1: Generic specification*, 60384–14, Feb. 2016.
- [104] IEC 60068-2-78, *Environmental testing -Part 2-78: Tests – Test Cab: Damp heat, steady state*, Oct. 2012.
- [105] Y. Tai, P. Chen, Y. Jian, Q. Fang, D. Xu, and J. Cheng, "Failure mechanism and life estimate of metallized film capacitor under high temperature and humidity," *Microelectronics Reliability*, vol. 137, p. 114755, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.microrel.2022.114755.
- [106] M. Makdessi, P. Bevilacqua, and C. Joubert, "Accelerated Ageing of Metallized Film Capacitors under High Ripple Currents Combined with a DC Voltage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, p. 11, 2013.
- [107] VISHAY, "EMI safety capacitor solutions - Film and Ceramic." 2021.
- [108] G. Asch and B. Poussery, *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 8ème édition. 2017.
- [109] S. Amarouche, "Caractérisation d'une méthode de mesure : étape clé dans le processus de validation," *Techniques de l'ingénieur, Réf. : SL1040 V1*. 2010.
- [110] ISO 5725-1, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions*, 2023.
- [111] Agilent Technologies, "Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer - Operation Manual." 2003.
- [112] I. Ahmadianfar, O. Bozorg-Haddad, and X. Chu, "Gradient-based optimizer: A new metaheuristic optimization algorithm," *Information Sciences*, vol. 540, pp. 131–159, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ins.2020.06.037.

- [113] Z. Li *et al.*, "Temperature Rise of Metallized Film Capacitors in Repetitive Pulse Applications," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 6, pp. 2038–2045, Jun. 2015, doi: 10.1109/TPS.2015.2429144.
- [114] G. Saporta, *Probabilités, analyse des données et statistique*, Editions technip. 2006.
- [115] B. Demoulin and P. Degauque, "Blindages électromagnétiques," *Techniques de l'ingénieur, Réf. D1320 V2*. 2000.
- [116] C. Rochefort *et al.*, "Detection of thermal runaway in film capacitors," EP 23306366
B

Table des figures

Figure 1-1 : Mécanisme de polarisation au sein d'un condensateur	13
Figure 1-2 : Condensateur plat et condensateur cylindrique.....	14
Figure 1-3 : Gamme de capacité et tension selon les types de condensateurs [13]	16
Figure 1-4 : Circuit électrique équivalent normalisé d'un condensateur	17
Figure 1-5 : Circuit électrique équivalent d'un condensateur	18
Figure 1-6 : Structure des condensateurs à films métallisés [13]	20
Figure 1-7 : Vue en coupe de différentes structures internes de condensateurs à films métallisés [19], [21].....	20
Figure 1-8 : Structures chimiques des plastiques utilisés en tant que diélectrique [24].	22
Figure 1-9 : Schéma bloc du principe de détection synchrone.....	24
Figure 1-10 : Principe d'une mesure 4-points.....	25
Figure 1-11 : Vue transversale d'un condensateur à films métallisés	26
Figure 1-12 : Processus d'auto-cicatrisation	27
Figure 1-13 : Impact au microscope à balayage électronique d'une auto-cicatrisation [42]	28
Figure 1-14 : Impact d'une auto-cicatrisation visible à l'aide d'un microscope optique sous deux éclairages différents.	28
Figure 1-15 : Image d'une auto-cicatrisation ayant traversé plusieurs couches.....	29
Figure 1-16 : Photographie de deux films métallisés superposés corrodés.....	30
Figure 1-17 : Synthèse du processus du vieillissement des condensateurs à films métallisés.....	36
Figure 2-1 : Distribution des défauts et sources de stress dans des convertisseurs de puissance [58], [15]	39
Figure 2-2 : Schéma illustratif du brevet EP 2887077 A1 [65]	44
Figure 2-3 : Evolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ d'un composant au cours du temps [56] dite « courbe en baignoire »	52
Figure 3-1 : Présentation des condensateurs utilisés dans nos études.....	62
Figure 3-2 : Caractérisation initiale d'un condensateur de chaque fabricant.....	64
Figure 3-3 : Circuit électrique équivalent simplifié d'un condensateur à films métallisés en essai	65
Figure 3-4 : Photographie d'une portion de film métallisé d'un condensateur neuf de chaque fabricant	66
Figure 3-5 : Photographie et schéma électrique d'un des bancs de test.....	67
Figure 3-6 : Evolution de l'ESR (10 kHz, 25 °C) et de la capacité et des condensateurs de l'essai 1 : 110 °C/ 1,4 U_n	68
Figure 3-7 : Evolution de l'ESR (10 kHz, 25 °C) et de la capacité et des condensateurs de l'essai 2 : 105 °C/ 1,4 U_n	68
Figure 3-8 : Evolution de l'ESR (10 kHz, 25 °C) et de la capacité des condensateurs de l'essai 3 : 110 °C/ 1,3 U_n	69
Figure 3-9 : Signes de décharges électriques sur les films métallisés du condensateur 3B_110°C-1,3 U_n	70
Figure 3-10 : Etat des films métallisés de deux condensateurs de l'essai 2 : 105°C/1,4 U_n après vieillissement.....	71
Figure 3-11 : Photographie du condensateur 3A_110°C-1,4 U_n après vieillissement.....	72
Figure 3-12 : Caractérisation fréquentielle post-mortem du condensateur	72
Figure 3-13 : Vue du point de fusion présent au cœur du bobinage du condensateur 3B_110°C-1,3 U_n traversant les deux films métallisés.....	73

Figure 3-14 : Schéma de principe de décomposition du condensateur	76
Figure 3-15 : Schéma de principe de décomposition des électrodes	77
Figure 3-17 : Ajustement du modèle de la capacité sur des courbes de l'essai 1 : 110 °C/ 1,4 U _n	79
Figure 3-18 : Ajustement du modèle de l'ESR (10 kHz) sur des courbes de l'essai 1 : 110 °C/ 1,4 U _n	80
Figure 3-19 : Ajustement des fonctions présentées tableau 3-3 avec les données	82
Figure 3-20 : Extrapolation du modèle à visée prédictive sur les condensateurs de l'essai 2 : 105°C/ 1,4 U _n	84
Figure 4-1 : Photographie du banc d'essai.....	90
Figure 4-2 : Schéma électrique du banc d'essai pour un condensateur : circuits de puissance et de commande.....	91
Figure 4-3 : Evolution du courant du diélectrique sous une tension de 100 V DC sous différentes conditions environnementales	92
Figure 4-4 : Circuit imprimé de mesure	93
Figure 4-5 : Photographie des connectiques mises en place.....	94
Figure 4-6 : Photo d'un condensateur ayant subi un emballement thermique.....	96
Figure 4-7 : Evolution des indicateurs de santé du condensateur 3C_85°C-85%-1,1U _n pendant un emballement thermique.....	98
Figure 4-8 : Evolution du signal de courant pendant l'emballement thermique du condensateur 3C_85°C-85%-1,1U _n	99
Figure 4-9 : Emballement survenu après 588 heures de vieillissement comportant plusieurs pics de puissance active	100
Figure 4-10 : Emballement à la suite de mise hors-tension successives dans le cas de l'essai 7 : 95°C-85%-1U _n	101
Figure 4-11 : Chronogrammes lors d'une élévation de température sans l'occurrence d'un emballement.....	102
Figure 4-12 : Chronogrammes lors d'un emballement sans pic de courant.....	103
Figure 4-13 : Photographie d'un condensateur ayant subi un emballement ininterrompu face à un dont l'emballement a été stoppé.	104
Figure 4-14 : Instants pendant l'emballement où les caractérisations ont été effectuées	107
Figure 4-15 : Caractérisation de l'impédance d'un condensateur à différents instants de son emballement (cf. figure 4-14) à 85 °C/ 85 % RH	108
Figure 4-16 : Evolution de la capacité pendant l'emballement thermique illustrée par les chronogrammes de la figure 4-7	109
Figure 4-17 : Pic de puissance sans emballement du condensateur 5C_95°C-85%-1U _n	111
Figure 4-18 : Photographie de deux films métallisés superposés du condensateur 5C_95°C-85%-1U _n après l'évènement de la figure 4-17	112
Figure 4-19 : Evolution de la capacité et de l'ESR (10 kHz, 85 °C, 85 % RH) des condensateurs pendant l'essai 4 : 85°C/ 85 % RH/ 1 U _n	113
Figure 4-20 : Evolution de la capacité et de l'ESR (10 kHz, 85 °C, 85 % RH) des condensateurs pendant l'essai 5 : 85°C/ 85 % RH/ 1,1 U _n	114
Figure 4-21 : Evolution de la capacité et de l'ESR (10 kHz, 85 °C, 75 % RH) des condensateurs pendant l'essai 6 : 85°C/ 75 % RH/ 1 U _n	114
Figure 4-22 : Evolution de la capacité et de l'ESR (10 kHz, 95 °C, 85 % RH) des condensateurs pendant l'essai 7 : 95°C/ 85 % RH/ 1 U _n	115
Figure 4-23 : Evolution de la résistance d'isolement à 85 °C et 85 % d'humidité relative des condensateurs lors de l'essai 4 : 85 °C/ 85 % RH/ 1 U _n	116

Figure 4-24 : Evolution de la capacité des condensateurs de l'essai 4 : 85°C/ 85% RH/ 1 U _n	117
Figure 4-25 : Evolution de la capacité des condensateurs de l'essai 5 : 85°C/ 85% RH/ 1,1 U _n	117
Figure 4-26 : Evolution de la capacité des condensateurs de l'essai 6 : 85°C/ 75% RH/ 1 U _n	118
Figure 4-27 : Evolution de la capacité des condensateurs de l'essai 7 : 95°C/ 85% RH/ 1 U _n	118
Figure 4-28 : Etat des films métallisés pour un condensateur de chaque fabricant après l'essai 4 : 85°C-85%-1U _n	119
Figure 4-29 : Schéma de principe de l'influence du taux de défaillance d'une unité de surface d'électrode sur son unité correspondante de surface active.....	123
Figure 4-30 : Ajustement du modèle sur les données de condensateurs représentatifs du comportement général sur l'ensemble des essais.....	126
Figure 4-31 : Extrapolation du modèle à visée prédictive pour différents condensateurs	128
Figure 4-32: Ajustement des équations du tableau 4-5 jusqu'au premiers 20 % de pertes de la capacité de quelques condensateurs représentatifs.....	131
Figure 4-33 : Ajustement des équations du tableau 4-5 sur l'ensemble des mesures de capacités de quelques condensateurs représentatifs.....	132
Figure 5-1 : Illustration du rapport entre $\Delta T\varphi$ et $\Delta t\varphi$ correspondant au déphasage entre deux signaux.....	142
Figure 5-2 : Principe de la méthode avec des triggers de Schmitt	143
Figure 5-3 : Signaux obtenus grâce par la méthode M ₁	143
Figure 5-4 : Exemple d'une méthode basée sur l'association transistor/optocoupleur.....	144
Figure 5-5 : Schéma électrique de la méthode M ₂	145
Figure 5-6 : Chronogrammes des signaux de la méthode M ₂	146
Figure 5-7 : Signaux obtenus avec la méthode M ₂	147
Figure 5-8 : Affichage des signaux de mesure à l'oscilloscope.....	148
Figure 5-9 : Photographie des circuits de détection d'emballement.....	150
Figure 5-10 : Montée de puissance active et du déphasage d'un condensateur avant mise hors-tension du condensateur	151
Figure 5-11 : Mesures du déphasage pendant un emballement selon les méthodes M ₀ , M ₁ et M ₂	152

Table des tableaux

Tableau 1-1 : Ordre de grandeur de différentes caractéristiques des types de condensateur [13], [14]	15
Tableau 1-2: Comparaison des propriétés de différents diélectriques.....	23
Tableau 1-3 : Grandeurs relatives à l'inflammabilité des gaz produits par la fonte des polymères.....	35
Tableau 3-1: Contraintes appliquées des essais en température et tension.....	62
Tableau 3-2 : Moyennes et dispersions des caractérisations initiales selon les fabricants	66
Tableau 3-3 : Erreur quadratique moyenne tirée de l'ajustement des fonctions testées	83
Tableau 4-1 : Contraintes appliquées lors des essais en température, humidité et tension	89
Tableau 4-2 : Nombres d'emballements par essai.....	97
Tableau 4-3 : Caractérisation de la résistance d'isolement juste après l'interruption de l'emballage à 85 °C, 85 % RH	105
Tableau 4-4 : Caractérisation de la résistance d'isolement à différents moments après une interruption de l'emballage.....	106
Tableau 4-5 : Erreur quadratique moyenne de l'ajustement des fonctions testées.....	133
Tableau 4-6 : Etude de la portée prédictive des fonctions. Identification à 7% de dégradations.....	134
Tableau 5-1: Déphasages obtenus selon les différentes méthodes M ₁ et M ₂	149
Tableau 5-2 : Variations sur la mesure de phase induites par les contraintes.....	149
Tableau 5-3 : Tableau comparatif des différentes méthodes.....	153

Table des abréviations

B			
	BOPP	Polypropylène orienté biaxialement (Biaxially Oriented Polypropylene)	
	BT	Basse tension ($50\text{ V} < U \leq 1000\text{ V AC}$)	
C			
	CEM	Comptabilité électro-magnétique	
E			
	EP	Brevet européen (European Patent)	
	EMI	Energie minimale d'inflammation	
	ESR	Résistance série équivalente (Equivalent Serie Resistance)	
	ESL	Inductance série équivalente	
F			
	FFT	Transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform)	
L			
	LIE	Limite inférieure d'explosivité	
	LSE	Limité supérieure d'explosivité	
M			
	MSE	Erreur moyenne quadratique (Mean Square Error)	
	MTTF	Temps moyen avant défaut (Mean Time To Failure)	
P			
	PEN	Polynaphtalate d'éthylène	
	PET	Polytéréphtalate d'éthylène	
	PP	Polypropylène	
	PPS	Polysulfure de phénylène	
R			
	RH	Humidité relative	
	RUL	Durée de vie utile restante (Remaining Useful Lifetime)	

Annexes

A. Notations des céramiques diélectriques

La dénomination des céramiques diélectriques provient de la norme EIA -198. C'est une suite de 3 caractères de la forme X-0-X qui fournit des indications sur leur comportement en fonction de la température [10].

Pour les céramiques de classe I, dont le diélectrique est linéaire, les deux premiers caractères codent la dérive en ppm/°C. Le troisième indique la dérive en capacité entre 25°C et 85°C. Le détail des notations est indiqué dans le tableau ci-dessous :

Dérive en ppm/°C				Tolérance	
1 ^{er} caractère (lettre)	Chiffre significatif	2 ^{ème} caractère (chiffre)	Multiplicateur	3 ^{ème} caractère (lettre)	Tolérance en ppm/°C
C	0,0	0	-1	G	± 30
B	0,3	1	-10	H	± 60
L	0,8	2	-100	J	± 120
A	0,9	3	-1000	K	± 250
M	1,0	4	+1	L	± 500
P	1,5	6	+10	M	± 1000
R	2,2	7	+100	N	± 2500
S	3,3	8	+1000		
T	4,7				
V	5,6				
U	7,5				

Figure A-1 : Codification EIA pour les céramiques de classe I [10]

Pour les céramiques classe II, dont le diélectrique est non linéaire (généralement ferroélectrique) les deux premiers caractères codent les limites en température. Le troisième caractère indique la plage maximum de variation de la capacité du condensateur sur sa plage de température. Le détail des notations est indiqué dans le tableau ci-dessous :

Plage de température (°C)				Variation de capacité	
1 ^{er} caractère (lettre)	Minimum	2 ^{ème} caractère (chiffre)	Maximum	3 ^{ème} caractère (lettre)	Variation (%)
Z	+ 10	2	+ 45	A	± 1
Y	- 30	4	+ 65	B	± 1,5
X	- 55	5	+ 85	C	± 2,2
		6	+ 105	D	± 3,3
		7	+ 125	E	± 4,7
		8	+ 150	F	± 7,5
		9	+ 200	P	± 10
				R	± 15
				S	± 22
				T	+ 22 à - 33
				U	+ 22 à - 56
				V	+ 22 à - 82

Figure A-2 : Codification EIA pour les céramiques de classe II [10]

B. Evolution des indicateurs de vieillissement des essais en tension et température en fonction des fabricants

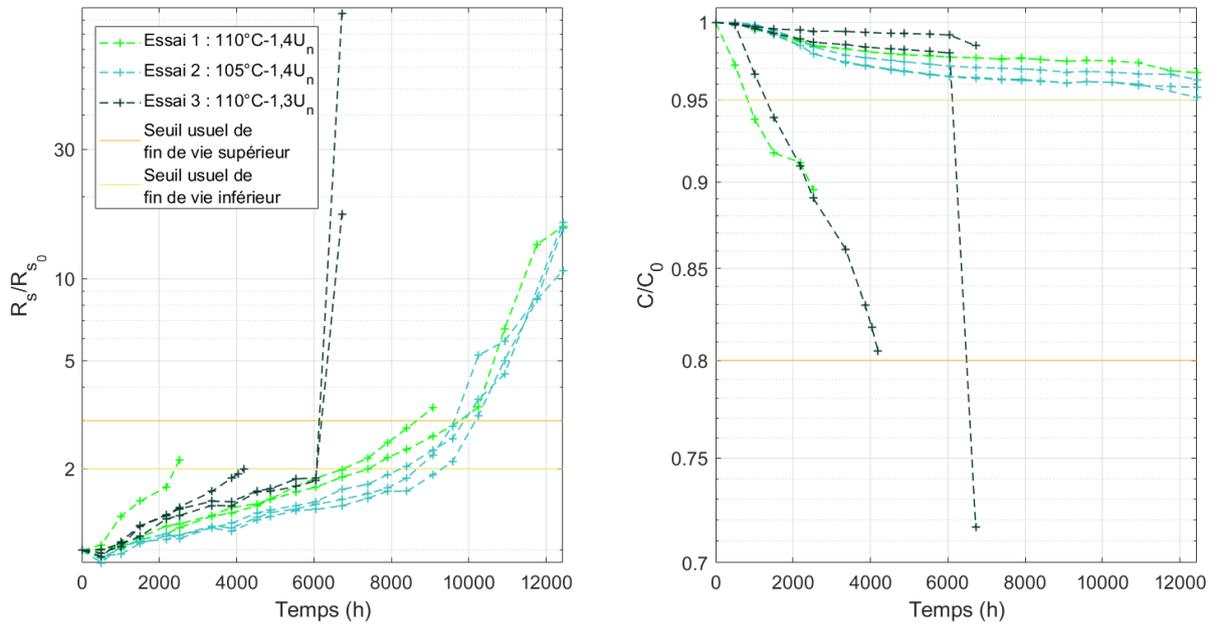


Figure B-1 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 25 °C) des condensateurs du fabricant A lors des essais en tension et température

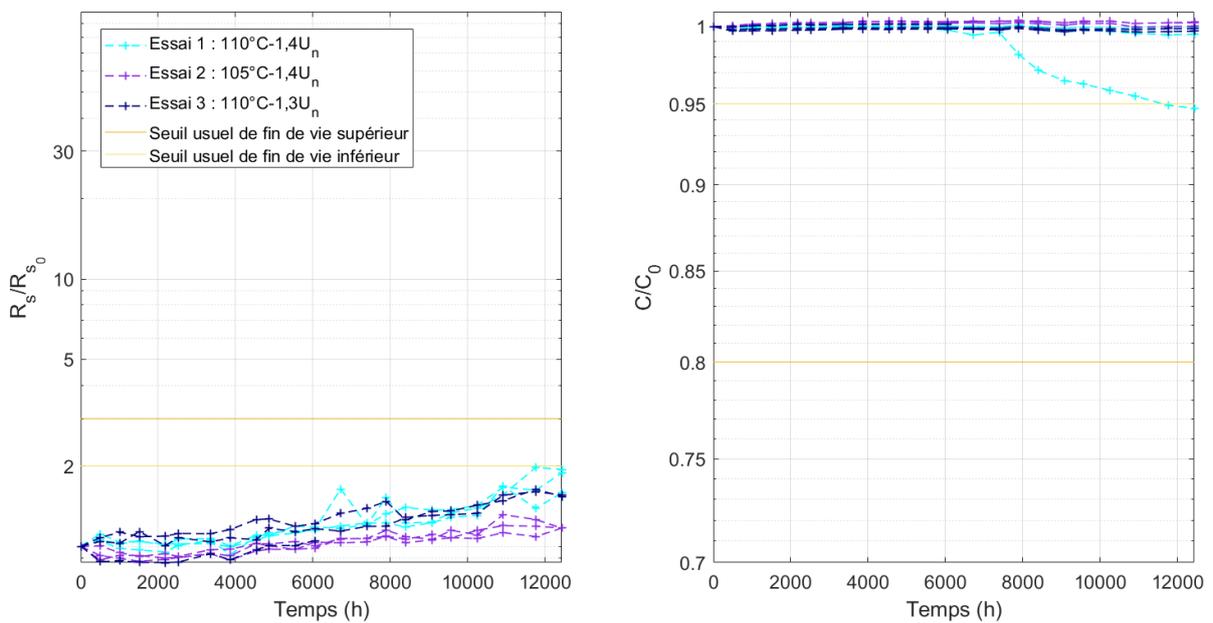


Figure B-2 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 25 °C) des condensateurs du fabricant B lors des essais en tension et température

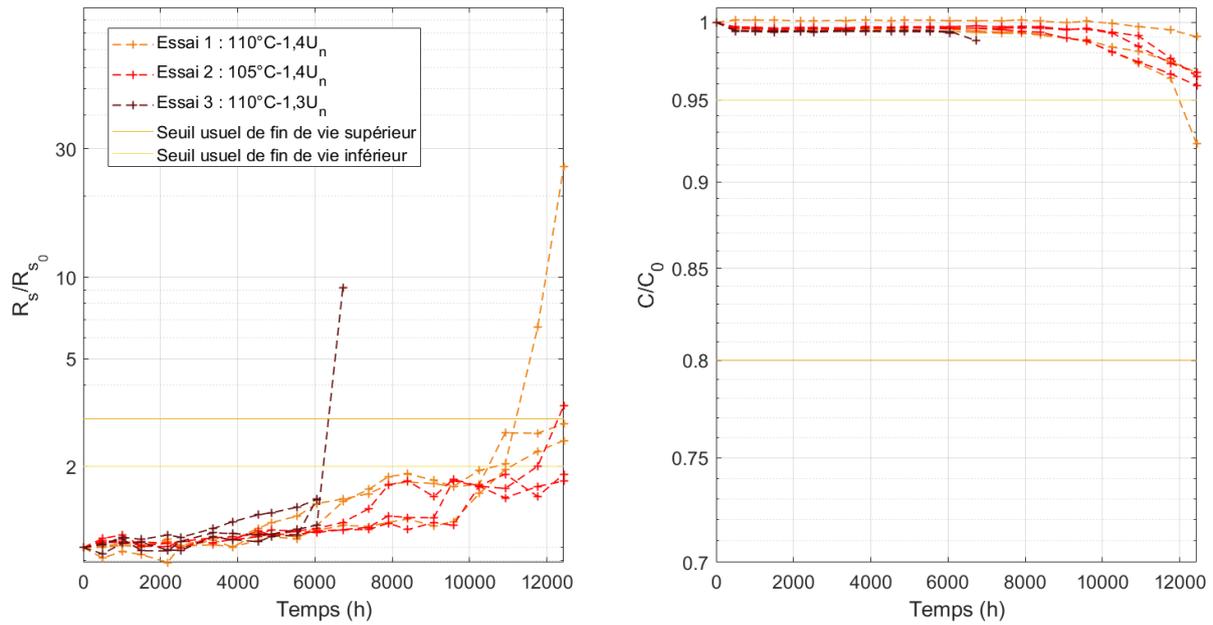


Figure B-3 : Evolution de l'ESR et de la capacité (10 kHz, 25 °C) des condensateurs du fabricant C lors des essais en tension et température

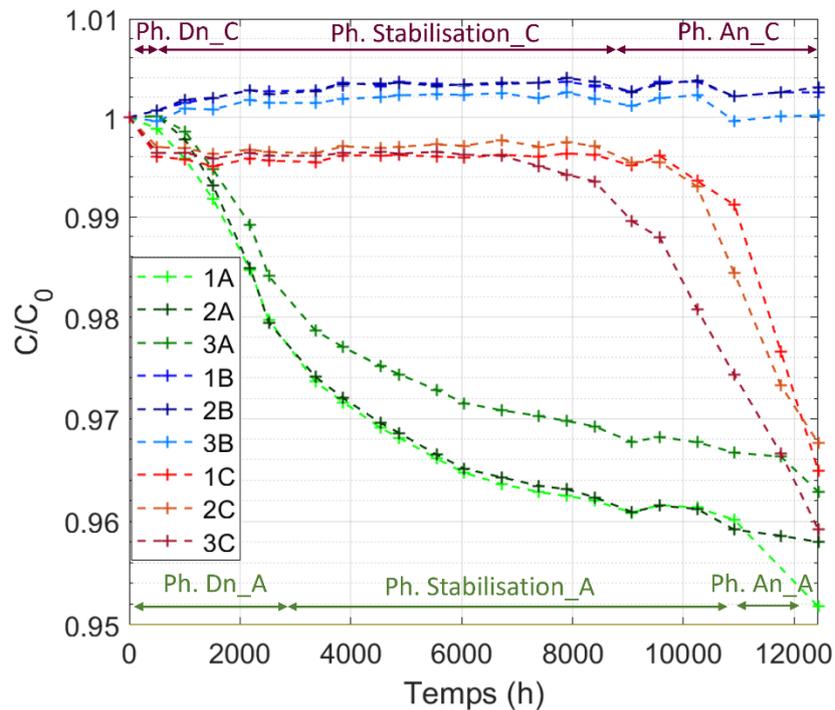


Figure B-4 : Zoom sur l'évolution de la capacité (10 kHz, 25 °C) des condensateurs de l'essai 2 : 105°C/ 1.4U_n

La figure ci-dessus illustre les différentes phases de dégradations constatées pour les condensateurs des fabricants A et C. La phase de décélération est notée Ph. Dn et celle d'accélération est notée Ph. An.

C. Evolution des indicateurs de vieillissement des essais en tension, température et humidité en fonction des fabricants

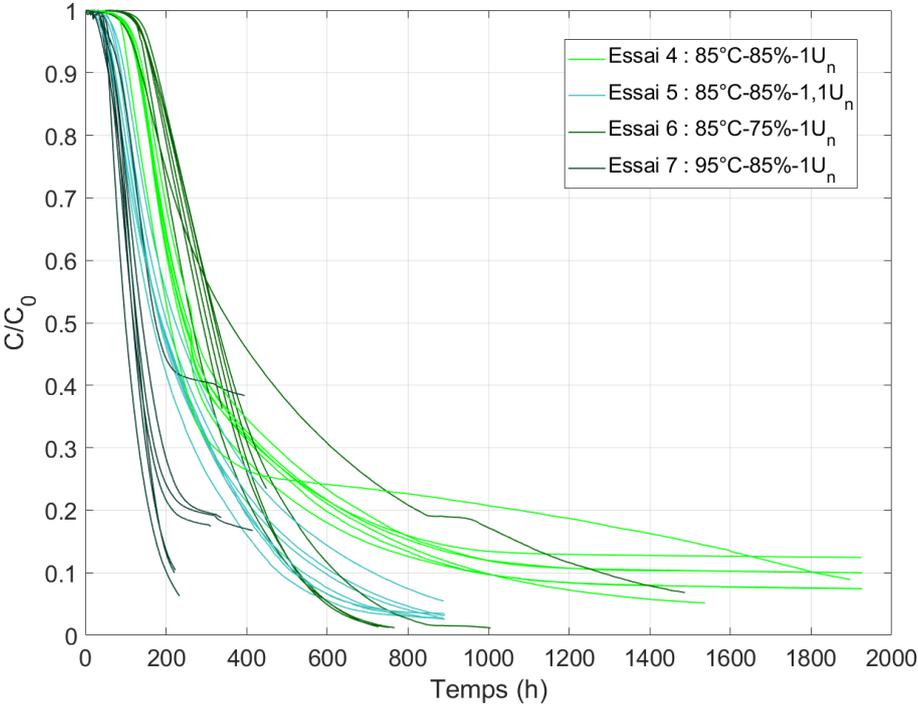


Figure C-1 : Evolution de la capacité des condensateurs du fabricant A lors des essais en température, tension et humidité

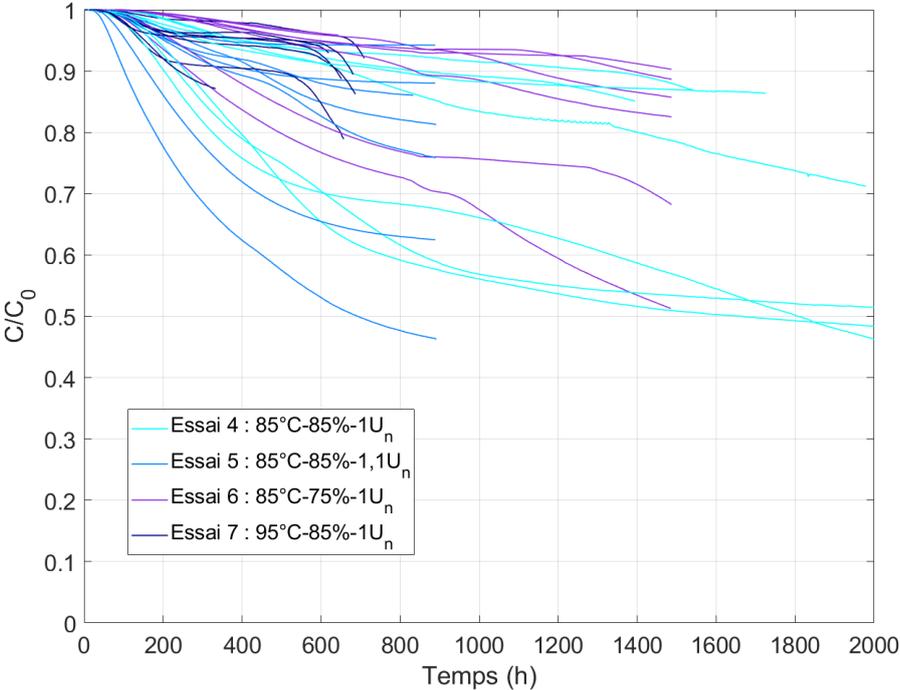


Figure C-2 : Evolution de la capacité des condensateurs du fabricant B lors des essais en température, tension et humidité

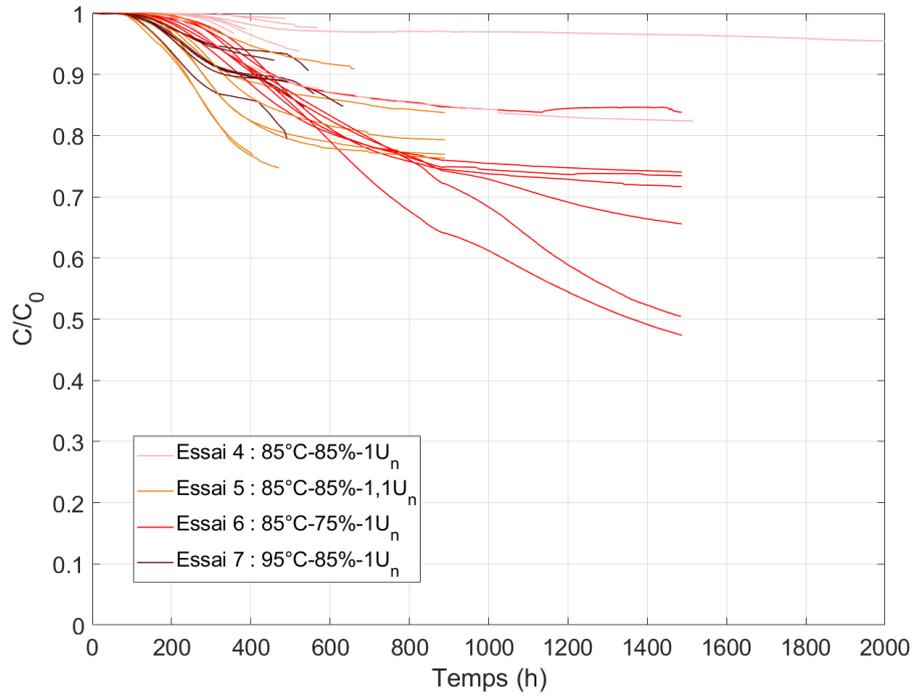


Figure C-3 : Evolution de la capacité des condensateurs du fabricant C lors des essais en température, tension et humidité