

Détection d'arcs électriques séries par analyse temps-fréquence et traitement morphologique

Benoit Leprettre & Yvon Rebière

SCHNEIDER ELECTRIC – Centre de Recherches A2

Service Algorithmique et Traitement du Signal – 4 rue Volta – F-38050 GRENOBLE Cedex 9

Benoit_Leprettre@mail.schneider.fr

Résumé – Les arcs électriques séries peuvent endommager gravement les installations électriques, voire provoquer des incendies. Cet article décrit une méthode de détection des arcs séries basée sur l'analyse de la dérivée du courant. Une Représentation Temps-Fréquence (RTF) de ce signal (spectrogramme glissant) permet de mettre en évidence des motifs caractéristiques des arcs séries. Un traitement morphologique simple permet d'extraire les motifs d'arcs de la RTF et de quantifier l'importance du phénomène sous la forme d'un « degré de présence d'arc série ».

Abstract – *Electrical series arcs can severely damage electrical installations. A method for detecting these series arcs using the current derivative is proposed. A Time-Frequency Representation (TFR) of the signal allows to highlight features characteristic of series arcs. A simple morphological processing of the TFR allows to extract these features and to calculate a “degree of presence of series arcs” to quantify the phenomenon.*

1. Introduction

Les arcs séries sont produits dans les armoires électriques par des connexions défectueuses. Ils peuvent provoquer le soudage de plages de cuivre, et éventuellement dégénérer en arcs parallèles beaucoup plus énergétiques capables de provoquer des incendies.

Des méthodes ont déjà été développées pour détecter les arcs séries ou parallèles [1]. La plupart d'entre elles nécessitent des capteurs dédiés (acoustiques, lumineux) et ont des limites dans le cadre d'une installation en milieu industriel. Nous souhaitons détecter les arcs à partir des grandeurs électriques usuelles et dans un délai raisonnable (quelques 10ms à 1s après l'apparition du phénomène). En cas de détection d'un arc série, diverses mesures de protection peuvent être prises, depuis le simple avertissement de l'utilisateur jusqu'à l'ouverture du circuit.

La méthode proposée s'appuie sur l'analyse de la dérivée du courant, grandeur disponible dans tous les appareils de mesure ou de surveillance électrique. La partie 2 de cet article présente le dispositif expérimental que nous avons utilisé ainsi que quelques signaux typiques. La troisième partie expose notre méthode d'extraction des arcs séries et illustre son efficacité sur un exemple de signal difficile. Enfin, quelques pistes techniques à poursuivre sont présentées dans la partie 4.

2. Analyse des signaux

2.1 Dispositif expérimental

Afin de maîtriser au mieux les conditions expérimentales (type de charge, présence d'arcs ou non), les mesures ont été réalisées en laboratoire à l'aide du dispositif schématisé sur la figure 1. L'alimentation est alternative de fréquence 60Hz (les mesures ont été réalisées aux Etats-Unis).

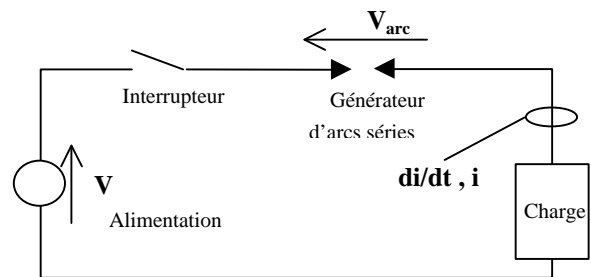


FIG. 1 : Dispositif expérimental. Les grandeurs recueillies sont indiquées en gras.

Deux électrodes mobiles permettent de créer à volonté des arcs séries. Les grandeurs mesurées sont : le courant dans le circuit, sa dérivée, la tension d'alimentation, et la tension aux bornes du générateur d'arcs (afin de valider les résultats de détection).

La charge a une grande importance. En effet, certaines charges (alimentations à découpage, ...) déforment beaucoup le courant passant dans le circuit. D'autres (moteurs) produisent des transitoires. Enfin, d'autres charges comme les postes à souder produisent naturellement des arcs qu'il ne faut pas confondre avec des arcs séries, sous peine de fausse alarme. C'est pourquoi les essais ont été réalisés avec des charges variées. L'accent a été mis sur les charges *a priori* difficiles à traiter.

2.2 Mise en évidence des motifs d'arcs séries

La figure 2(a) présente une mesure de dérivée du courant et avec une charge de type poste à souder et en l'absence d'arcs séries. La charge provoque des transitoires à chaque alternance du courant, donc régulièrement espacés de 8.3ms. La figure 2(b) montre une Représentation Temps-Fréquence (RTF) de ce signal obtenue par simple Transformée de

Fourier glissante. Les transitoires apparaissent sous la forme de motifs étroits couvrant la totalité de la bande.

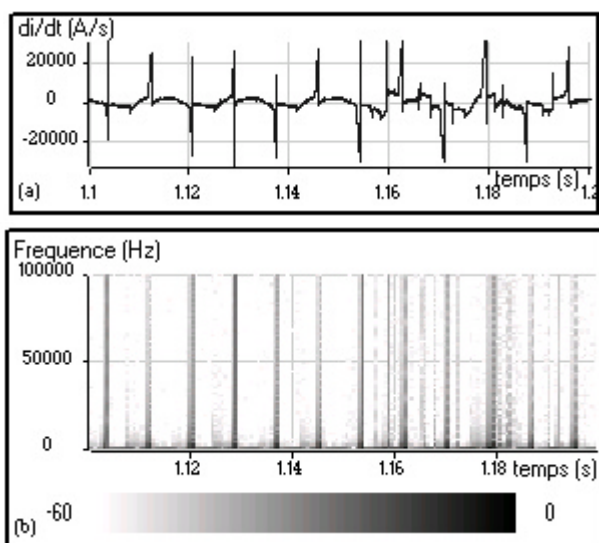


FIG. 2 : signal dérivée du courant pour un poste à souder en l'absence d'arcs (a) – Représentation Temps-Fréquence (RTF) en dB (b)

La figure 3(a) montre par comparaison le signal obtenu pour la même charge en présence d'arcs séries. Ces arcs forment des motifs qui se superposent aux perturbations produites par la charge et qui durent plus longtemps. Sur la RTF du signal, présentée figure 3(b), cela donne des motifs couvrant également toute la bande, mais de durée supérieure.

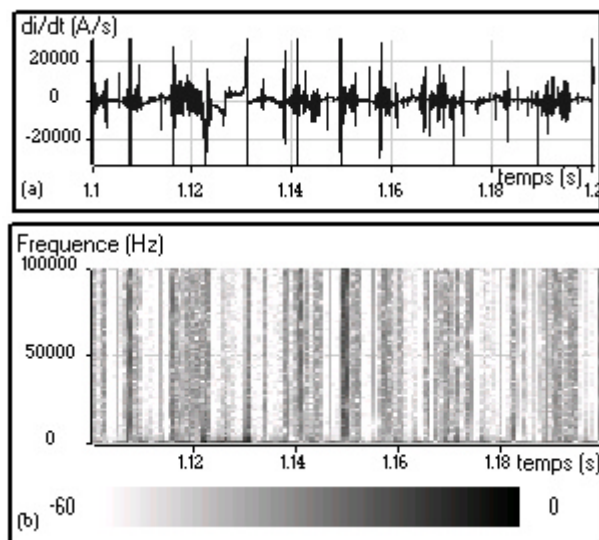


FIG. 3 : signal dérivée du courant pour un poste à souder en présence d'arcs séries (a) – RTF en dB (b)

Les motifs d'arcs séries ne sont pas nécessairement plus énergétiques que les motifs dus à la charge et couvrent le même domaine spectral. Par conséquent, une procédure simple consistant à seuiller le signal et/ou à le filtrer dans une bande de fréquence particulière ne permet pas de détecter les arcs de façon fiable. C'est pourquoi nous allons plutôt

exploiter le fait que les arcs séries provoquent des motifs assez régulièrement espacés et de durée assez longue.

3. Extraction des motifs d'arcs séries

Nous proposons d'utiliser les outils de base de la Morphologie Mathématique [2] pour extraire les motifs d'arcs. Des traitements morphologiques ont déjà permis de résoudre des problèmes concrets de détection et de classification [3][4].

3.1 Algorithme d'extraction

Les motifs d'arcs sont espacés d'environ 8.3ms et de durée sensiblement supérieure aux perturbations produites par la charge, elles aussi espacées d'environ 8.3ms. Nous proposons donc l'algorithme simple suivant :

1. Considérant un signal de dérivée du courant échantillonné à la fréquence F_e , choisir une longueur de fenêtre L_F et une longueur de décalage DL_F pour le calcul du spectrogramme. Pour avoir une résolution suffisante, il faut choisir L_F tel que $L_F * F_e \ll 8.3ms$.
2. Calculer le spectrogramme. Pour une application temps réel on choisira éventuellement une implémentation temps-réel [5]. Le nombre de pixels entre deux motifs verticaux dus à la charge est d'environ

$$D = 0.0083 * F_e / DL_F \quad (1)$$

3. Définir comme Elément Structurant Morphologique (ESM) un carré de taille $D_F < D/2$ pixels. Réaliser sur la RTF une fermeture pour connecter les éléments séparés de moins de 8.3ms, c'est-à-dire uniquement les motifs d'arcs.
4. Définir comme second MSE un carré de taille $D_O < D_F$ et réaliser une ouverture. Cette opération va effacer les éléments qui n'ont pas été connectés par l'opération précédente, c'est-à-dire entre autres les motifs dus uniquement à la charge.
5. Procéder à une binarisation de la RTF. Le seuil peut être calculé automatiquement par moyennage. Cette opération permet de ne pas tenir compte de l'énergie des motifs, pour ne garder qu'un critère de présence / absence de motifs d'arcs.
6. Sommer les pixels le long de chaque verticale de la RTF (axe des fréquences). Cette opération est un cas dégénéré de la Transformée de Hough permettant d'extraire les structures verticales [6]. Normaliser le résultat par $L_F/2$.

On obtient alors un signal temporel normalisé. Les valeurs proches de 1 indiquent la présence de structures verticales ayant résisté au traitement morphologique, c'est-à-dire des arcs séries. Les valeurs proches de 0 indiquent les endroits où les motifs de la RTF ont été presque totalement supprimés : bruit de fond, perturbations brèves dues à la charge, fréquences pures, ...

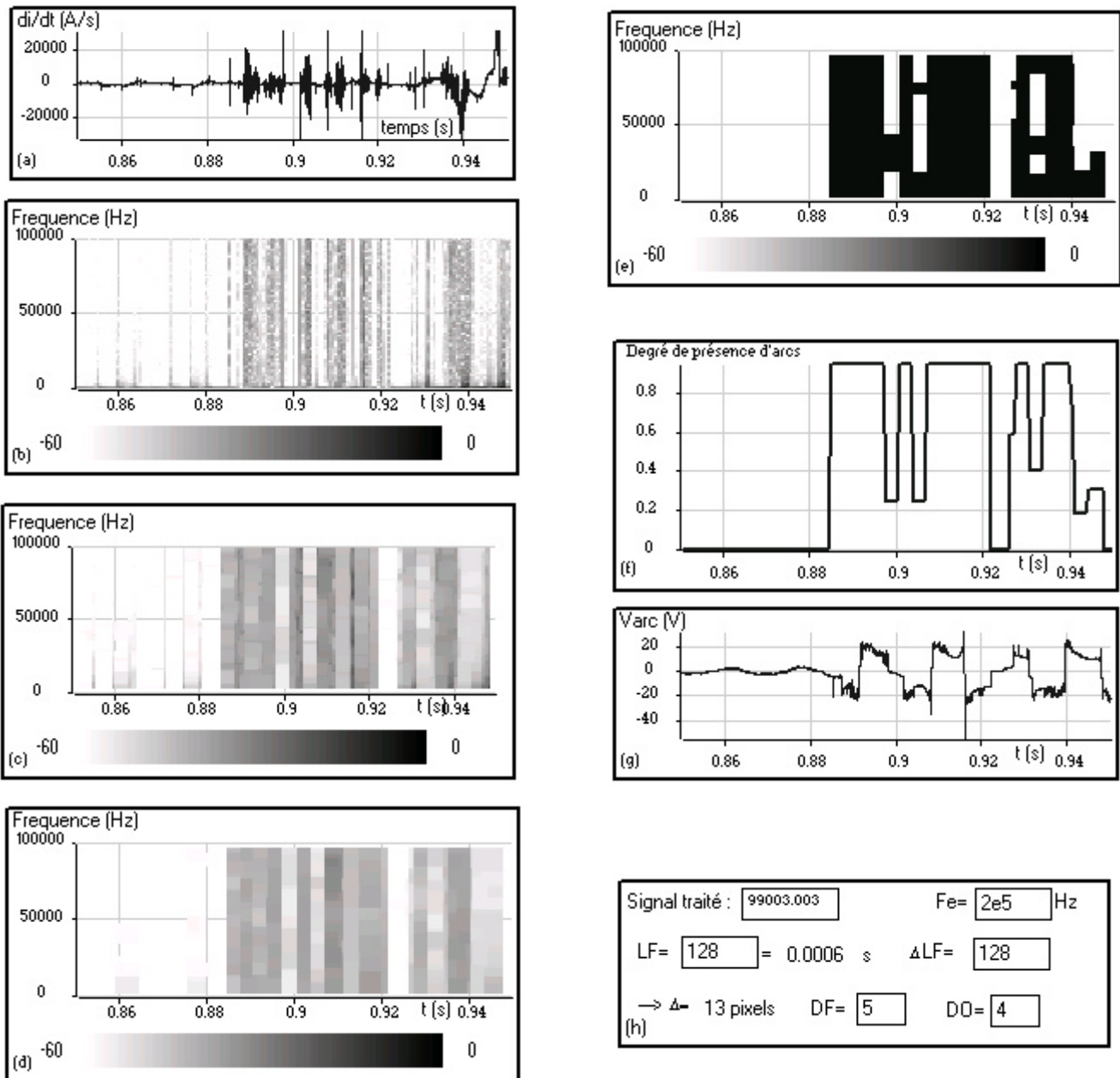


FIG. 4 : signal dérivée du courant pour un poste à souder, présence d'arcs séries à partir de $t=0.89s$ environ (a) – RTF du signal en dB (b) – Résultat de la fermeture (c) – Résultat de l'ouverture (d) – Résultat de la binarisation (e) – Après intégration verticale, résultat de la détection (f) – Tension d'arc mesurée au cours de l'expérience (g) – Interface de contrôle montrant les paramètres de traitement (h).

3.2 Exemple

La figure 4 présente un exemple de traitement sur un signal avec une charge de type poste à souder. L'arc a été provoqué à partir de $t=0.89s$ environ. Les paramètres sont les suivants : $F_c=200kHz$, $L_f=128$, $\Delta L_f=128$ (pas de recouvrement). On a donc d'après (1) $\Delta=13$ pixels. On prendra par exemple $D_c=5$ pixels et $D_o=4$ pixels.

Les figures 4(b) à 4(c) montrent bien la façon donc les motifs les plus étroits de la RTF, principalement avant l'apparition de l'arc, sont éliminés par le traitement morphologique.

Après binarisation et intégration verticale, le résultat de notre détecteur est présenté figure 4(f). La zone entre $t=0.89$ et $t=0.92$, où l'arc est fortement présent, apparaît très clairement.

Vers $t=0.925s$ se trouve une zone dépourvue d'arcs. Ceci est confirmé par la tension d'arc de la figure 4(g), nulle dans cette zone. Notre détecteur repère bien cette zone sans arc puisque le degré de présence d'arcs est nul à cet endroit.

Juste avant $t=0.94s$, un arc assez peu énergétique se superpose à un motif de charge. Il est correctement détecté comme un arc par notre détecteur.

Enfin, vers $t=0.95s$, une perturbation brève, principalement due à la charge, est visible. Notre détecteur produit bien un faible degré de présence d'arc à cet endroit.

Ainsi, en seuillant la sortie de notre détecteur, il est possible de détecter les arcs de façon fiable et sans fausse alarme. Le détecteur est suffisamment discriminant pour que le réglage de ce seuil de décision soit robuste.

4. Conclusion

4.1 Remarques sur l'algorithme actuel

Le détecteur par analyse temps-fréquence et traitement morphologique que nous avons conçu a été testé sur une quarantaine de charges variées, *a priori* difficiles. Il semble répondre à notre besoin : identifier de façon sûre les arcs dans un délai de quelques dizaines de ms sans produire de fausses alarmes.

L'algorithme est insensible à des perturbations telles que les fréquences propres de moteurs ou harmoniques du fondamental, qui produisent sur la RTF des motifs bande étroite horizontaux dans les basses fréquences.

Plusieurs paramètres sont nécessaires au fonctionnement de l'algorithme : longueur de fenêtre et décalage, taille des Éléments Structurants, seuil de binarisation, seuil de décision. Cependant, ces paramètres sont assez robustes et peuvent être bien estimés de manière automatique.

4.2 Perspectives de travail

L'algorithme, mis au point sous le logiciel Mustig, est actuellement en cours d'optimisation. Plusieurs axes de travail ont été identifiés et sont actuellement explorés :

1. **Amélioration de la sensibilité de l'algorithme** afin qu'il puisse détecter des arcs peu énergétiques.
2. **Amélioration de sa robustesse** notamment vis-à-vis des opérations de seuillage de la RTF.
3. **Optimisation en termes de vitesse de calcul et de capacité mémoire** nécessaire, dans le but d'une implémentation temps réel.

Pour ces trois points, le remplacement du traitement morphologique actuel par une combinaison de filtres médians et d'érosions semble prometteur. L'algorithme a pu être complètement automatisé et sa sensibilité augmentée tout en gagnant en robustesse. La fréquence d'échantillonnage a pu être réduite à quelques dizaines de kHz.

4. **Evaluation de l'innocuité de l'algorithme** vis-à-vis d'autres signaux pouvant être présents sur la bande 0-100kHz. Notamment, cette bande peut être utilisée en France par EDF pour la télécommande et le relevé de compteurs. Il importe de vérifier que les signaux envoyés dans cette gamme de fréquences ne présentent pas des caractéristiques similaires aux arcs en termes de largeur de bande et de durée. Ce travail nécessite d'importantes recherches sur les normes applicables dans les différents pays.
5. **Constitution d'une base de signaux** plus importante et enregistrée dans des conditions mieux maîtrisées. La base actuelle, comportant quelques dizaines de

signaux, ne permet de valider de façon statistiquement fiable les très bonnes performances constatées.

6. **Prototypage rapide sur carte d'évaluation DSP.** Cet algorithme nous sert de support pour évaluer la facilité et la rapidité de réalisation d'un prototype fonctionnel pour un usage interne de démonstration. Notamment, nous en profiterons pour évaluer une solution émergente de prototypage rapide : la génération de code C généraliste à partir d'un outil de simulation. L'environnement Matlab/Simulink a été écarté (en raison de la faible qualité / lisibilité du code généré) au profit du logiciel Mustig, plus ouvert. En ce qui concerne la plate-forme, la carte d'évaluation DSK6711 de Texas Instrument présente une fréquence d'échantillonnage trop basse (8kHz) et a été abandonnée pour la carte EZ-LITE 21065L d'Analog Devices, en cours d'évaluation.

Remerciements

Les auteurs remercient le service *Advanced Technology & Analytics* de la société SquareD (filiale américaine de Schneider Electric) pour la fourniture des signaux, ainsi que Denis Dodelin, élève Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble (ENSIEG), pour son travail de stage en cours sur l'optimisation et l'implantation sur plate-forme DSP de l'algorithme de détection d'arcs.

Références

- [1] Russell B. D. *Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders*. Texas A&M Research Foundation, Final report Dec. 1982.
- [2] Serra J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, London, 1982.
- [3] Pierson V. *Extraction de sous-ensembles temps-fréquence en vue d'une prise de décision en non stationnaire - Application en acoustique sous-marine*. Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble, Avril 1997.
- [4] Leprettre B., Martin N. *Extraction of Pertinent Subsets from Time-Frequency Representations for Detection and Recognition Purposes*. En cours de révision pour Signal Processing.
- [5] Amin M.G. *The running Time-Frequency Distributions*. Circuits, Systems and Signal Processing, 14(3): 401-414, 1995.
- [6] Ballard D.H. *Generalizing the Hough Transform to detect arbitrary shapes*. Pattern Recognition, 13(26):111-122, 1981.