



Application du retournement temporel

Localisation de décharges partielles dans les transformateurs | Le retournement temporel permet de situer efficacement des décharges partielles dans les transformateurs. Basé sur la mesure des ondes générées par les décharges, il n'utilise qu'un seul capteur et est capable de localiser plusieurs décharges, et ce, même en présence de bruit et d'éléments internes placés entre la décharge partielle et le capteur.

HAMIDREZA KARAMI, MARCOS RUBINSTEIN, FARHAD RACHIDI, ROGER HASLIMEIER, OLIVIER DUCRY

La localisation de décharges partielles (DP) est cruciale pour de nombreuses applications : surveillance de transformateurs électriques, de postes à isolation gazeuse, de moteurs électriques, de supercondensateurs, ou de tout autre dispositif ou système pouvant être affecté par ce type de décharge. La localisation de ces décharges partielles peut être réalisée efficacement en utilisant le retournement temporel, une méthode basée sur la mesure des ondes électromagnétiques ou acoustiques générées par les décharges électriques. La méthode de retournement temporel

repose sur la propriété d'invariance du comportement d'un système lorsque le temps est inversé, une propriété qui s'applique à la grande majorité des lois de la nature, et en particulier aux ondes acoustiques et électromagnétiques. C'est cette propriété qui permet aux ondes de « remonter le temps » et de se focaliser à l'endroit précis où elles ont été émises.

En deux phases et six étapes

La mise en œuvre de la méthode de retournement temporel pour la localisation de décharges partielles implique six étapes (**figure 1**). Premièrement, l'ins-

tallation d'un ou de plusieurs capteurs acoustiques, électromagnétiques (UHF) ou d'une combinaison des deux à l'intérieur de la cuve du transformateur, ou, en ce qui concerne les capteurs acoustiques, sur la paroi extérieure de la cuve. Deuxièmement, la mesure en continu et le traitement des signaux provenant d'une ou de plusieurs décharges partielles selon les besoins (filtrage, débruitage, amplification, etc.), y compris leur numérisation et leur transmission à un ordinateur industriel ou à une autre unité de traitement. Troisièmement, l'identification de l'apparition de signaux

dus à des décharges partielles à l'aide d'un critère approprié tel que le franchissement d'une valeur seuil par les signaux acquis. Quatrièmement, le retournement temporel des signaux mesurés lors

des étapes précédentes. Cinquièmement, la rétropropagation par simulation des signaux retournés dans le temps dans le modèle acoustique/électromagnétique de la cuve du transformateur.

Et, sixièmement, la détermination de la position du maximum du champ électrique/acoustique dans la cuve du transformateur, qui correspond à l'emplacement des décharges partielles.

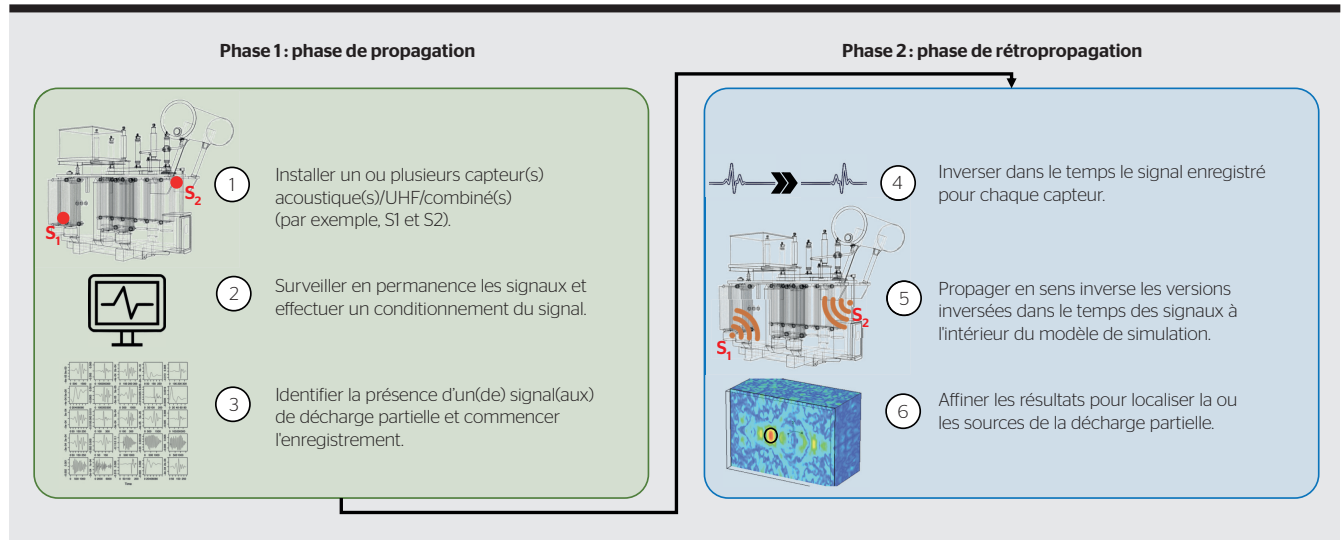


Figure 1 Schéma de la méthode de localisation des décharges partielles basée sur le retournement temporel dans les domaines électromagnétique et acoustique.

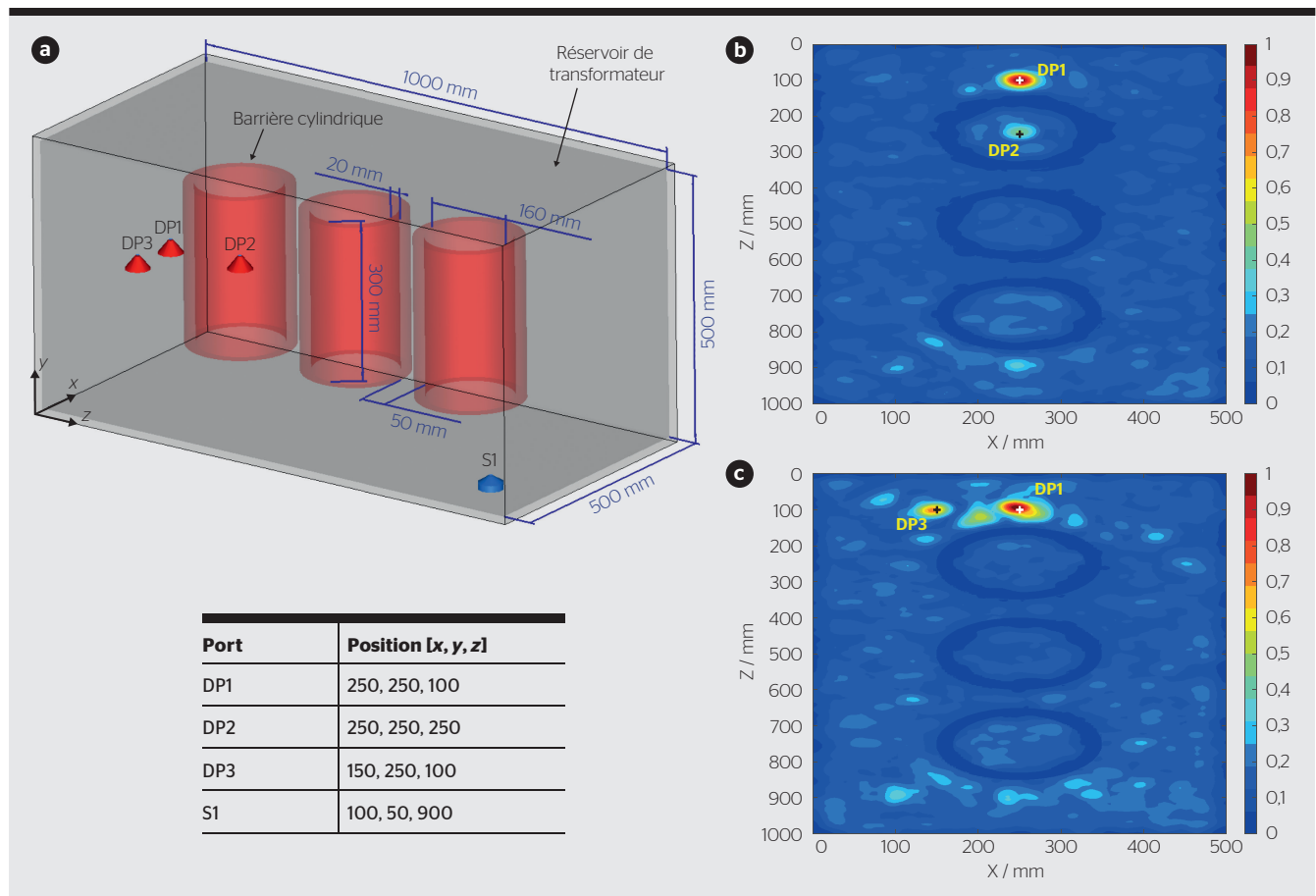


Figure 2 a) Modèle simplifié d'un transformateur de puissance. b) Distribution normalisée, dans le plan x-z et sur toute la durée de simulation, de la puissance maximale du champ électrique à l'intérieur du réservoir du transformateur pour les décharges partielles DP1 et DP2. c) Distribution normalisée, dans le plan x-z et sur toute la durée de simulation, de la puissance maximale du champ électrique à l'intérieur du réservoir du transformateur pour les décharges partielles DP1 et DP3.

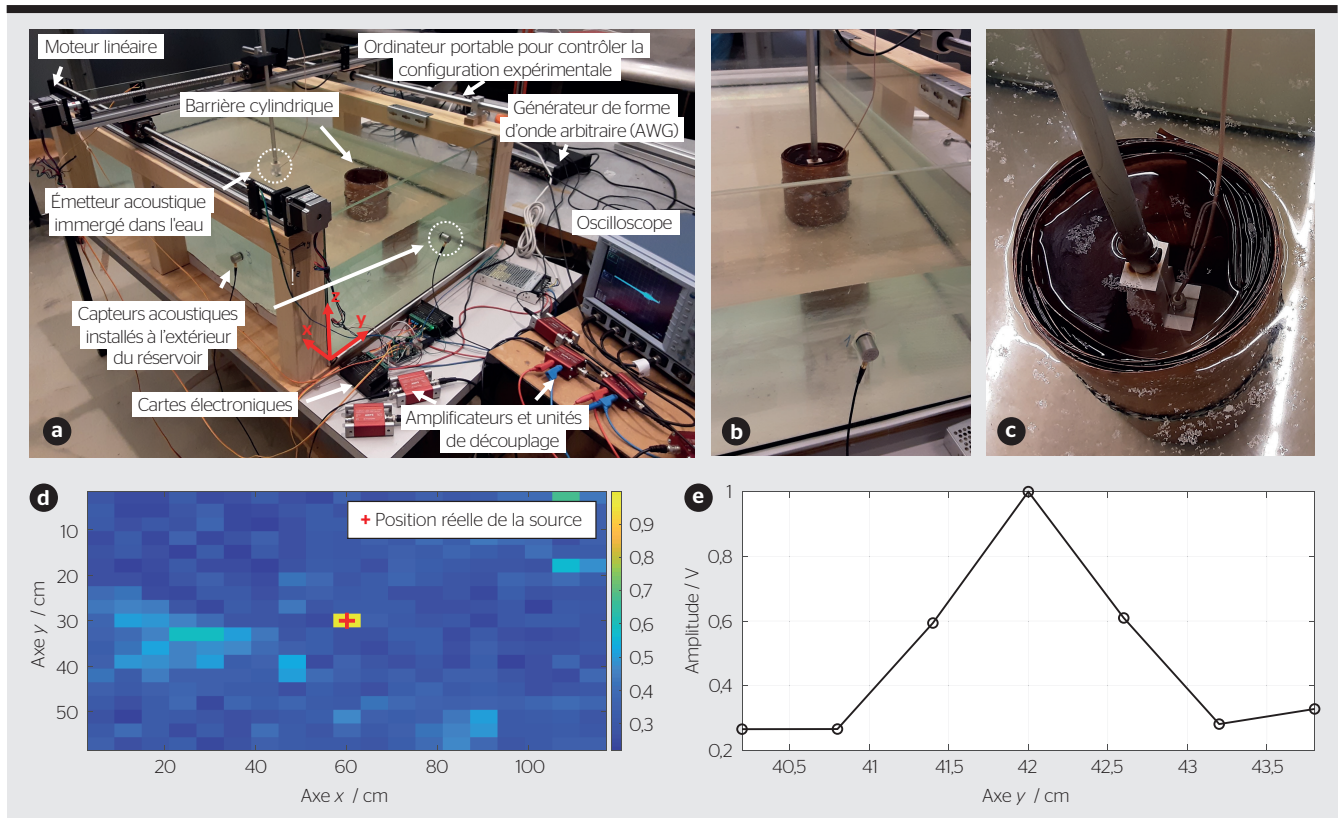


Figure 3 a) Configuration expérimentale, b) vue en perspective, c) vue de dessus de l'émetteur acoustique à l'intérieur de l'obstacle métallique multicouche, d) distribution normalisée de la pression maximale sur un plan horizontal du réservoir d'eau à $z=13$ cm, et e) pression normalisée pour un balayage à l'intérieur de l'obstacle métallique.

Si les trois premières étapes (phase de propagation) se déroulent dans l'environnement réel, les trois dernières (phase de rétropropagation) sont réalisées dans un environnement de simulation.

Localisation à l'intérieur d'un transformateur de puissance

La figure 2a montre un modèle de transformateur de puissance, simplifié intentionnellement afin d'illustrer le concept. Les emplacements de trois décharges partielles différentes (DP1, DP2 et DP3) et d'un capteur (S1) y sont indiqués. La figure 2b présente, quant à elle, la distribution normalisée dans le plan de coupe x-z du champ électrique maximal à l'intérieur du transformateur sur toute la durée de la simulation. Les emplacements réels des sources de décharge (DP1 et DP2) sont indiqués par des symboles «+». Dans ce cas de figure, un seul capteur (S1) est utilisé. Quant à la figure 2c, elle montre les mêmes résultats avec les décharges DP1 et DP3 activées. Les résultats présentés dans la figure 2 mettent bien en évi-

dence que la méthode de retournement temporel électromagnétique peut localiser les décharges partielles à l'intérieur du transformateur, et ce, même lorsque les composants internes du réservoir bloquent le trajet direct entre les décharges et l'unique capteur utilisé.

Validation expérimentale

Une installation expérimentale a en outre été réalisée afin de tester les performances de la méthode du retournement temporel pour la localisation des décharges partielles dans le domaine acoustique (figure 3a).

L'installation est composée d'un réservoir en verre ($120 \times 60 \times 35$ cm³) doté de parois de 6 mm d'épaisseur. Celui-ci a été rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 23 cm. Pour générer des signaux de décharges partielles à l'intérieur du réservoir, un émetteur acoustique piézoélectrique, dont la plage de fréquences s'étend de 100 kHz à 450 kHz, a été immergé dans l'eau (figures 3b et 3c). Un scanner bidimensionnel, contrôlé par deux moteurs linéaires et piloté par une

carte Arduino, a été installé sur le dessus du réservoir pour ajuster la position de l'émetteur acoustique (figure 3a).

Un générateur de forme d'onde arbitraire (Arbitrary Waveform Generator, AWG) a ensuite été utilisé pour produire le signal de décharge partielle souhaité. Une impulsion gaussienne avec une fréquence centrale de 100 kHz et une largeur de bande de 50 kHz a ainsi été transmise par l'émetteur acoustique immergé. Les signaux reçus par les capteurs acoustiques installés sur la paroi du réservoir ont alors été enregistrés et retournés dans le temps. Grâce à la théorie de la réciprocité, le signal retourné dans le temps de l'un des deux capteurs a pu être réinjecté dans le milieu à l'aide de l'émetteur acoustique immergé. La réinjection a été effectuée avec l'émetteur placé à plusieurs points sur un plan sélectionné à une hauteur $z=13$ cm. Ensuite, l'amplitude maximale du signal reçu par le capteur unique utilisé dans l'étape précédente a été déterminée.

La figure 3d affiche la distribution normalisée de la pression maximale sur un plan horizontal du réservoir d'eau

à $z=13$ cm. L'emplacement réel de la source est indiqué par un marqueur rouge «+». On peut observer que la méthode de retournement temporel acoustique a pu localiser avec précision les décharges partielles (avec une erreur de localisation nulle dans cet exemple).

Afin de pouvoir évaluer les performances de la méthode de retournement temporel acoustique lorsque la visibilité directe est obstruée, l'émetteur a été placé à l'intérieur d'une structure cylindrique multicouche en métal (similaire aux enroulements de transformateur) comme illustré dans les figures 3b et 3c. Celles-ci montrent respectivement une vue en perspective et une vue depuis le dessus de l'émetteur acoustique à l'intérieur du cylindre. La figure 3e présente, quant à elle, un balayage unidimensionnel le long de l'axe y . Dans cette expérience, l'emplacement réel de la décharge partielle se trouve à $y=42$ cm. Cette expérience démontre que même en présence d'un obstacle entre le capteur et la source, et avec une atténuation du signal due à celui-ci, la méthode de

retournement temporel acoustique peut localiser la source de décharge partielle derrière l'objet.

Conclusion

Cette analyse montre que les méthodes de retournement temporel acoustique ou électromagnétique peuvent localiser les sources de décharge partielle avec une grande précision à l'intérieur d'un enroulement, ou entre deux enroulements. Contrairement aux techniques classiques (par exemple celles basées sur la différence des temps d'arrivée) qui nécessitent plusieurs capteurs, le retournement temporel peut fonctionner avec un seul capteur et ne nécessite pas de visibilité directe entre le capteur et la décharge. En outre, les performances de la méthode ne sont aucunement dégradées par la présence d'obstacles ou de réflexions multiples.

Littérature complémentaire

→ F. Rachidi, M. Rubinstein, M. Paolone, « Electromagnetic Time Reversal: Application to EMC and Power Systems », John Wiley, 2017.

→ H. Karami, M. Azadifar, A. Mostajabi, M. Rubinstein, H. Karami, G. B. Gharehpetian, F. Rachidi, « Partial Discharge Localization Using Time Reversal: Application to Power Transformers », Sensors, Vol. 20, n° 5, 2020.

→ H. Karami, F. Q. Aviolat, M. Azadifar, M. Rubinstein, F. Rachidi, « Partial discharge localization in power transformers using acoustic time reversal », Electr. Power Syst. Res., Vol. 206, p. 107801, mai 2022.

Auteurs

Hamidreza Karami est chef de projet Ra&D à la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud.
→ HEIG-VD, 1400 Yverdon-les-Bains
→ hamidreza.karami@heig-vd.ch

Marcos Rubinstein est professeur à la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud.
→ marcos.rubinstein@heig-vd.ch

Farhad Rachidi est professeur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne.
→ EPFL, 1015 Lausanne
→ farhad.rachidi@epfl.ch

Roger Haslimeier est directeur technique chez Sparks Instruments SA.
→ Sparks Instruments SA, 1728 Rossens
→ roger.haslimeier@sparksinstruments.com

Olivier Ducry est directeur des ventes et du marketing chez Sparks Instruments SA.
→ olivier.ducry@sparksinstruments.com

Les auteurs tiennent à remercier l'EPFL (programme Enable) et la HEIG-VD (Institut ICT, Département TIC) pour leur soutien.

IN KÜRZE

Anwendung der zeitlichen Umkehr

Ortung von Teilentladungen in Leistungstransformatoren

Die Lokalisierung von Teilentladungen ist für viele Anwendungen entscheidend, insbesondere für die Überwachung von Leistungstransformatoren. Die hier vorgestellte Methode basiert auf der Messung von elektromagnetischen oder akustischen Wellen, die von elektrischen Entladungen erzeugt werden, und ermöglicht es, die Ausbreitung der Wellen zurückzuverfolgen, um den Ort zu finden, an dem sie entstanden sind.

Die Methode umfasst sechs Schritte. Erstens, die Installation eines oder mehrerer akustischer, elektromagnetischer oder einer Kombination aus beiden Sensoren im Inneren oder an der Transformatoraußenwand. Zweitens, die kontinuierliche Messung und Verarbeitung von Teilentladungssignalen. Drittens, das Erkennen von Teilentladungssignalen anhand eines geeigneten Kriteriums, wie etwa der Überschreitung eines Schwellenwerts. Viertens, die zeitliche Umkehr der in den vorherigen Schritten ge-

messenen Signale. Fünftens, die simulative Rückverbreitung der zeitlich rückgekoppelten Signale in das akustische/elektromagnetische Modell des Transformators. Und sechstens die Bestimmung der Position des Feldmaximums im Transformator, das dem Ort der Teilentladungen entspricht. Während die ersten drei Schritte (Ausbreitungsphase) in der realen Umgebung stattfinden, werden die letzten drei Schritte (Rückpropagationsphase) simuliert.

Die Ergebnisse zeigten, dass das zeitliche Umkehren die Quelle der Teilentladung genau lokalisieren kann. Zudem wurde nachgewiesen, dass das zeitliche Umkehren im Gegensatz zu herkömmlichen Techniken (z. B. solchen, die auf der Differenz der Ankunftszeiten basieren) mit einem einzigen Sensor arbeiten kann und keine direkte Sichtverbindung zwischen dem Sensor und der Entladung erfordert. Ausserdem wird die Leistungsfähigkeit der Methode nicht durch Hindernisse oder Mehrfachreflexionen beeinträchtigt.