

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Détection des défauts d'arc par radiation électromagnétique utilisant la technologie des antennes

R. Charca-Benavente, J. Lezama, M. Clemente-Arenas, P. Schweitzer



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.52497/jitipee.v9i1.378

*Le sujet de cet article a été présenté lors du colloque sur les arcs électriques (CAE XVII)
les 17 et 18 mars 2025 à Limoges.*

L'article publié a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.

Détection des défauts d'arc par radiation électromagnétique utilisant la technologie des antennes

Rafael Charca-Benavente⁽¹⁾, Jinmi Lezama⁽²⁾, Mark Clemente-Arenas⁽²⁾, Patrick Schweitzer⁽¹⁾

⁽¹⁾ CNRS, Institut Jean Lamour (IJL), University of Lorraine, 54011 Nancy, France

⁽²⁾ Grupo de Circuitos y Sistemas Electrónicos de Alta Frecuencia CSE-HF-EPIET,
Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima 15834, Peru
rafael.charca@gmail.com

Résumé – Les défauts d'arc dans les systèmes électriques représentent un risque majeur pour la sécurité et nécessitent des méthodes de détection fiables. Alors que les techniques traditionnelles reposent sur l'analyse du courant, cette étude explore l'utilisation de la radiation électromagnétique émise lors des défauts d'arc pour leur détection. Une antenne fractale de Hilbert de quatrième ordre (HCFA) a été conçue, fabriquée et testée afin de capter les émissions électromagnétiques à large bande générées par les décharges d'arc. Les résultats expérimentaux révèlent une forte corrélation entre les variations brusques de tension et la radiation électromagnétique émise. L'analyse fréquentielle montre que le spectre de radiation est principalement concentré dans les bandes 22–44 MHz et 50–68 MHz. De plus, l'analyse par transformation de Fourier à court terme (STFT) met en évidence les caractéristiques temps-fréquence du rayonnement d'arc, permettant d'identifier précisément son initiation, sa durée et son extinction. Ces résultats confirment la faisabilité de la détection des arcs par radiation électromagnétique et ouvrent la voie au développement de systèmes de surveillance en temps réel basés sur des antennes pour les environnements électriques complexes.

Mots clés : Détection des défauts d'arc, radiation électromagnétique, antenne fractale, courbe de Hilbert, analyse temps-fréquence, STFT.

DOI : 10.52497/jitipee.v9i1.378

Introduction

Les défauts d'arc dans les systèmes électriques, tels que ceux se produisant dans les boîtiers électriques, les interrupteurs et les contacteurs, représentent un risque majeur pour la sécurité et nécessitent des méthodes de détection efficaces [1]. Les techniques conventionnelles reposent principalement sur l'analyse des signatures de courant pour identifier ces défauts [2]. Toutefois, afin d'améliorer les performances de détection, des approches alternatives, telles que la détection acoustique, l'imagerie thermique et la visualisation des arcs, sont également explorées [3-4]. Dans ce travail, nous examinons le potentiel de l'utilisation du rayonnement électromagnétique émis lors des défauts d'arc comme base pour leur détection. Notre approche repose sur la conception et la mise en œuvre d'antennes spécialisées capables de capter les signatures électromagnétiques caractéristiques de ces défauts. Dans un premier temps, nous avons reproduit et évalué un modèle d'antenne issu de la littérature, qui a déjà été utilisé avec succès pour la détection des défauts d'arc [5-7]. Ces antennes sont basées sur la structure d'antenne fractale de Hilbert (HCFA), qui présente une taille compacte et des caractéristiques large bande, les rendant adaptées à la détection des émissions électromagnétiques à large spectre associées aux phénomènes d'arc.

1. Conception de l'antenne

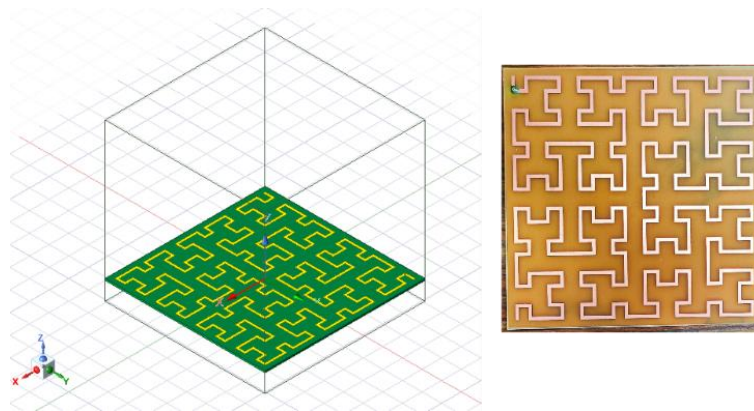


Figure 1 : Antenne conçue et fabriquée.

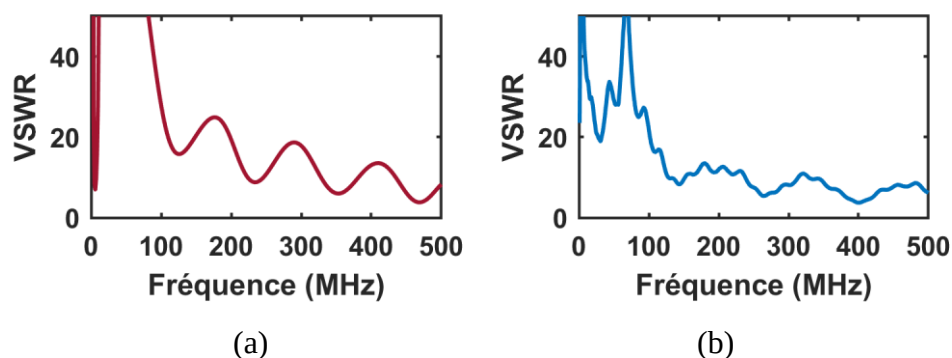


Figure 2 : Simulation et mesure du VSWR de l'antenne fractale de Hilbert de quatrième ordre. (a) Résultats simulés. (b) Résultats mesurés.

L'antenne proposée est conçue pour fonctionner comme un élément récepteur dans notre système de détection des défauts d'arc, où ses performances influencent directement la précision de la détection. Deux facteurs clés ont été pris en compte lors de sa conception. Tout d'abord, afin de garantir une installation facile dans les systèmes électriques tels que les boîtiers électriques, les interrupteurs et les contacteurs, ses dimensions physiques devaient être réduites au minimum. Ensuite, comme le rayonnement électromagnétique émis par un arc électrique couvre une large gamme de fréquences, de 0 à 500 MHz [8], l'antenne devait être capable de capter efficacement les signaux sur l'ensemble de ce spectre. Pour répondre à ces exigences, une antenne fractale de Hilbert a été sélectionnée en raison de sa compacité, de sa large bande passante, de sa sensibilité élevée et de sa grande résistance aux interférences [5-7]. Le choix de l'itération d'ordre quatre a été motivé par des analyses de simulation indiquant un équilibre optimal entre la complexité de l'antenne, la miniaturisation réalisable et la réponse en fréquence large bande, particulièrement adaptée à la détection efficace du rayonnement électromagnétique dans la plage de 0 à 500 MHz. Les antennes fractales, telles que la conception de Hilbert, sont couramment utilisées dans les applications à large bande et à bandes multiples, en raison de leur géométrie particulière permettant une miniaturisation significative sans compromettre les performances électromagnétiques [9–10]. Parmi les avantages majeurs des antennes fractales, l'utilisation efficiente de la surface disponible favorise un meilleur transfert d'énergie entre la ligne d'alimentation et les ondes rayonnées. Ceci conduit à une amélioration de l'adaptation d'impédance, de la capacité de fonctionner à plusieurs fréquences de résonance grâce à la nature auto-similaire des fractales. On note également une réduction des fréquences de résonance par rapport aux géométries traditionnelles de dimensions comparables ainsi qu'un processus de fabrication simplifié, facilement automatisable [11–13]. De plus, les antennes fractales peuvent avoir des propriétés électromagnétiques souhaitables sans nécessiter l'ajout d'éléments réactifs discrets, contrairement aux antennes conventionnelles [14].

Bien que diverses géométries fractales telles que celles de Koch, Minkowski et Sierpinski aient été largement étudiées pour des applications en antennes [15–17], la fractale de Hilbert a été spécifiquement choisie en raison de sa géométrie distinctive, constituée de segments mutuellement perpendiculaires remplissant de manière dense une surface carrée. Cette configuration particulière permet de réduire efficacement la fréquence de résonance, ce qui représente un avantage significatif pour les applications nécessitant des antennes compactes [18]. De plus, la longueur de la courbe fractale de Hilbert croît de manière exponentielle à chaque itération successive, permettant ainsi une miniaturisation importante tout en conservant de bonnes performances électromagnétiques [19].

Dans la conception des antennes, le rapport d'onde stationnaire en tension (VSWR) est un paramètre critique influençant les performances. Un VSWR idéal de 1 indique que toute l'énergie de rayonnement haute fréquence est reçue efficacement par l'antenne, tandis qu'un VSWR infini implique une réflexion totale empêchant la réception de l'énergie. Toutefois, les décharges d'arc génèrent un rayonnement électromagnétique intense sur une large gamme de fréquences et une antenne placée à proximité de l'arc peut encore capter cette énergie efficacement, même si le VSWR n'est pas optimal.

La conception de l'antenne a été réalisée à l'aide de ANSYS High Frequency Structure Simulator (HFSS), un outil de simulation électromagnétique commercial largement utilisé pour la conception et l'analyse d'antennes [20], permettant de déterminer des paramètres clés tels que les dimensions de l'antenne, l'ordre fractal, la largeur du conducteur, l'épaisseur du substrat diélectrique et la position du point d'alimentation. Il est important de noter que l'emplacement du point d'alimentation influence de manière significative les performances de l'antenne, en affectant directement l'adaptation d'impédance et l'efficacité globale [21]. Plusieurs positions d'alimentation ont été simulées afin d'identifier le point optimal assurant le meilleur équilibre entre la couverture en bande passante et les performances en termes de rapport d'ondes stationnaires (VSWR). Le point d'alimentation central a finalement été retenu, car il offrait le meilleur compromis entre ces paramètres critiques. La conception et le prototype fabriqué, produit par des techniques de gravure, sont présentés dans la Figure 1. L'antenne a été réalisée sous forme de structure fractale de quatrième ordre avec des dimensions de $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Le matériau FR4, un diélectrique ayant une permittivité relative de 4,6, a été choisi comme substrat. Les éléments conducteurs étaient constitués de couches de cuivre sur les deux faces du substrat, l'une servant d'élément rayonnant et l'autre de plan de masse. L'épaisseur du substrat est de 1,6 mm, tandis que la largeur du conducteur est de 2 mm.

Le rapport d'onde stationnaire en tension (VSWR) simulé de l'antenne fractale de Hilbert de quatrième ordre est présenté dans la Figure 2(a). Les résultats montrent que le VSWR atteint des valeurs élevées dans la bande 0–100 MHz avant de se stabiliser en dessous de 20 aux fréquences plus élevées. De même, comme illustré dans la Figure 2(b), le VSWR mesuré suit une tendance similaire, se stabilisant en dessous de 10 aux fréquences plus élevées. Malgré le VSWR élevé aux basses fréquences, l'antenne a réussi à capter le rayonnement électromagnétique émis par la décharge d'arc, démontrant ainsi son efficacité pour l'application visée.

2. Dispositif expérimental

Afin d'évaluer les performances de l'antenne proposée pour la détection du rayonnement électromagnétique émis par les défauts d'arc, un dispositif expérimental a été conçu, comme illustré dans la Figure 3. Ce montage comprend une alimentation CHROMA 62000H fournissant 270 V en courant continu, un générateur de défauts d'arc composé de deux électrodes en cuivre (diamètre de 6,3 mm), une banque de résistances variables (de 12Ω à 240Ω) permettant d'ajuster les conditions du circuit. Nous utilisons un oscilloscope LECROY HDO4096 avec une fréquence d'échantillonnage de 500 MHz pour l'acquisition des signaux. L'antenne fractale de Hilbert de quatrième ordre (HCFA) a été placée à proximité des électrodes afin de capter le rayonnement électromagnétique émis. Plus précisément, l'antenne a été placée à une distance fixe de 15 cm de l'intervalle de l'arc, une valeur déterminée expérimentalement pour fournir un signal fort et stable sans saturer le récepteur. Cette distance permet de trouver un compromis entre la mesure d'un rayonnement de forte intensité tout en évitant des effets de saturation ou de couplage en champ proche. Cette configuration permet d'étudier de manière contrôlée le rayonnement induit par l'arc et d'assurer une mesure et une analyse précise des signaux électriques et radiatifs.

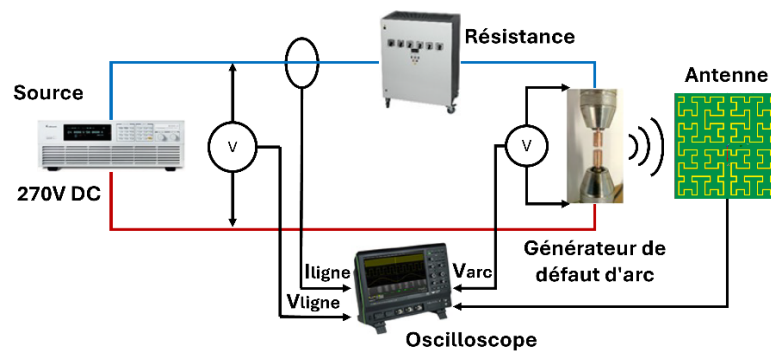


Figure 3 : Représentation schématique du dispositif expérimental.

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse temporelle

Le courant du circuit dans cette expérience était de 11,2 A. Les signaux enregistrés de tension et de rayonnement électromagnétique sont présentés dans la Figure 4(a). La courbe bleue de la Figure 4(a) représente l'évolution temporelle de la tension d'arc. Comme on peut l'observer, les niveaux caractéristiques de tension varient entre 12,1–16,5 V et 0,5–2 V. Avant t_1 , les deux électrodes étaient en contact direct et aucun arc n'était présent. Cependant, une chute de tension de 0,5–2 V a été enregistrée en raison de la forte résistance de contact entre les électrodes. À t_1 , la séparation des électrodes a initié l'arc électrique.

Pendant la période t_1 – t_2 , l'arc a été maintenu, entraînant une variation continue de la tension d'arc. Simultanément, l'antenne a détecté un rayonnement électromagnétique, comme le montre la courbe de couleur noire de la Figure 4(a). Ce signal présente des fluctuations importantes, correspondant à la nature instable du processus de décharge de l'arc. Le rayonnement électromagnétique détecté suit les variations de la tension d'arc, révélant une forte corrélation entre les caractéristiques électriques de l'arc et les signaux rayonnés.

À t_2 , l'arc s'est éteint, provoquant une chute brutale de la tension et une diminution correspondante des émissions électromagnétiques. Pour analyser plus en détail cette relation, la Figure 4(b) présente un agrandissement du premier pic de tension et de sa réponse électromagnétique correspondante. L'impulsion de tension ainsi que le rayonnement détecté affichent une forme d'onde oscillatoire amortie, indiquant un comportement transitoire commun. Cela suggère que les transitions rapides de tension dans la décharge d'arc génèrent de fortes émissions électromagnétiques de courte durée, que l'antenne proposée capte efficacement.

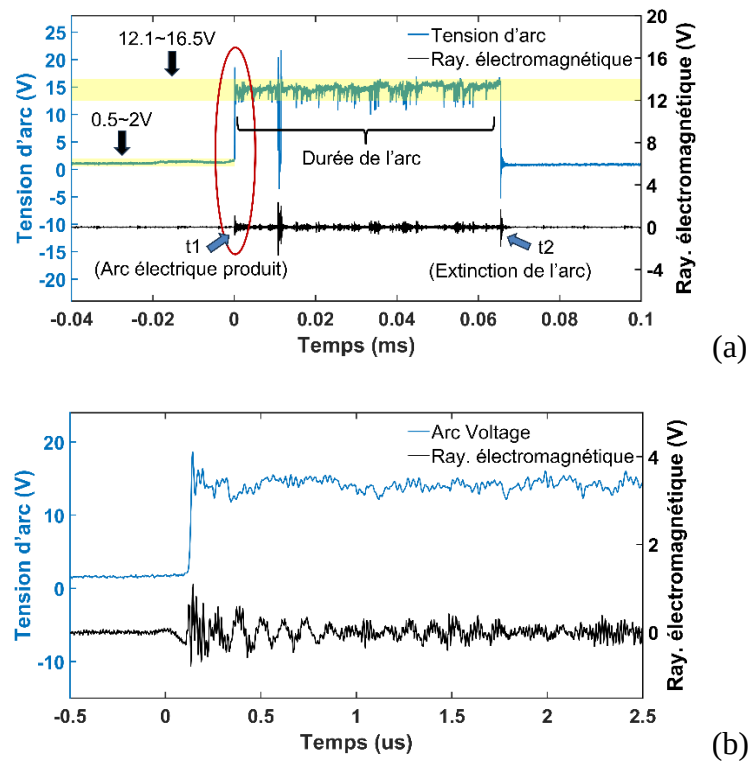


Figure 4 : Tension d'arc et rayonnement électromagnétique lors d'un événement d'arc.
 (a) Réponse dans le domaine temporel. (b) Vue détaillée de la première impulsion de tension et du rayonnement associé.

3.2. Analyse fréquentielle

Les signaux dans le domaine temporel sont fortement influencés par les caractéristiques de la charge, qui peuvent être complexes dans des applications réelles comme les systèmes électriques. Cette complexité rend difficile la distinction entre les fluctuations de tension causées par des décharges d'arc et celles résultant d'autres facteurs externes. Pour améliorer la précision de la détection des arcs, une analyse dans le domaine fréquentiel a été réalisée.

La Figure 5 présente la transformation de Fourier rapide (FFT) du premier pic de la tension d'arc et du rayonnement électromagnétique correspondant, illustrés dans la Figure 4(b). Les résultats indiquent que le rayonnement électromagnétique généré par l'arc couvre une large gamme de fréquences, de 0 à 100 MHz. Toutefois, les composantes spectrales les plus significatives sont concentrées dans deux bandes distinctes : 22–40 MHz et 50–69 MHz.

Une comparaison des spectres de tension et de rayonnement électromagnétique révèle une forte corrélation entre les deux signaux. Comme le montre la Figure 5, les pics de résonance dans la bande 22–40 MHz coïncident dans les deux spectres, indiquant que les fluctuations de tension de l'arc et le rayonnement électromagnétique émis partagent des caractéristiques fréquentielles similaires. En revanche, les composantes spectrales observées dans la plage de 50 à 69 MHz apparaissent majoritairement dans le rayonnement électromagnétique et ne sont pas clairement présentes dans le spectre de tension. Cette observation suggère qu'au-delà des fluctuations de tension de l'arc, des émissions supplémentaires à haute fréquence pourraient être générées par

d'autres phénomènes physiques survenant lors du processus de décharge. Il s'agit notamment de mécanismes radiatifs secondaires, tels que des variations transitoires de courant ou des oscillations à haute fréquence induites par la dynamique du plasma de l'arc, ainsi que par des éléments parasites inductifs et capacitifs présents dans le circuit. Bien que ces effets ne produisent pas nécessairement de variations significatives dans la forme d'onde de la tension, ils peuvent engendrer des émissions rayonnées qui sont efficacement captées par l'antenne.

Ces résultats confirment que l'analyse fréquentielle est une approche précieuse pour distinguer les signaux liés aux arcs des autres perturbations électriques. En identifiant les composantes fréquentielles caractéristiques, le système de détection peut améliorer sa précision et reconnaître plus efficacement les décharges d'arc dans des environnements complexes.

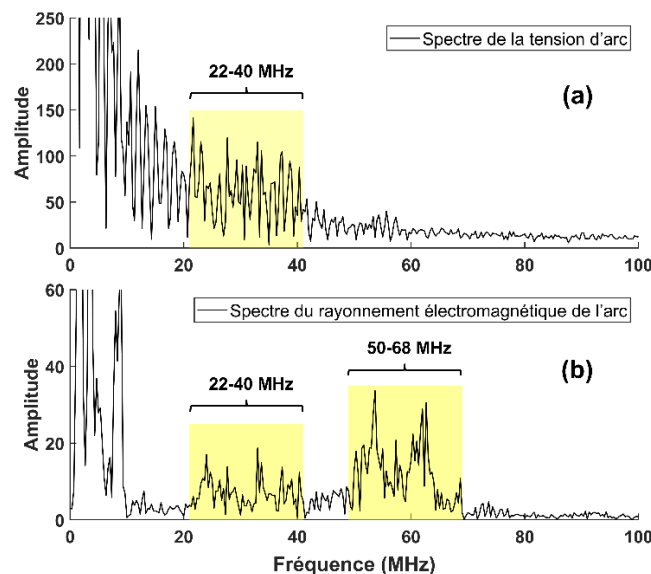


Figure 5 : Analyse fréquentielle de la tension d'arc et du rayonnement électromagnétique.
 (a) FFT de la tension d'arc. (b) FFT du rayonnement électromagnétique correspondant.

3.3. Analyse temps-fréquence

Les événements d'arc présentent des composantes fréquentielles caractéristiques pouvant être utilisées pour leur identification. Toutefois, afin d'obtenir des informations plus détaillées sur la durée et l'extinction de l'arc, une analyse conjointe dans les domaines temporel et fréquentiel a été réalisée. La transformation de Fourier à court terme (STFT) a été appliquée pour examiner l'évolution temporelle du spectre du rayonnement électromagnétique, comme illustré dans la Figure 6.

À t_1 , l'amorçage de l'arc est observé, entraînant l'apparition de fortes composantes de rayonnement électromagnétique. Le spectrogramme met en évidence des bandes sombres correspondant aux principales bandes de fréquences situées entre 22–40 MHz et 50–68 MHz, indiquant que l'arc génère une énergie significative dans ces plages de fréquences. La barre sombre représente l'ensemble de la durée de l'événement d'arc, confirmant que les émissions électromagnétiques persistent tant que l'arc est actif.

Pendant l'intervalle t_1 – t_2 , de légères fluctuations de l'intensité du signal sont observables, ce qui peut être attribué à l'influence des forces électromagnétiques et de la poussée thermique affectant la stabilité de l'arc. Ces fluctuations se répercutent directement sur le signal rayonné, renforçant ainsi la relation entre les variations de tension et le rayonnement électromagnétique émis.

À t_2 , l'arc s'éteint, entraînant une disparition brutale des bandes sombres dans le spectrogramme. La puissance spectrale dans les bandes de fréquences dominantes diminue rapidement, confirmant qu'aucun rayonnement électromagnétique significatif n'est généré une fois l'arc interrompu. L'analyse révèle également que le temps d'extinction de l'arc était de 0,065 ms, déterminé par la disparition des composantes fréquentielles dans les résultats de la STFT.

Cette approche en domaine temps-fréquence constitue une méthode plus complète pour caractériser le comportement des arcs électriques, permettant une détection précise de leur initiation, de leur durée et de leur extinction. Les résultats confirment que les composantes fréquentielles du rayonnement émis sont fortement corrélées aux fluctuations de tension, faisant de l'analyse temps-fréquence une technique fiable pour la détection des défauts d'arc et leur différenciation par rapport aux autres perturbations électriques.

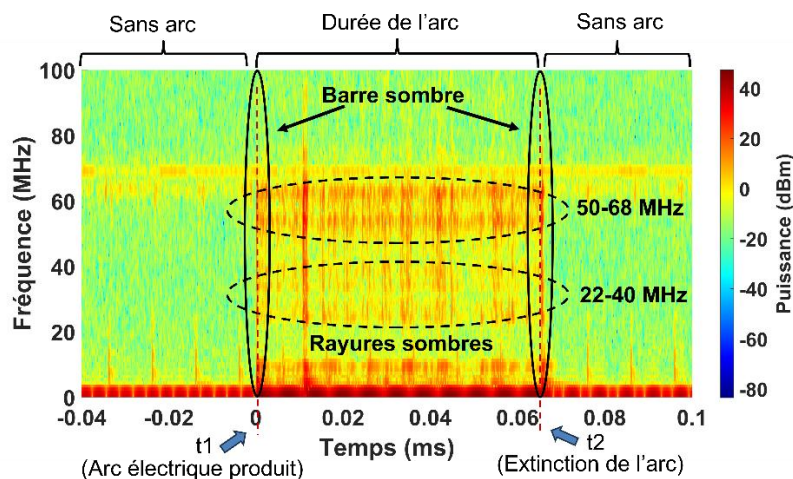


Figure 6 : Analyse temps-fréquence du signal de rayonnement électromagnétique.

Conclusion

Une antenne fractale de Hilbert de quatrième ordre a été simulée et réalisée dans le cadre de ce travail pour la détection de défauts d'arcs électriques. Le test de cette antenne a montré que les impulsions de rayonnement électromagnétique étaient directement associées aux variations brusques de tension lors des phénomènes d'arc. Ces impulsions présentaient une oscillation amortie de courte durée, reflétant le caractère transitoire des émissions générées par l'arc.

Dans cette étude, le contenu spectral du signal de rayonnement électromagnétique s'est révélé distribué sur une large gamme de fréquences, avec une concentration d'énergie significative dans les bandes 22–44 MHz et 50–68 MHz. La présence de ces composantes fréquentielles confirme l'influence de l'arc sur l'environnement électromagnétique avoisinant.

L'application de la transformation de Fourier à court terme (STFT) au signal de rayonnement électromagnétique a permis d'extraire des caractéristiques clés, notamment les motifs de récurrence, la bande passante occupée et la répartition de la puissance. De plus, elle a permis de déterminer avec précision des paramètres critiques tels que le moment d'amorçage de l'arc, son extinction et sa durée totale, éléments essentiels pour un diagnostic précis des défauts.

La forme du spectre STFT reste cohérente à chaque amorçage et extinction du défaut d'arc, suggérant un modèle d'émission reproductible. Cela renforce le potentiel de mise en place d'un système automatisé de détection des arcs basé sur l'analyse spectrale.

Les travaux futurs se concentreront sur la conception d'une nouvelle géométrie d'antenne capable de détecter à la fois les défauts d'arc et les décharges partielles, en couvrant une bande passante de plusieurs gigahertz.

Remerciements :

Ce travail est financé par le programme de l'École Doctorale LUE – ORION – de l'Université de Lorraine.

Références

- [1] A.H. Omran, D.M. Said, S.H. Abdulhussain, S.M. Hussin, N. Ahmad, (2021) "Models, detection methods, and challenges in DC arc fault: A review", Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) 83(4), 1-16.
<https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v83.15101>
- [2] H. Zhao, L. Jinpeng, and L. Junchao, (2022) "Series arc fault detection based on current fluctuation and zero-current features.", Electric Power Systems Research, 202, 107626.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107626>
- [3] K. C. Park, M. Yuichi, and R. Y. Jong, (2017) "Acoustic fault detection technique for high-power insulators.", IEEE Transactions on Industrial Electronics 64(12), 9699-9708.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2716862>
- [4] Ö. Baltacı, Z. Kırıl, K. Dalkılıç et O. Karaman, (2024) "Thermal image and inverter data analysis for fault detection and diagnosis of PV systems", Applied Sciences 14(9), 3671.
<https://doi.org/10.3390/app14093671>
- [5] Y. Meng, H. Yang, S. Chen, K. Hayat et X. Li, (2024) "A Comprehensive Analysis of Electromagnetic Characteristics for DC Arc Fault Detection", IEEE 69th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM). IEEE, pp. 1-6.
<https://doi.org/10.1109/HOLM56222.2024.10768662>
- [6] Q. Xiong, S. Ji, X. Liu, X. Li, L. Zhu, X. Feng, A.L. Gattozzi et R.E. Hebner (2018) "Electromagnetic radiation characteristics of series DC arc fault and its determining factors", IEEE Transactions on Plasma Science 46(11), pp 4028-4036.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2864605>
- [7] G. Gao, X. Yan, Z. Yang, W. Wei, Y. Hu, G. Wu, (2018) "Pantograph–catenary arcing detection based on electromagnetic radiation.", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 61(4), pp 983-989.
<https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2841050>

- [8] Charles J Kim, (2008) "Electromagnetic radiation behavior of low-voltage arcing fault", IEEE transactions on power delivery 24(1), pp 416-423.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2002873>
- [9] J. Anguera, A. Andújar, J. Jayasinghe, V. V. S. S. Chakravarthy, P. S. R. Chowdary, J. L. Pijoan, T. Ali and C. Cattani (2020) "Fractal antennas: An historical perspective", Fractal and Fractional 4.1 4(1), p 3.
<https://doi.org/10.3390/fractalfract4010003>
- [10] N. Sharma and V. Sharma, (2017). "A journey of antenna from dipole to fractal: A review", J. Eng. Technol 6.2 6(2), pp 317-351.
- [11] M. V. Rusu and B. Roman, (2010) "Fractal antenna applications" Microwave and millimeter wave technologies from photonic bandgap devices to antenna and applications. IntechOpen,
<https://pdfs.semanticscholar.org/0d91/0acfe632fb9028b47c8515c341851e8f0d26.pdf>
- [12] R.R. Boopathi, (2020) "A compendious review on fractal antenna geometries in wireless communication.", 2020 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). IEEE, ICICT, pp. 888-893.
<https://doi.org/10.1109/ICICT48043.2020.9112580>
- [13] A.J.H. Al-Saedi, J.C. Perez, (2022) "A Review: Microstrip Fractal antenna geometries.", Przegląd Elektrotechniczny 98.
- [14] X. Yang, J. Chiochetti, D. Papadopolous, L. Susman, (1999) "Fractal Antenna Elements and Arrays", Applied Microwave & Wireless, 11, pp 34-46.
<https://limpreur.info/books-and-magazines/Applied%20Microwave%20Magazine%201989%20to%202002/archives/1999/May1999/may1999-p34.pdf>
- [15] S. Tripathi, A. Mohan, S. Yadav, (2017) "A compact UWB Koch fractal antenna for UWB antenna array applications" Wireless Personal Communications 92
<https://doi.org/10.1007/s11277-016-3613-1>
- [16] E.C. Lee, P.J. Soh, N.B.M. Hashim, G.A.E. Vandenbosch, V. Volski, I. Adam, H. Mirza, M. Aziz, (2011) "Design and fabrication of a flexible Minkowski fractal antenna for VHF applications", Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE, pp. 521-524.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5782481>
- [17] A. Singh, S. Singh, (2016) "Design and optimization of a modified Sierpinski fractal antenna for broadband applications.", Applied Soft Computing 38, pp 843-850.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.013>
- [18] D. Froumsia, S.W. Yao, E.D. Jean-François, H. Alphonse, Kolyang, M. Inc (2022) "A review of the miniaturization of microstrip patch antenna based on fractal shapes", Fractals 30(05), 2240161.
<https://doi.org/10.1142/S0218348X22401612>
- [19] W. Sikorski, C. Szymczak, K. Siodła, F. Polak, (2018) "Hilbert curve fractal antenna for detection and on-line monitoring of partial discharges in power transformers", Eksploatacja i Niezawodność, 20(3), 343-351.
<https://bibliotekanauki.pl/articles/300766.pdf>
- [20] ANSYS, Inc. (2024). ANSYS HFSS - High Frequency Structure Simulator. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.
- [21] Y. Yin, S. Li, X. Yan, X. Zhao, Z. Lv, Y. Liu, (2023) "Design of Hilbert Fractal Antenna for Partial Discharge Detection in Cable Joints", International Conference on Wireless Power Transfer. Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 19-27.
https://doi.org/10.1007/978-981-97-0877-2_3