

Etude des lois de vieillissement des condensateurs à film polypropylène métallisé

Claire ROCHEFORT^{1,2}, Pascal VENET¹, Guy CLERC¹, Ali SARI¹, Radoslava MITOVA², Miao-Xin WANG², Pascal BEVILACQUA¹, Younes ZITOUNI¹

¹ Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, UMR5005, Ampère, Villeurbanne 69622 France

² Schneider Electric, Power Conversion- Industry Business, Grenoble 38000 France

RESUME – Les condensateurs à film métallisé sont une des causes fréquentes des pannes des systèmes électroniques. Prédire leur durée de vie afin d’anticiper les défaillances est un enjeu clé de la fiabilité de ces systèmes. Dans cet article, des essais de vieillissement accéléré en tension, température et humidité ont été menés sur 21 condensateurs. L’objectif est d’évaluer, à l’aide de ces données, la pertinence des lois existantes dans la littérature sur l’indicateur clé de vieillissement qu’est la diminution de la capacité et de les étendre au-delà des seuils de fin de vie considérés usuellement.

Mots-clés— Condensateur à film polypropylène métallisé, Lois de vieillissement, Essais de vieillissement accéléré

1. INTRODUCTION

Les condensateurs sont des composants de base de l’électronique de puissance et de l’électronique, et donc très largement utilisés. Responsables de 30 % des défaillances des systèmes dont ils sont constitutifs [1], la prédiction de leur durée de vie est un enjeu clé permettant à la fois d’en améliorer la fiabilité et d’optimiser les maintenances. Un condensateur film métallisé est constitué de films plastiques de l’ordre du μm sur lequel est vaporisée une fine couche de métallisation de quelque nm. Les films diélectriques les plus utilisés sont le polypropylène et le polyester. Usuellement pour augmenter la capacité volumique, les films sont enroulés sur eux-mêmes comme illustré sur la Fig.1 puis le bobineau ainsi constitué encapsulé dans un boîtier de protection.

Une première méthode estimer leur durée de vie consiste à se baser sur la physique des défaillances. Les condensateurs films métallisés sont principalement sujet aux mécanismes de vieillissement que sont la corrosion et l’auto-cicatrisation décrits dans diverses études [2]. La corrosion est le processus d’oxydation des métaux que sont le zinc et l’aluminium constitutifs des électrodes. Ce phénomène dépend de la température, de l’humidité et est renforcé par une tension alternative, permettant par électrolyse la production d’ions hydroxydes. La présence de tension et de température induit également des phénomènes d’auto-cicatrisation. Les impuretés présentes dans le diélectrique mènent à la formation d’arcs électriques qui vaporisent à la fois l’impureté mais aussi la métallisation des électrodes du fait de leur faible épaisseur (cf. Fig.1). Par conséquent, la rigidité diélectrique du condensateur est restaurée. La décharge transperce le diélectrique seulement localement. En considérant ce phénomène majoritaire et la perte de capacité identique à chaque occurrence, la modélisation de ce phénomène a mené à l’élaboration de nombreux modèles basés sur des processus stochastiques [3], [4], [5].

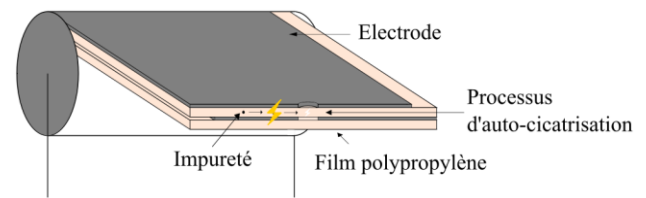


Fig. 1. Processus d’auto-cicatrisation d’un condensateur à film métallisé

Une deuxième méthode consiste à proposer des lois de vieillissement empiriques basées sur la dégradation des indicateurs clés que sont la capacité et l’ESR (Résistance Série Equivalente) [6] ou la quantification de l’influence des facteurs de stress que sont la température, l’humidité et la tension [7], [8]. Ces dernières peuvent se révéler non robustes aux changements de conditions de vieillissement et nécessiter l’obtention au préalable d’une première durée de vie obtenue par le biais de vieillissement accélérés dans des conditions environnementales connues. Usuellement la fin de vie des condensateurs est considérée pour une perte de capacité de 5% à 20% [9]. Dans la pratique, cette limite dépend de la fonction remplie par les condensateurs au sein de leur système. Cette étude présente et analyse les résultats de tests de vieillissement accéléré : dans un premier temps, jusqu’au seuil de fin de vie usuel et, dans un deuxième temps, au-delà de ces mêmes limites afin de respectivement évaluer et affiner les lois de vieillissement actuelles.

2. CONDITIONS DE TEST

Les condensateurs vieillies sont des condensateurs à film polypropylène métallisé de $2,2 \mu\text{F}$, 330 V AC de tension nominale (V_n), utilisés pour filtrer les interférences électromagnétiques. 7 condensateurs de 3 fabricants différents ont été soumis à 2 essais sur une durée de 3 mois et des conditions fixes en température, tension et humidité. Les conditions sont détaillées dans le tableau 1.

Tableau 1. Conditions expérimentales

	Température	Humidité relative	Tension
Essai 1	85°C	85 %	1. V_n (330 V AC 50Hz)
Essai 2	85°C	85 %	1,1. V_n (363 V AC 50Hz)

La tension 330V AC a été obtenue à l'aide d'un autotransformateur triphasé. Pour chacune des tensions composées à ces bornes, 7 condensateurs d'un fabricant ont été placés en parallèle. Un onduleur a été utilisé en amont afin de garantir la stabilité de la valeur de tension ainsi que de sa fréquence de 50Hz.

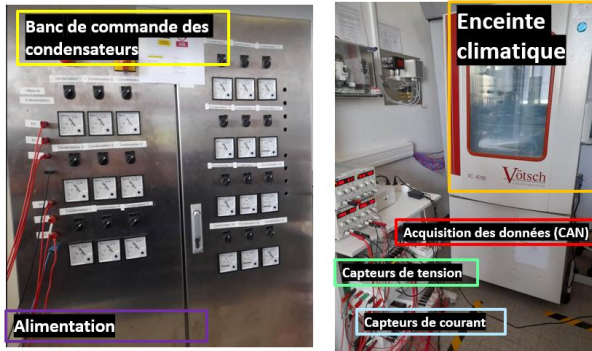


Fig. 2. Photo du banc conçu pour effectuer les essais de vieillissement

Le courant dans chaque condensateur ainsi que la tension à leurs bornes ont été mesurés à 1kHz avec une précision de respectivement 2% et 2.5%. Des filtres passe-bas à 1kHz ont été ajoutés en aval de chaque capteur à partir du second essai afin de s'affranchir des restes des harmoniques de courant générés par la fréquence de découpage de l'onduleur. Le courant efficace I_{rms} et la tension efficace U_{rms} ont été calculés à partir de la moyenne quadratique des signaux correspondants sur une durée d'une seconde. En considérant la pulsation ω constante à cause de la fréquence fixe 50Hz, la capacité, en négligeant l'ESR, a pu être déterminée selon l'équation ci-dessous.

$$C = \frac{I_{rms}}{U_{rms} \cdot \omega} \quad (1)$$

3. RESULTATS

3.1. Courbes de vieillissement

Sans surprise, l'augmentation de la tension accélère le processus de dégradation. Bien que les formes des courbes soient similaires, on observe une grande disparité dans la valeur finale de capacité obtenue entre les fabricants comme illustré sur la Fig 3.

ΔC en ordonnée représente la variation de la capacité dans le temps.

$$\Delta C(t) = \frac{C(t)}{C_{initiale}} \quad (2)$$

Durant les premières dizaines ou centaines d'heures de vieillissement des condensateurs, selon les fabricants, la capacité subit peu de variation. La vitesse de dégradation augmente ensuite, illustrant la loi exponentielle (Eq. 3) de l'étude [6] avec A, B et λ des constantes.

$$C(t) = A - B \cdot \exp(\lambda \cdot t) \quad (3)$$

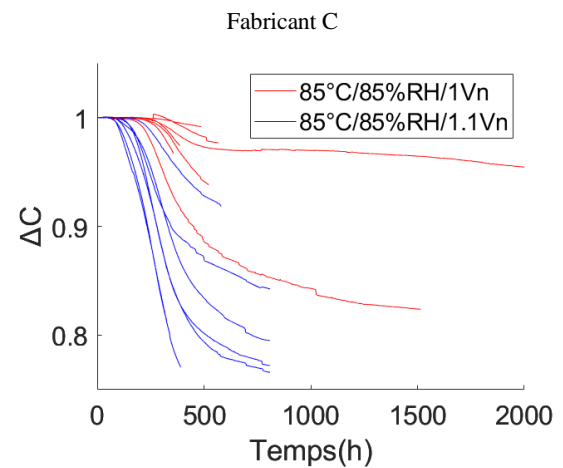
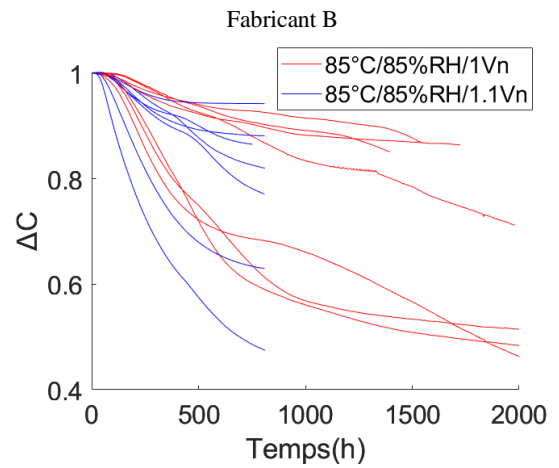
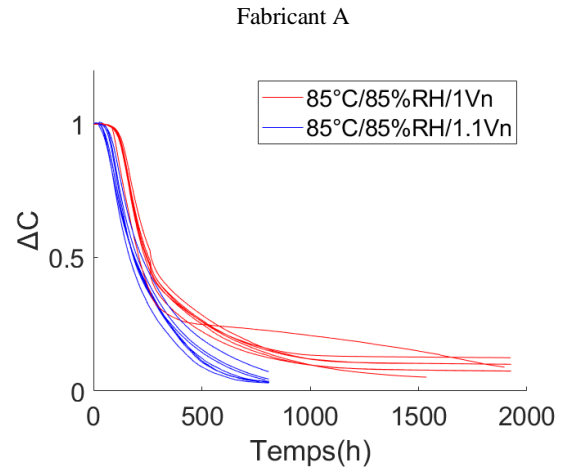


Fig. 3. Dégradation de la capacité des condensateurs selon différents fabricants

Dans un second temps, un ralentissement survient jusqu'à un seuil limite de variation de la capacité. Ce ralentissement est cohérent avec la loi exponentielle inverse (Eq. 4) tirée de l'étude [5], avec A, B et λ des constantes :

$$C(t) = A + B \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad (4)$$

Cependant, ces deux lois ne prennent pas en compte la totalité des phénomènes.

3.2. Analyse post-mortem des films métallisés

Une analyse post mortem des films permet de constater que la réduction de la capacité est due à la réduction de la surface des électrodes. On observe premièrement comme illustré sur la Fig. 4 que la métallisation a fortement été attaquée sur les bords pour les condensateurs des fabricants A et B. Sur toutes les électrodes sont présentes des tâches démétallisées circulaires. Les films polypropylènes ne présentent pas de fissures et les tâches ne sont pas disposées symétriquement du point de vue du diélectrique, sur chacune des deux électrodes. L'auto-cicatrisation ne peut donc pas être retenue comme en étant la cause [10]. Par conséquent, il s'agit de corrosion [2]. L'aluminium s'oxyde en alumine (Al_2O_3) et le zinc en oxyde ou hydroxyde de zinc (ZnO , $\text{Zn}(\text{OH})_2$). Cette hypothèse est renforcée par la non-homogénéité des électrodes dégradées : on observe des zones grises et noires. Une métallisation non rongée apparaît de couleur noire. Au fur et à mesure qu'elle est attaquée, une couche d'oxyde apparaît sur la métallisation, la rendant grise à l'œil nu. Lorsque la métallisation est complètement oxydée, elle apparaît transparente et laisse voir le film. Ce phénomène élimine la métallisation progressivement. Au contraire, lors d'une auto-cicatrisation, la métallisation impactée disparaît complètement instantanément. L'électrode du fabricant C, bien que fortement oxydée, présente peu de zones complètement démétallisées contrairement aux autres fabricants. Ce constat est cohérent avec la relativement faible réduction de capacité associée. Une hypothèse, pour expliquer cette différence, est une composition des électrodes plus robuste à la corrosion.

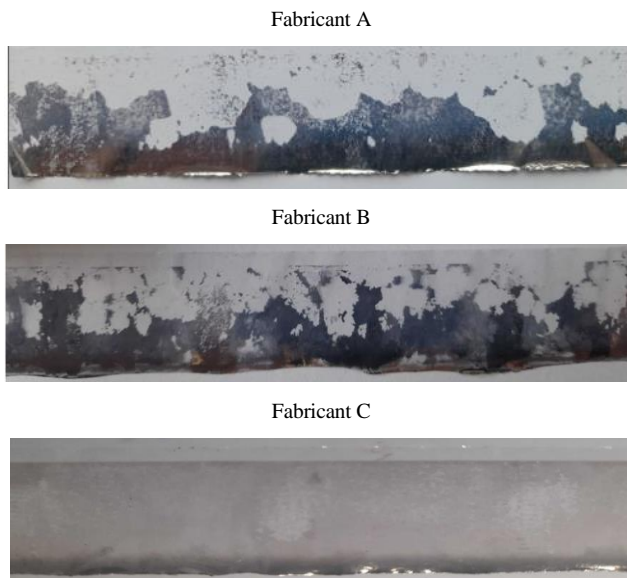


Fig. 4. Etat des films métallisés après vieillissement à 85°C/85%/Vn pour un condensateur de chaque fabricant

4. DISCUSSION

La corrosion étant une réaction chimique, sa vitesse de réaction dépend à la fois de la température qui agit comme un catalyseur mais aussi de la concentration des réactifs engagés,

soit de la quantité de métallisation non-oxydée. La très faible variation de la capacité en début de vieillissement est certainement due à la résine isolante contenue dans le boîtier des condensateurs, qui retarde l'action de l'humidité sur la métallisation. Ensuite, l'accélération de la dégradation s'explique par l'augmentation de la température interne induite et la présence de l'humidité qui a traversé le boîtier et se diffuse progressivement jusqu'à toutes les couches de métallisation. Le ralentissement de la dégradation jusqu'à un certain seuil s'explique par la diminution jusqu'à la disparition complète de la quantité disponible de métallisation oxydable. A ce titre, la loi de vieillissement doit donc converger vers une limite finie.

Malgré le fait que le phénomène d'auto-cicatrisation soit minoritaire, la loi exponentielle inverse tirée de l'étude [5] s'ajuste bien aux données de la deuxième partie de vieillissement, lors de la décélération de la dégradation. Sa modélisation se base sur le postulat que la perte de capacité est identique à chaque occurrence avec une fréquence d'apparition constante [5]. La perte de capacité, tout comme la capacité totale du condensateur est fonction de la permittivité du diélectrique $\epsilon_0 \epsilon_r$, de la surface A des électrodes en regard et de l'épaisseur du diélectrique d selon l'équation ci-dessous.

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

La permittivité, représentant la facilité des dipôles électriques à se polariser, est dépendante de la température et de la fréquence. Les conditions de stress étant invariantes, on peut considérer la permittivité du diélectrique constante. Par ailleurs, l'impact des phénomènes de défaillances sur l'épaisseur du diélectrique est négligeable, cette dernière étant 1000 fois supérieure à celle de la métallisation. De ce fait on peut supposer que la décroissance de capacité est directement reliée à la perte de surface des électrodes. Une occurrence correspond à une surface de métallisation équivalente perdue. Or la corrosion impacte la valeur de capacité précisément parce qu'elle diminue la surface des électrodes. En supposant l'épaisseur des électrodes constante et leur constitution homogène sur leur totalité, la métallisation sera rongée en épaisseur (nm) avec la même cinétique. La surface de métallisation perdue sera donc identique à chaque occurrence d'une bulle d'humidité. En considérant la vitesse de diffusion de l'humidité constante à l'intérieur du condensateur, la fréquence d'apparition de ces bulles sera constante jusqu'à la diffusion totale de l'humidité. A ce titre la loi exponentielle inverse (Eq. 4) reste pertinente, parce qu'elle modélise une perte de métallisation à fréquence constante.

La loi de dégradation finale doit cependant prendre en compte une modélisation de l'auto-cicatrisation en tant que telle pour être robuste en cas de dégradation sans humidité, en plus des éléments déjà cités précédemment.

Dans cet article, l'interpolation avec une fonction sigmoïde (Eq. 5 et 6 du tableau 2) et une somme d'exponentielles (Eq. 7 du tableau 2) est étudiée : la première parce qu'elle présente des phases d'accélération et de décélération, la deuxième parce qu'elle combine les deux lois exponentielles explicitées (Eq. 3 et 4) dans la littérature.

Dans une autre étude, des essais analogues à 85°C et sous tension nominale ont été menés pour des humidités relatives plus faibles de 60% et 30% [11]. Les formes de courbes obtenues apparaissent de forme similaire à celles présentées dans cet

article à un facteur de dilatation près. Ce résultat renforce la robustesse de la fonction qui s'ajustera le mieux à nos données.

5. INTERPOLATION

L'interpolation des données réelles avec les différentes fonctions de la littérature et celles proposées dans cet article s'est effectuée grâce à un algorithme d'optimisation [12] visant à minimiser l'erreur quadratique moyenne (MSE). Les coefficients des fonctions testées sont considérés positifs. Les résultats sont présentés dans le tableau 2, considérant la valeur de MSE comme la valeur moyenne des MSE pour chacun de 21 condensateurs.

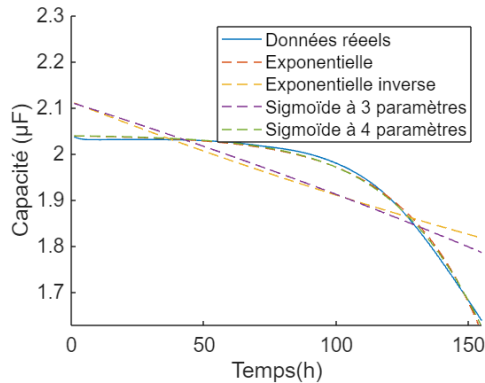


Fig. 5. Interpolation de la dégradation de la capacité jusqu'à 20% d'un condensateur selon différentes fonctions

Tableau 2. MSE moyenne d'interpolation des 21 condensateurs pour les deux essais : pour une dégradation de 20% puis totale de la capacité

Fonctions	Etudes	MSE (µF) ΔC < 20%	MSE totale (µF)
Exponentielle : $C(t) = A - B.exp(\lambda.t)$ (3)	[6]	0.0019	0.0449
Exponentielle inverse : $C(t) = A + B.exp(-\lambda.t)$ (4)	[5]	0.0017	0.0329
Sigmoïde à 3 paramètres : $C(t) = A - \frac{1}{B+exp(-\lambda.t)}$ (6)		0.0107	0.0082
Sigmoïde à 4 paramètres : $C(t) = A - \frac{1}{B+D.exp(-\lambda.t)}$ (7)		2.6856e-4	0.0027
Somme d'exponentielles : $C(t) = A - B.exp(\lambda.t) + C.exp(-\beta.t)$ (8)		6.3082e-04	0.0022

Pour une dégradation de 20% de capacité dans nos conditions de vieillissement, la fonction (Eq. 3) tirée de l'étude [6] est la plus indiquée pour la majorité des condensateurs comme illustré par la Fig.5. Ce résultat est cohérent car cette fonction a été obtenue de manière empirique pour des conditions de tests similaire en tension, humidité et température que nos conditions. La fonction sommant les deux fonctions exponentielles (Eq. 8) n'apporte rien dans ce cas-ci étant donné qu'elle présente un résultat quasiment identique pour plus de paramètres à déterminer. Elle n'est donc pas représentée sur la Fig.5. La loi exponentielle inverse (Eq.4) est, dans ce cas, peu

pertinente. En cas de corrosion, l'hypothèse que la fréquence de disparition de la métallisation est constante est a priori fausse en début de vieillissement. Une explication probable serait la non prise en compte de la diffusion de l'humidité. Au contraire, la loi exponentielle (Eq. 3) la prendrait en compte à cause de son origine empirique dans des conditions de tests similaires.

Cependant pour une dégradation jusqu'à la fin de vie, les fonctions exponentielles et inverses présentent les plus grandes MSE et donc erreurs, au contraire des fonctions alternatives proposées. La fonction sigmoïde (Eq. 6) possède une plus petite erreur que celles-ci pour un même nombre de coefficients (3) à déterminer : elle est donc plus adaptée sur ce domaine. La fonction sommant les exponentielles (Eq. 8) donne des résultats similaires à la sigmoïde (Eq. 7). Elle est mathématiquement moins pertinente par son nombre de coefficients plus élevés. La sigmoïde (Eq.7) présente l'ajustement le plus intéressant au détriment d'un coefficient de plus que les fonctions de la littérature.

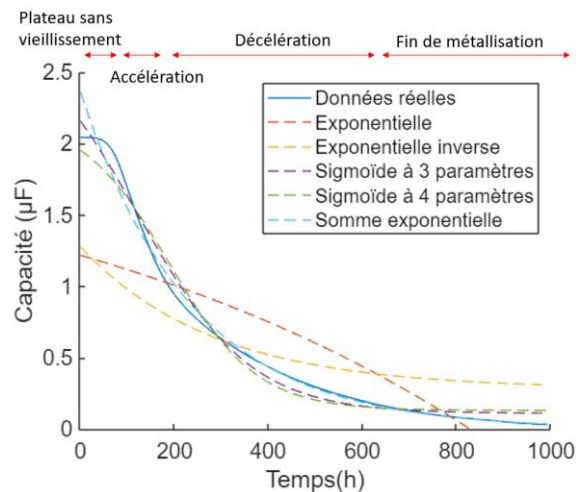


Fig. 6. Interpolation de la dégradation de la capacité d'un condensateur selon différentes fonctions

6. CONCLUSION

Les lois existantes dans la bibliographie sont mal adaptées pour une perte de la capacité de plus de 20%. Elles ne modélisent qu'une partie des phénomènes et il convient de les étendre. Une loi de vieillissement en sigmoïde semble être une meilleure option, possédant un bon compromis entre la MSE et le nombre de paramètres à déterminer, en particulier dans des environnements de forte humidité. La connaissance de ces lois de vieillissement permet d'anticiper au mieux les maintenances et d'optimiser l'utilisation des condensateurs au-delà de 20% de pertes de capacité. Une perspective du travail accompli est de relier ces lois à des équations de la physique des défaillances des condensateurs à film métallisé. Il serait également pertinent d'évaluer la robustesse des équations proposées pour d'autres conditions de vieillissement, en particulier pour des conditions de tests où la part d'auto-cicatrisation serait similaire à celle de la corrosion.

7. REFERENCES

- [1] U.-M. Choi, F. Blaabjerg, et K.-B. Lee, « Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, n° 5, p. 2517-2533, mai 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2373390.
- [2] N. Valentine, M. H. Azarian, et M. Pecht, « Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review », *Microelectronics Reliability*, vol. 92, p. 123-135, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.11.003>.
- [3] 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.
- [4] Z. Li *et al.*, « Lifetime Prediction of Metallized Film Capacitors Based on Capacitance Loss », *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 41, n° 5, p. 1313-1318, 2013, doi: 10.1109/TPS.2013.2243476.
- [5] M. Makdessi, A. Sari, et P. Venet, « Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation », *Microelectronics Reliability*, vol. 54, n° 9, p. 1823-1827, sept. 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.07.103.
- [6] J. Miao, Y. Liu, Q. Yin, S. Zhao, H. Li, et H. Wang, « A Dummy-Variable Model for Humidity-Influenced DC Film Capacitors Lifetime Estimation », *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, p. 1-1, 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3208065.
- [7] H. S. Endicott, B. D. Hatch, et R. G. Sohmer, « Application of the Eyring Model to capacitor aging data », in *Annual Report 1962 Conference on Electrical Insulation*, 1962, p. 47-50. doi: 10.1109/EIC.1962.7466672.
- [8] C. Lv, J. Liu, Y. Zhang, W. Lei, et R. Cao, « An improved lifetime prediction method for metallized film capacitor considering harmonics and degradation process », *Microelectronics Reliability*, p. 5, 2020.
- [9] « KEMET. K-LEM: Life Expectancy Model v2.0 [en ligne] Disponible sur :« <https://ksim3.kemet.com/film-lifetime> » (Consulté le 09/01/2023) ».
- [10] Y. Chen, H. Li, F. Lin, F. Lv, Z. Li, et 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, n° 4, p. 1301-1306, août 2011, doi: 10.1109/TDEI.2011.5976131.
- [11] 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, p. 422-425. doi: 10.1109/CEIDP.2018.8544882.
- [12] I. Ahmadianfar, O. Bozorg-Haddad, et X. Chu, « Gradient-based optimizer: A new metaheuristic optimization algorithm », *Information Sciences*, vol. 540, p. 131-159, nov. 2020, doi: 10.1016/j.ins.2020.06.037.