

Injection unidirectionnelle pour la localisation de défaut via l'utilisation de la méthode de réflectométrie

JAUME BENOIT¹, LUCA INCARBONE¹

¹ CEA, LIST, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

¹ jaume.benoit@cea.fr, luca.incarbone@cea.fr

Résumé – Cet article présente un système d'injection innovant permettant de lever certaines ambiguïtés de détection de défaut électrique dans un câble. Le système proposé ici permet la propagation unidirectionnelle d'un signal arbitraire. Ceci est rendu possible par l'injection de deux signaux en deux points d'injections différents. Les profils de ces signaux sont obtenus en résolvant un simple système linéaire (inversion de matrice).

Abstract – This paper presents an innovative injection system to solve ambiguous location of an electrical fault in a wire. The proposed system generates an unidirectional propagation of an arbitrary signal, using two different signals. The signals are computed to obtain the unidirectional propagation, solving a linear system (matrix inversion).

1 Introduction

De nos jours, les réseaux filaires sont considérés comme la colonne vertébrale des systèmes complexes. L'augmentation de la complexité des systèmes modernes a vu augmenter la longueur de ces câblages de manière significative. Quels que soient leurs domaines d'applications, les câbles sont soumis aux mêmes environnements que les systèmes auxquels ils sont connectés. Ces environnements s'avèrent souvent hostiles et soumettent les systèmes et les câbles à de multiples contraintes : vibrations, frictions, températures extrêmes, humidité, exposition aux rayonnements, projections chimiques, etc. Ces contraintes augmentent de manière drastique la probabilité d'apparition de défauts ou de vieillissement prématuré des harnais de câbles. Ces défauts peuvent avoir des conséquences dramatiques et, s'ils ne sont pas détectés suffisamment tôt, être la cause d'accidents mortels [1, 2].

Chercher ces défauts sur des kilomètres de câbles durant les périodes de maintenance peut prendre énormément de temps et il arrive même fréquemment qu'il soit impossible de les localiser. Si on ajoute au coût en temps, les coûts financiers liés à l'arrêt de fonctionnement du ou des systèmes connectés aux câbles défaillants ainsi que les coûts de dépôt ou de remplacement des harnais de câble, on peut atteindre des dépenses de l'ordre de plusieurs millions de dollars sans prendre en compte le mécontentement du client.

Le besoin d'outils de diagnostic de câble a été officiellement reconnu (dans l'aéronautique) en 2001, après que plusieurs études de l'ASTRAC (Aging Transport Systems Rulemaking Advisory Committee) aient montré que plusieurs centaines de défauts pouvaient être constatés dans des harnais d'avions âgés d'une vingtaine d'années [3]. Parmi les nombreuses méthodes possibles, la réflectométrie semble être la plus pertinente quant aux besoins de diagnostics tant embarqués qu'externes. Celle-ci à l'avantage de fournir

une vue complète de l'état du câble en mesurant depuis une extrémité seulement. De la même manière que le Radar, le réflectomètre injecte un signal large bande dans le câble sous test, ce signal se propage dans le câble et chaque discontinuité d'impédance rencontrée (jonctions ou défauts) réfléchit une partie de l'énergie vers le port d'injection. L'analyse du signal réfléchi fournit des informations sur la présence, la position et le type de ces discontinuités.

Certains cas, requièrent l'ajout de contraintes supplémentaires, comme des contraintes CEM (Compatibilité Electromagnétique) ou de non-interaction avec les signaux déjà présents dans le câble (rendre possible la cohabitation des signaux de diagnostic et des signaux utiles par exemple). Des méthodes spécifiques de diagnostic basées sur la réflectométrie ont été développées pour ces applications embarquées telles que la SSTDR [4] (Spread Spectrum Time Domain Reflectometry), la MCTDR [5] (Multi Carrier Time Domain Reflectometry), l'OMTDR [6] (Orthogonal Multi-Tone Time Domain Reflectometry), de nouvelles méthodes innovantes [7], etc. Ces méthodes fournissent d'excellents résultats pour la détection de défauts francs, i.e. circuits ouverts ou courts circuits ; la précision de localisation peut être inférieure au centimètre et les signaux de diagnostic peuvent respecter les normes CEM [8] tout en cohabitant avec d'autres.

Dans cet article, nous nous attacherons d'abord à présenter un problème récurrent dans le diagnostic par réflectométrie. Une solution à ce problème sera présentée dans un second temps puis nous présenterons quelques résultats d'applications avant de conclure.

2 Présentation de la problématique

Dans le passé, une solution intégrée permettant la détection et la localisation d'un défaut en temps réel (dont la durée d'apparition est supérieure à la micro-

seconde) a été présentée [9]. Cette solution peut, par exemple, être embarquée dans le réseau de distribution d'énergie d'un avion.



Figure 1 : Schématisation de la distribution électrique dans un avion (ATA24).

Le cœur primaire (cf. Figure 1) contient en général une protection électrique (i.e. un disjoncteur) pour déconnecter un câble en cas de surcharge (causée par un court-circuit par exemple). Si le système d'analyse de câble est intégré au cœur primaire, le signal est injecté comme présenté Figure 2.

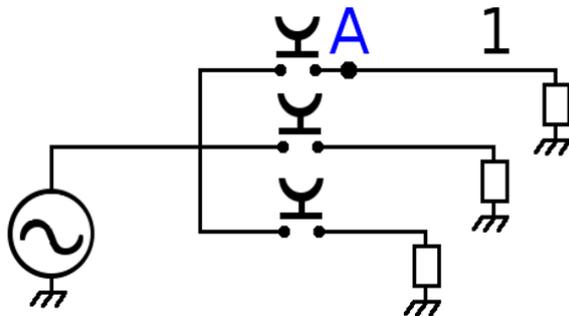


Figure 2 : Générateur, unité principale avec disjoncteurs, charges et point d'injection TDR (A) sur le câble sous test (1).

Cette configuration induit une amplitude pour le signal utile diminuée de moitié. En effet, l'injection s'effectuant en « milieu » de câble implique que le signal injecté se propagera dans les deux directions et perdra donc en puissance dans la direction d'intérêt. De plus, la réflexion due à la jonction « multi-branches » ou à la présence de défauts sur la partie non-testée du câble peut générer un ou plusieurs pics parasites sur le réflectogramme. L'amplitude du signal utile est donc fortement diminuée (divisée par deux par rapport à une mesure depuis une extrémité du câble) et l'analyse de la mesure par réflectométrie est fortement perturbée (plusieurs « pics parasites » difficiles à ne pas prendre en compte si l'on n'a pas une connaissance parfaite du système sous test).

Ce problème se présente en réalité systématiquement lors du diagnostic d'un câble par réflectométrie si le système TDR (Time Domain Reflectometry) n'est pas situé à une extrémité du câble (Figure 3 par exemple).

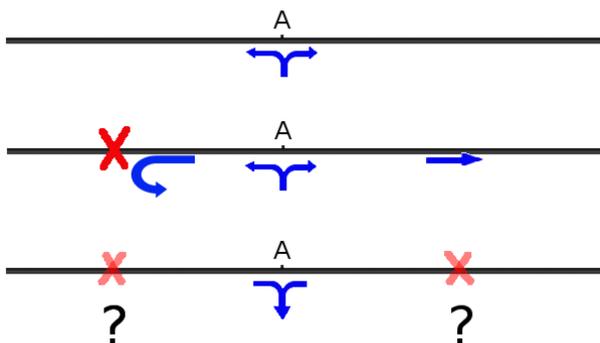


Figure 3 : Incertitude dans la localisation d'un défaut lors d'une injection en milieu de ligne.

En effet, la position d'un défaut, si présent, est déterminé grâce au temps de vol du signal de test depuis le point d'injection jusqu'au défaut (convertit en distance en multipliant par la vitesse de propagation de l'onde). Dans ce cas, cette position reste ambiguë car il n'est pas possible de déterminer si le défaut se situe à gauche ou à droite du point d'injection. La levée de cette ambiguïté nécessite alors l'utilisation d'autre méthode ou l'injection d'un signal de diagnostic depuis un point différent de celui utilisé dans un premier temps.

Dans cet article, une solution à ce problème est proposée. Cette solution consiste à injecter le signal de diagnostic de manière unidirectionnelle (i.e. se propageant dans une seule direction depuis le point d'injection).

3 Résolution du problème

Afin de résoudre ce problème, considérons deux points d'injections A et B juxtaposés sur la ligne sous test (cf. Figure 4).

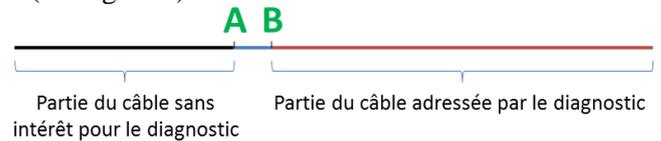


Figure 4 : Deux points d'injections (A et B) placés sur la ligne sous test.

On suppose alors que l'injection de deux signaux différents puisse être faite de manière synchronisée entre ces deux points. En notant s_{IA} et s_{IB} les signaux respectivement injectés aux points A et B. L'objectif est alors de construire ces signaux tels que leur combinaison lors de la propagation dans la ligne forme un signal de réflectométrie vers le côté droit et un signal nul de l'autre côté.

3.1 Résolution vectorielle

La première méthode de résolution proposée suppose que l'injection sur le câble est parfaite (i.e. sans aucune modification d'impédance aux points A et B). De plus, A et B sont choisis tels que la distance en temps parcouru par le signal entre eux soit exactement égale à un multiple du temps d'échantillonnage du convertisseur numérique-analogique (DAC) utilisé. Ces hypothèses, même si impossibles à vérifier strictement en réalité permettent une bonne approximation. Dans ce cas, au point B le signal réel s_{RB} est égal au signal s_{IB} injecté auquel s'ajoute le signal s_{IA} retardé. Le signal au point B à chaque instant s'écrit donc :

$$s_{RB}(t) = s_{IA}(t - \Delta t_{AB}) + s_{IB}(t) \quad (1)$$

Avec Δt_{AB} le temps de vol entre le point A et le point B (ou vice versa). De même, en notant s_{RA} le signal réel au point A, on a :

$$s_{RA}(t) = s_{IA}(t) + s_{IB}(t - \Delta t_{AB}) \quad (2)$$

Etant donné que l'on souhaite s_{RA} nul (aucune propagation vers la gauche de la ligne), on peut écrire les équations (1) et (2) sous la forme du système suivant :

$$\begin{cases} s_{RB}(t) = s_{IA}(t - \Delta t_{AB}) + s_{IB}(t) \\ s_{IA}(t) = -s_{IB}(t - \Delta t_{AB}) \end{cases} \quad (3)$$

Par substitution on obtient :

$$s_{RB}(t) = s_{IB}(t) - s_{IB}(t - 2\Delta t_{AB}) \quad (4)$$

On en déduit alors l'équation de récurrence (5) nous permettant de construire le signal s_{IB} en fonction du signal s_{RB} souhaité pour le diagnostic.

$$s_{IB}(t) = s_{RB}(t) + s_{IB}(t - 2\Delta t_{AB}) \quad (5)$$

Pour le signal s_{IA} il suffit de le reconstruire grâce à l'expression obtenue en (3). On calculera dès lors les signaux d'injections comme suit :

$$\begin{cases} s_{IB}(t) = s_{RB}(t) + s_{IB}(t - 2\Delta t_{AB}) \\ s_{IA}(t) = -s_{IB}(t - \Delta t_{AB}) \end{cases} \quad (6)$$

Comme précisé précédemment, cette méthode suppose que le temps de vol du signal du point A au point B , noté Δt_{AB} doit être un multiple du pas d'horloge du DAC. Cette condition est un problème d'ingénierie car dans l'idéal les deux points d'injections doivent se trouver aussi près que possible l'un de l'autre. Par exemple, si la distance AB est fixée à quelques centimètres, la fréquence du DAC devra être de l'ordre du gigahertz. Si le DAC a une limite d'échantillonnage en fréquence plus basse, la distance AB se devra d'être augmentée.

3.2 Résolution matricielle

La méthode vectorielle présentée précédemment à l'avantage d'être relativement simple à implémenter mais les hypothèses nécessaires à sa mise en place s'avèrent assez contraignantes en réalité (adaptation parfaite en entrée très peu probable, écart entre les points d'injections à respecter strictement, etc.). C'est pourquoi, une autre méthode dite « matricielle » a été envisagée. Cette méthode nécessite cependant une première phase « d'apprentissage » avant d'être mise en œuvre.

On gardera les notations de la section précédente et on notera de plus $s_{B \rightarrow A}^i(t)$ le signal généré à l'instant t au point A par l'envoi d'une impulsion d'amplitude 1 à l'instant i depuis le point B . De manière similaire on définit les signaux $s_{A \rightarrow A}^i(t)$, $s_{B \rightarrow B}^i(t)$ et $s_{A \rightarrow B}^i(t)$.

Ici on notera que les signaux sont discrétisés en temps mais on gardera les mêmes notations par soucis de simplicité.

On cherche alors les signaux s_{IA} et s_{IB} tels qu'à chaque instant les combinaisons linéaires des signaux résultants aux points A et B soient égales aux signaux

souhaités (i.e. $s_{RA}(t) = 0 \forall t$ et $s_{RB}(t) = SD$ avec SD le signal de diagnostic désiré).

Ce problème peut s'écrire sous la forme du système suivant :

$$\begin{pmatrix} S_{A \rightarrow A} & S_{B \rightarrow A} \\ S_{A \rightarrow B} & S_{B \rightarrow B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{IA} \\ s_{IB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{RA} \\ s_{RB} \end{pmatrix} \quad (7)$$

avec $S_{X \rightarrow Y}$ la matrice dont la $i^{\text{ème}}$ colonne est égale à $s_{X \rightarrow Y}^i(t)$ pour $t \in [0; T_F]$ où T_F est le temps de fin du diagnostic et $S_{XY} = (s_{XY}(0), \dots, s_{XY}(T_F))'$. Cette matrice possède donc un nombre de colonnes égal à $2 \frac{T_F}{\Delta t}$ (avec Δt le pas de discrétisation en temps) et un nombre de lignes égal à $2 \frac{T_{source}}{\Delta t}$ (où T_{source} est le temps d'émission des signaux injectés).

Cette matrice n'est pas carrée (sauf exception) puisque le temps d'émission est rarement égal au temps de diagnostic (on écoute en général plus longtemps que ce qu'on émet). Nous devons donc résoudre un problème mal posé. La résolution de ce système (7) peut être effectuée de diverses manières grâce à des méthodes classiques de résolution (inversion directe, méthodes itératives, etc.) précédées quasi systématiquement d'une régularisation permettant de faciliter l'inversion de cette matrice mal conditionnée. D'autre part, la matrice ayant une forme bien particulière (proche d'une matrice de Toeplitz), les résolutions par des méthodes itératives s'avèrent particulièrement pertinentes.

Cette méthode matricielle est applicable expérimentalement en procédant comme suit :

- Etape 1 : Une impulsion en tension est générée au point A et crée un signal se propageant sur la ligne. Ce signal est alors enregistré au point A et B durant un temps prédéfini.

- Etape 2 : Une impulsion en tension est générée au point B et crée un signal se propageant sur la ligne. Ce signal est alors enregistré au point A et B durant un temps prédéfini.

- Etape 3 : Les signaux enregistrés lors des étapes 1 et 2 sont utilisés pour construire le système (7).

- Etape 4 : Le système (7) est résolu (avec une méthode de Newton par exemple) en utilisant également une régularisation (celle de Tychonoff [10] par exemple). Cette résolution permet de calculer les signaux s_{IA} et s_{IB} .

- Etape 5 : Les signaux s_{IA} et s_{IB} sont injectés (respectivement aux point A et B) de manière synchronisée et génèrent alors le signal de diagnostic souhaité en direction de la droite ainsi qu'un signal nul en direction de la gauche (si s_{RA} a été choisi égal à zéro).

Il est intéressant de noter ici que, si le système ne change pas et que les points d'injections ne sont pas déplacés entre deux mesures, il est inutile de procéder une nouvelle fois aux étapes 1 à 4 et on peut dès lors procéder directement à la phase 5. Il est également

important de signaler le fait que cette méthode reste valide quels que soient les systèmes étudiés et la position des points d'injections mais qu'une condition nécessaire est la linéarité dans la propagation des signaux.

4 Simulations

Afin de valider la méthode vectorielle, une simulation a été effectuée. Pour cela, un script capable de générer les signaux s_{IA} et s_{IB} a été réalisé. Ce script basé sur le système (6) a été conçu pour générer un signal $s_{RA}(t)$ nul (aucune propagation souhaité vers la gauche) et un signal $s_{RB}(t)$ suivant le profil d'un signal MCTDR. La Figure 5 représente les signaux obtenus par le script de génération ainsi que les résultats en sortie lors de leurs injections sur une ligne simulée. La Figure 6 montre, elle, les points d'injections et de mesures sur cette ligne.

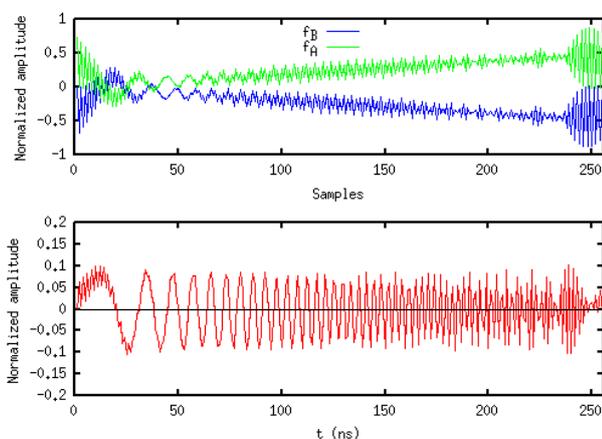


Figure 5 : Système simulé afin de tester la validité de la méthode vectorielle. En haut, signaux injectés aux points A et B. En bas, signaux résultants se propageant réellement dans la ligne (vers la droite pour le rouge et vers la gauche pour le noir).

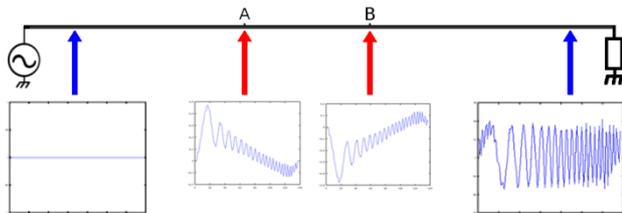


Figure 6 : Signaux injectés en A et B ainsi que tensions mesurées aux extrémités de la ligne.

La méthode vectorielle est validée numériquement et montre ainsi sa pertinence et son efficacité. En effet, on observe bien un signal nul se propageant vers la gauche ($s_{RA}(t) = 0 \forall t$) et un signal MCTDR classique se propageant vers la droite ($s_{MCTDR}(t) - s_{RB}(t) = 0 \forall t$). Il est cependant intéressant de remarquer que, de par le fait que l'annulation côté gauche se fait par « l'ajout » d'un signal destructif, l'amplitude des signaux a tendance à augmenter avec le temps. La levée d'ambiguïté a donc un coût certain en énergie. D'autre part, la simulation représente ici un cas idéal, il est donc inévitable que les résultats se dégradent plus ou moins fortement lors d'applications pratiques.

En ce qui concerne la méthode matricielle, celle-ci donne des résultats similaires. Cette méthode étant une

variante de la méthode proposée dans [11] nous invitons les lecteurs intéressés à s'y reporter.

5 Conclusion

Cet article s'est attaché à résoudre la problématique liée à l'injection en milieu de système lors de l'utilisation de réflectométrie pour le diagnostic de câble. Les solutions envisagées permettent d'une part la levée d'ambiguïté lors de la détection de défaut (le défaut est-il situé à droite ou à gauche du point d'injection?) et, d'autre part, la suppression des perturbations dues aux réflexions sur des éléments non-testés (le diagnostic est « orienté » dans la direction d'intérêt).

De plus, lors d'une injection en milieu de câble un même système peut être utilisé pour surveiller alternativement un côté ou l'autre de la ligne.

Les deux approches envisagées ont d'ores et déjà montré des résultats prometteurs et, afin de confirmer l'efficacité de ces méthodes en pratiques, des validations expérimentales sont actuellement à l'étude.

6 Références

- [1] F. Auzanneau, "Wire troubleshooting and diagnosis: review and perspectives", Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 49, pp. 253-279, 2013.
- [2] C. Furse and R. Haupt, "Down to the wire", IEEE Spectrum, Volume 38, Issue 2, pp 34-39, February 2001.
- [3] "Summary of ASTRAC Recommendations to the FAA", Aging Transport Systems Rulemaking Advisory Committee, April 2001.
- [4] P. Smith, C. Furse and J. Gunther, "Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location", IEEE Sensors Journal, Vol. 5, Issue 6, pp. 1469-1478, 2005.
- [5] A. Lelong and M. Olivas, "On line wire diagnosis using multicarrier time domain reflectometry for fault location", IEEE Sensors Conference, pp. 751-754, October 2009.
- [6] W. Ben Hassen, F. Auzanneau, L. Incarbone, F. Peres and A. Tchangani, "Diagnosis sensor fusion for wire fault location", IEEE Sensors Conference, pp. 1-4, November 2013.
- [7] Te-Wen Pan; Ching-Wen Hsue; Jhin-Fang Huang, "Time-domain reflectometry using arbitrary incident waveforms", Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 50, no. 11, pp.2558-2563, November 2002.
- [8] L. Incarbone, F. Auzanneau and S. Martin, "EMC impact of online embedded wire diagnosis", URSI GASS 2014 Beijing, August 20104.
- [9] L. Incarbone, F. Auzanneau, Wafa Ben Hassen, Yannick Bonhomme, "Embedded Wire Diagnosis Sensor For Intermittent Fault Location", IEEE Sensors Conference, pp. 562-565, November 2014.
- [10] A.N. Tychonoff, Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method, Sov. Math. Dokl. 4 (1963) 1035-1038
- [11] J. Benoit, C. Chauvière, P. Bonnet, "Time-dependent current source identification for numerical simulations of Maxwell's equations", Journal of Computational Physics, Volume 289, 2015, Pages 116-128