

Rapport de TIPE : Détection de fissures métalliques par courants induits

Numéro de Candidat : 44623

Mots-clés : Contrôle non destructif, Courants de Foucault, Induction, Thermographie

Introduction

Les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) jouent un rôle capital dans la détection de défauts dans les structures métalliques de nombreux systèmes critiques [1]. Ces méthodes permettent d'avoir accès à l'état d'une pièce sans avoir à l'altérer en la découpant ou en la traitant chimiquement [2]. La majorité des techniques de CND reposent sur une excitation physique de la pièce, qui peut être électromagnétique par rayons X [3] ou par courants de Foucault [4] ; mécanique par ultrasons [5] ou thermographie [6] [7]. Les défauts sont révélés par la réponse différente de celle d'un échantillon sain.

L'excitation par courants de Foucault est le support de plusieurs techniques de CND, car elle est particulièrement sensible à la géométrie et la constitution du matériau [8] et donc à ses défauts [9]. Une excitation magnétique à la surface d'une pièce métallique conductrice y induit une circulation de charges. La présence d'un défaut modifie la circulation de ces courants, changement détectable par deux approches indirectes : le couplage d'une bobine avec la pièce et l'observation de l'échauffement induit [10].

La première de ces approches est fondée sur la mesure de l'impédance d'une bobine alimentée par une tension alternative et accolée à la pièce métallique étudiée. Cette impédance est fonction du couplage de la bobine avec les courants qu'elle induit, eux-mêmes gênés par la présence d'un défaut [11].

La seconde approche met en œuvre la thermographie pulsée par chauffage à induction [12]. La propagation de la vague de chaleur générée par le chauffage est modifiée par les défauts du métal, ce qui les révèle dans l'infrarouge [13].

Il peut être nécessaire de mettre en œuvre ces deux méthodes avec des moyens restreints. Dans ce rapport, j'étudie pour les méthodes électromagnétiques de CND par mesure d'impédance et par thermographie les principes physiques sous-tendant ces méthodes, puis les mets en œuvre au laboratoire avant de les caractériser individuellement, puis de les comparer.

1 Impédance : principe et modélisation

Principe physique Une bobine alimentée par un générateur de tension sinusoïdale posée sur une pièce métallique génère un flux magnétique à travers une portion de celle-ci (fig. 1). Ce flux induit un courant de Foucault circulaire, qui génère un champ magnétique, qui par son flux dans la bobine génère en retour des courants induits dans la bobine. La présence

d'un défaut (fig. 2) dans la portion de plaque traversée par le champ magnétique de la bobine gêne la propagation des courants induits, ce qui modifie l'impédance de la bobine lors du passage sur ce défaut (fig. 3).

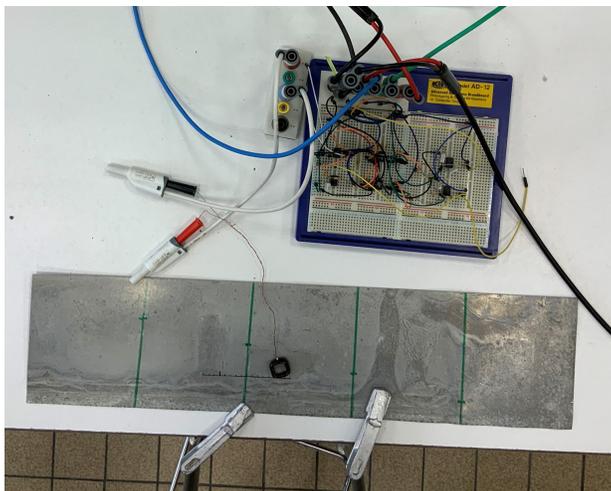


FIGURE 1 – Détecteur à mesure d'impédance

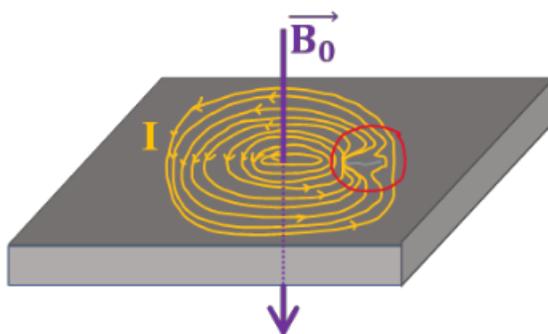


FIGURE 2 – Principe de détection

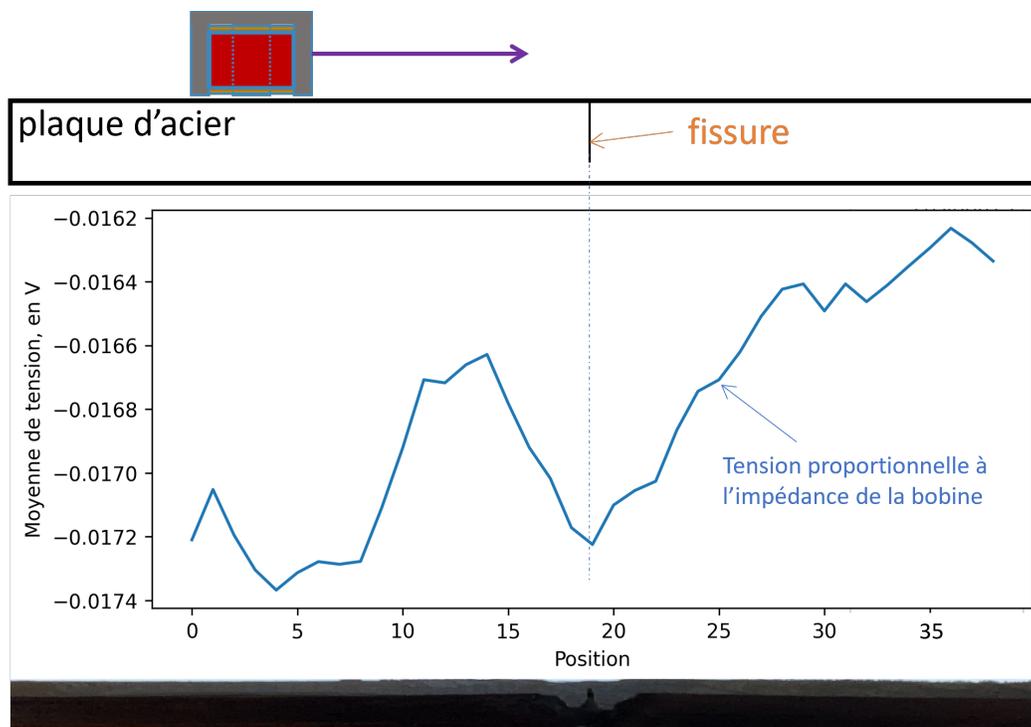


FIGURE 3 – Contrôle de qualité de soudure avant optimisation du détecteur

Modélisation simplifiée On modélise la bobine excitatrice par un solénoïde infini accolé à une plaque métallique uniforme et sans défauts, et on considère les variations de l'impédance \underline{Z} de la bobine comme petites autour de valeurs moyennes.

$$\underline{Z} = (R + \delta R) + j\omega(L - \delta L) \quad (1)$$

Par un raisonnement énergétique, on peut lier la puissance dissipée par effet Joule dans la plaque métallique à la variation d'impédance et donc à la variation de tension.

$$P_J = \frac{\pi d R_b^4 \gamma_0 \omega^2 B_0^2}{8} \sin^2(\omega t) \quad (2)$$

Alors :

$$\begin{cases} \delta R = \frac{\pi d \gamma_0 (R_b^2 \alpha \mu_0 N \omega)^2}{8 l_b^2} \\ \delta L = \frac{\pi R_b^6 d}{3 \mu_0} \left(\frac{\mu_0^2 \gamma_0 \alpha N \omega}{4 l_b} \right)^2 \end{cases}$$

Simulation par éléments finis On utilise le logiciel FEMM, ce qui nous permet d'obtenir des estimations quantitatives plus précises.

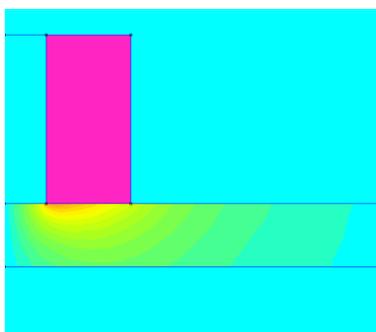


FIGURE 4 – Courants induits aluminium - plaque sans défaut

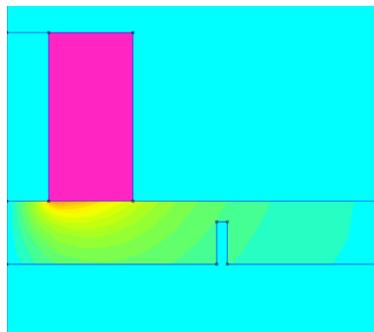


FIGURE 5 – Courants induits aluminium - défaut non débouchant

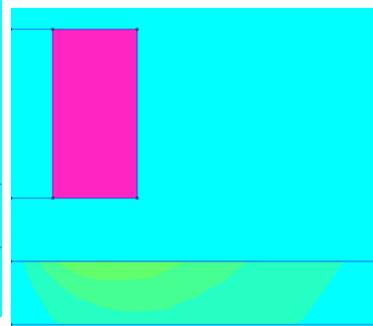


FIGURE 6 – Courants induits aluminium - entrefer

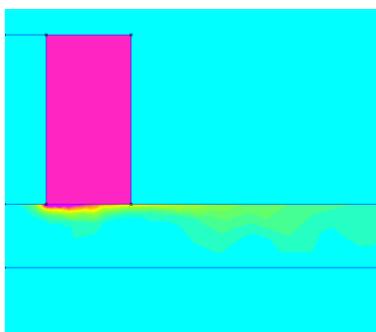


FIGURE 7 – Courants induits acier - plaque sans défaut

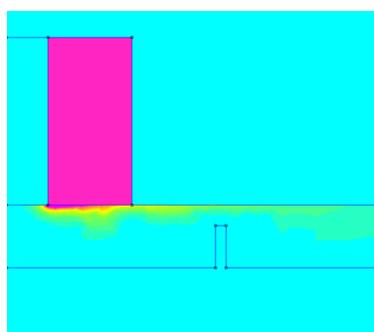


FIGURE 8 – Courants induits acier - défaut non débouchant

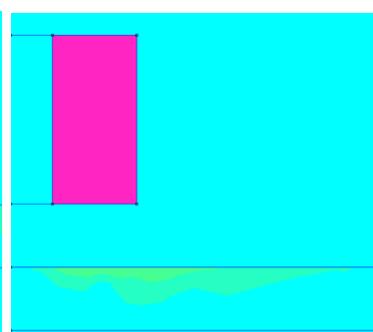


FIGURE 9 – Courants induits acier - entrefer

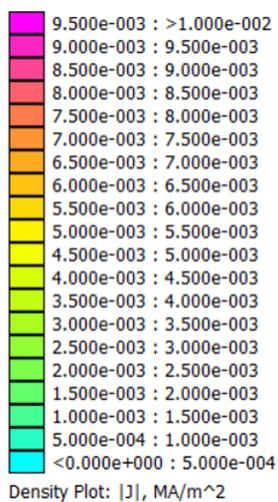


FIGURE 10 – Échelle de densité volumique de courant

Les courants de Foucault induits par la bobine pénètrent plus profondément dans l'aluminium que dans l'acier, ce qui limite à priori la profondeur à partir de laquelle il est possible de

détecter un défaut non débouchant. De plus, les courants de Foucault dans l'acier sont plus localisés et donc sont plus gênés par la présence d'un défaut débouchant que dans l'aluminium. La variation d'impédance dans le cas d'un défaut débouchant sera donc plus grande dans l'acier que dans l'aluminium.

Le calcul de la puissance dissipée par effet Joule donne une valeur largement sous estimée pour le modèle simplifié (qui donne $P_J = 2 \cdot 10^{-14}$ W) comparé à la simulation FEMM (qui donne $P_J = 9,9 \cdot 10^{-8}$ W).¹

2 Impédance : Mise en Oeuvre et Optimisation

Protocole Nous enregistrons le matériau analysé, la bobine utilisée, la fréquence de travail et l'amplitude de la porteuse. Nous réglons l'oscilloscope en mode moyennage, filtrage HF, et trigger EXT lié à la porteuse du GBF. Nous branchons le signal en sortie du passe-bas correspondant à la partie réelle en X, et la partie imaginaire en Y. Enfin, nous balayons manuellement la bobine sur la plaque mm par mm en enregistrant pour chaque position les tensions moyennes X et Y.

Circuit Le circuit (fig. 11) extrait une tension proportionnelle à la résistance de la bobine et une autre à son inductance permettant de déduire les variations d'impédance avec $\underline{Z} = R + j\omega L$.²

1. Pour $R_b = 4$ mm (rayon moyen du bobinage), $d = 3$ mm (épaisseur de la plaque), $\gamma_0 = 19,2$ MS \cdot m⁻¹ (conductivité diélectrique aluminium 7075), $\omega = 9 \cdot 10^{-3}$ rad \cdot s⁻¹ (pulsation de travail), $B_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ T (champ magnétique moyen), $l_b = 3$ mm (longueur de la bobine), $N = 300$ (nombre de spires), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H \cdot m⁻¹ (perméabilité magnétique du vide), $\alpha = 0,6$ (coefficient de couplage).

2. Nous utilisons deux montages à détection synchrone en parallèle, l'un pour R et l'autre pour L. Un convertisseur courant-tension génère une tension proportionnelle au courant qui traverse la bobine et donc à sa résistance. Un filtre actif déphaseur placé en amont du multiplieur applique une rotation de $\pi/2$ sur le signal en sortie de bobine, afin d'en extraire la composante imaginaire proportionnelle à l'inductance de la bobine. Un montage à détection synchrone extrait du bruit le signal d'intérêt (principe de démodulation d'amplitude). La porteuse du montage à détection synchrone est ici le signal généré par le GBF aux bornes de la bobine. Le passe-bas en contrebas du multiplieur fournit la tension moyenne pour chaque position de la bobine. Tous les filtres sont actifs, leur mise en série n'influe pas sur le signal. La pulsation de résonance du déphaseur est identique à celle du GBF, quand la pulsation de coupure des deux passe-bas identiques et fixée de manière à amplifier d'au moins -40 dB tout signal de fréquence supérieure à celle du GBF.

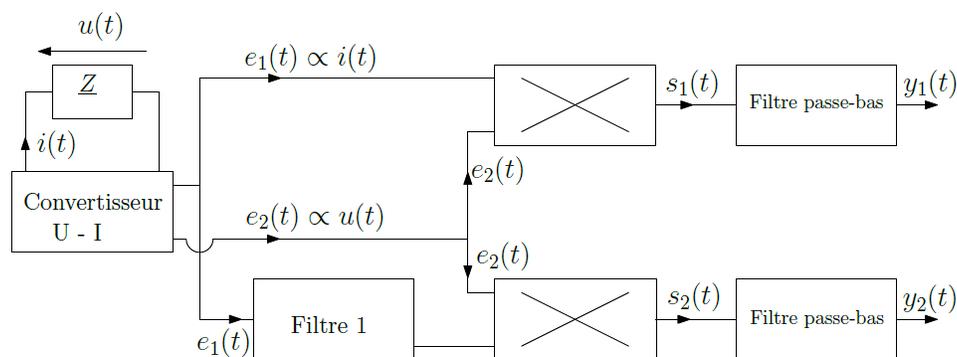


FIGURE 11 – Schéma du circuit avec séparation des parties réelle et imaginaire

Bobine J'ai testé une bobine de blocs d'électronique de 1000 tours pour vérifier la faisabilité du détecteur, puis 5 itérations de bobines artisanales plus petites avec lesquelles j'ai optimisé le dispositif, et enfin une bobine provenant d'un grille-pain hors-service que j'ai finalement retenue. Celle-ci permettait une fréquence d'utilisation optimale peu élevée pour la détection de défauts non-débouchant (700 Hz), un champ magnétique puissant guidé par le noyau de fer doux qui augmente sa sensibilité et un signal peu bruité grâce à un bobinage régulier (rapport sur bruit de 10 en moyenne). (fig. 12).

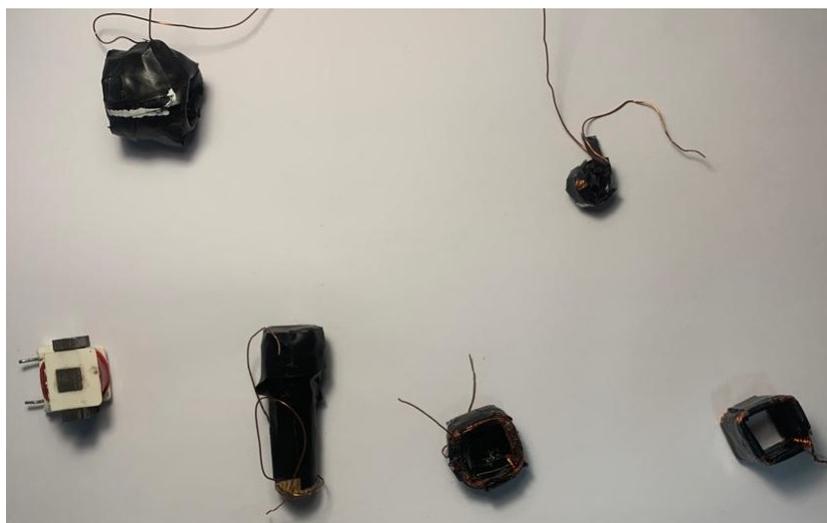


FIGURE 12 – Bobines testées

Fréquence En parcourant manuellement les fréquences au voisinage d'une fissure pour l'une des bobines artisanales, j'ai relevé une importante influence de la fréquence sur la variation de tension en sortant du circuit (fig. 13). Afin d'optimiser le processus j'ai utilisé la wobbulation. Balayant le spectre des fréquences de 0 à 10 kHz et représentant la tension en fonction de la fréquence sur une fissure et loin de cette fissure, j'ai identifié une fréquence optimale maximisant l'écart entre ces deux courbes à 7kHz pour un défaut traversant dans l'acier (fig. 14 & 15). Cependant, j'ai choisi de me placer à 700 Hz afin de ne pas trop être

limité par la profondeur de pénétration des courants de Foucault et détecter des défauts non traversants.

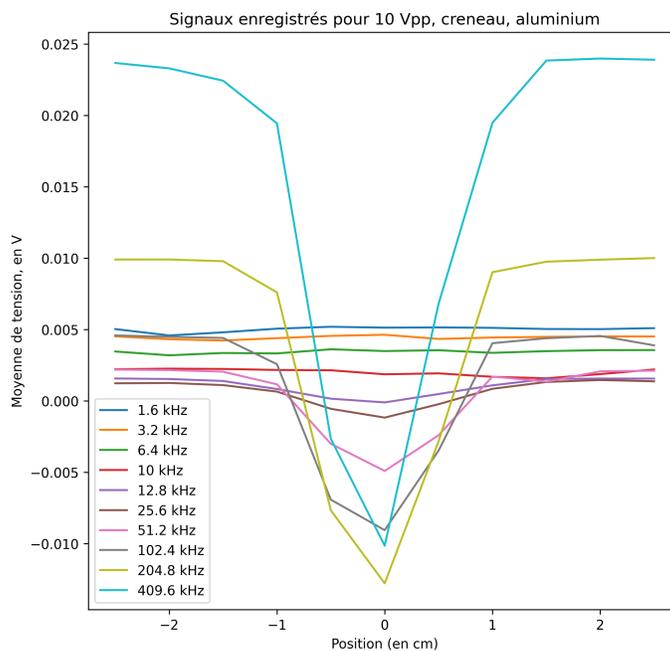


FIGURE 13 – Caractérisation spectrale d'une bobine artisanale

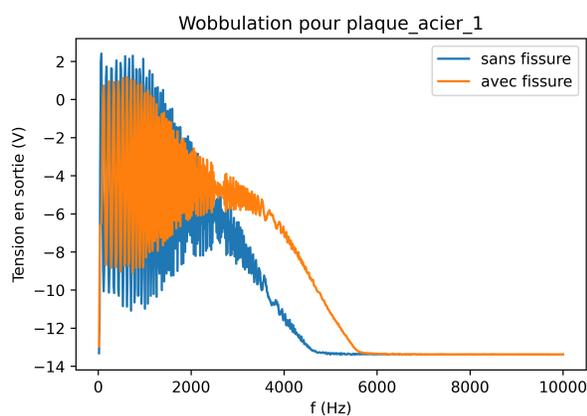


FIGURE 14 – Wobulation Acier

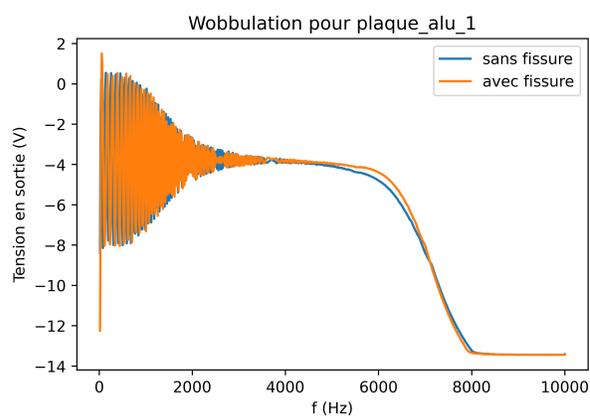


FIGURE 15 – Wobulation Aluminium

Orientation de la bobine La bobine industrielle n'étant pas axisymétrique grâce à son cœur ferromagnétique, la variation de tension due au passage sur une fissure est fonction de son orientation. Alors il est possible de remonter à la géométrie d'un défaut invisible voire non débouchant à partir de deux balayages à orientation orthogonales³ (fig. 17).

3. Une approche à 90° maximise le rapport signal sur bruit pour un défaut non débouchant dans l'aluminium.

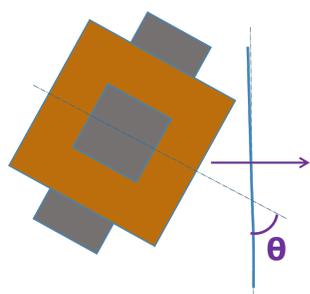


FIGURE 16 – Influence de l'orientation de la bobine - Schéma

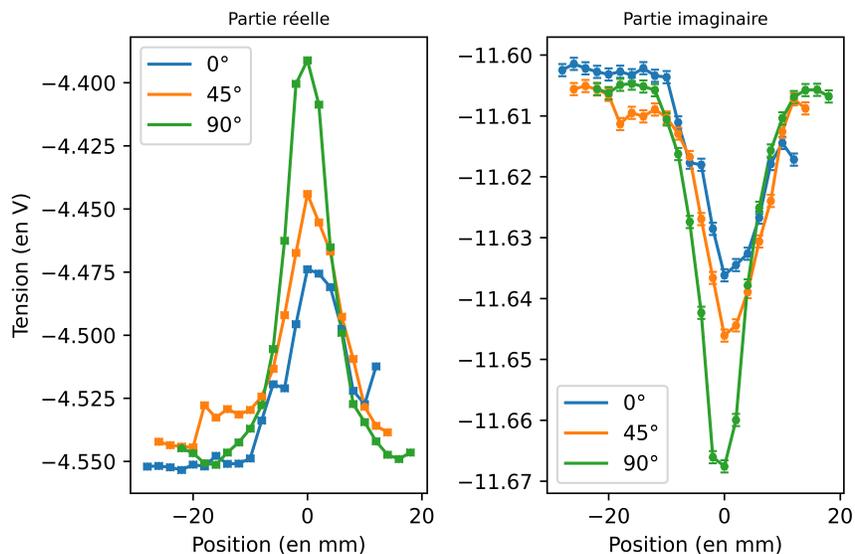


FIGURE 17 – Influence de l'orientation de la bobine - Données expérimentales

Vitesse de balayage Dans l'industrie la vitesse de balayage est essentielle afin de contrôler des pièces de dimension élevée ou en un temps limité. Un module de déplacement linéaire, permet de voir qu'à partir d'un balayage à 1,5 m/s le signal de la fissure s'étale spatialement (fig. 19) , j'ai donc limité la vitesse à 1 m/s. ⁴

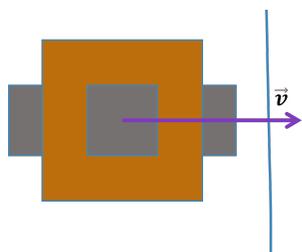


FIGURE 18 – Influence de la vitesse de balayage - Schéma

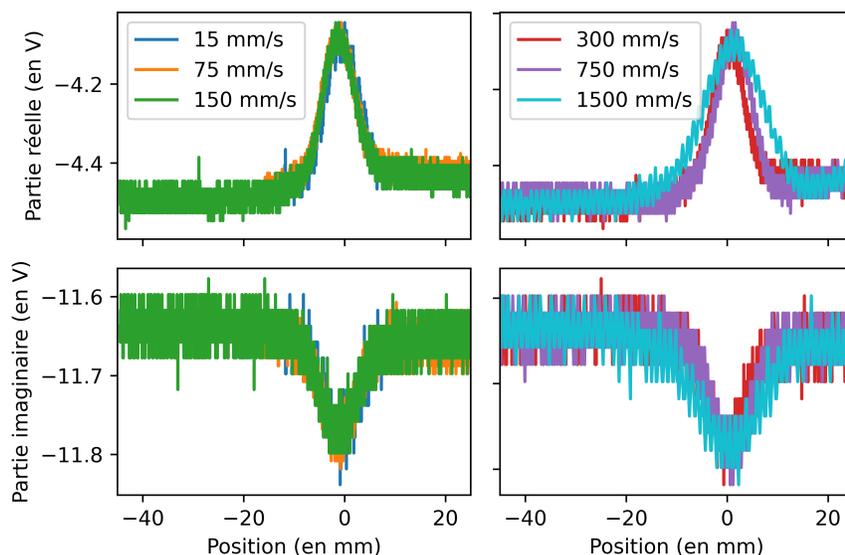


FIGURE 19 – Influence de la vitesse de balayage - Données expérimentales

4. Ceci correspond à la vitesse utilisée dans le contrôle des circuits de refroidissement de centrales nucléaires lors de mes échanges avec et visite de l'entreprise industrielle Omexom.

Entrefer La méthode de détection de fissures par mesure d'impédance n'est pas adaptée à toute pièce métallique : des variations d'entrefer (épaisseur d'air entre la bobine et la plaque) introduisent un bruit non négligeable dans la tension mesurée⁵ (fig. 21). La mesure la détection de fissures par mesure d'impédance n'est utilisable que sur des pièces à géométrie relativement simple et régulière (plaques, tuyaux).

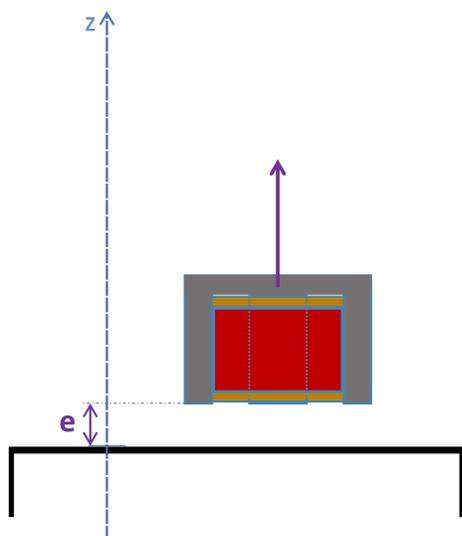


FIGURE 20 – Influence de l'entrefer - Schéma

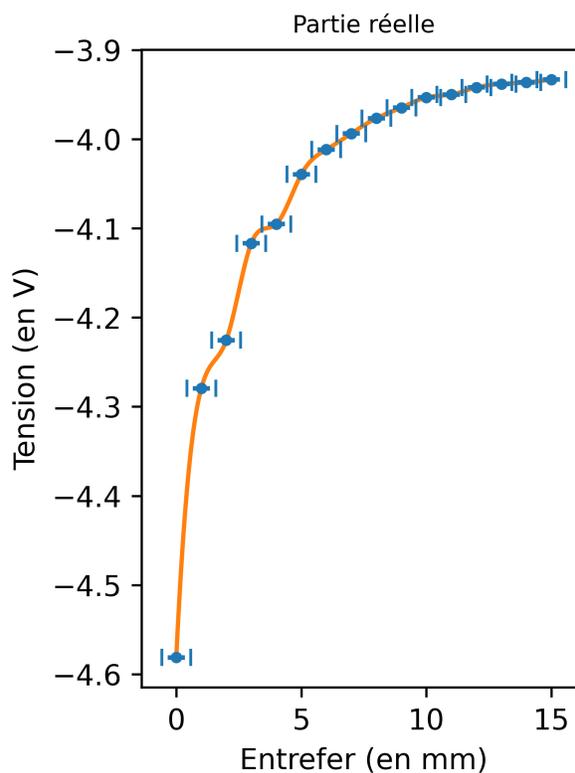


FIGURE 21 – Influence de l'entrefer - Données expérimentales

Profondeur de pénétration Le CND par impédance permet de pénétrer profondément le métal et de détecter des défauts non débouchants. J'ai quantifié cela à l'aide d'un échantillon en aluminium spécialement préparé (fig. 22 et 23), qui permet d'identifier la tension en sortie de circuit en fonction de la profondeur à laquelle se trouve le défaut non débouchant (fig. 25). En négligeant l'effet de bord, on remarque deux paliers : de 0 à 4 mm et de 15 à 20 mm. La principale variation de tension a lieu entre 4 et 15 mm. À partir de 15 mm, le dispositif ne détecte plus le défaut. De plus, par calcul⁶, on a :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma_0 \omega}} = 7,7 \text{ mm} \quad (3)$$

5. Une variation de moins d'1mm dans l'acier et 5mm dans l'aluminium induit une variation de tension similaire à celle de correspondant à la présence d'une fissure.

6. Avec $\gamma_0 = 19,2 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ et $\omega = 4,4 \cdot 10^3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Ainsi, il est impossible de détecter un défaut à une profondeur supérieure à 2 fois l'épaisseur de peau à basse fréquence pour l'aluminium (les courants induits étant 87% plus faibles).



FIGURE 22 – Échantillon - Dessous

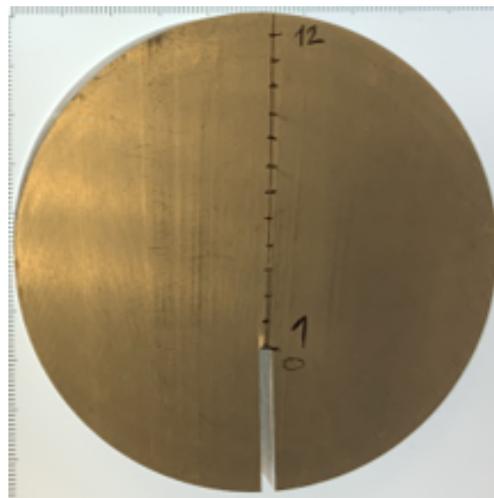


FIGURE 23 – Échantillon - Dessus

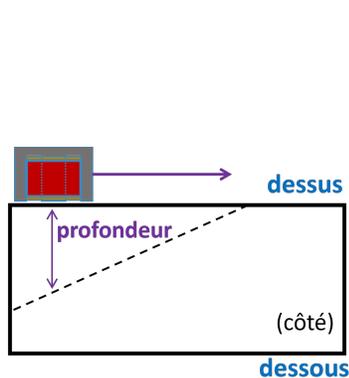


FIGURE 24 – Influence de la profondeur - Schéma

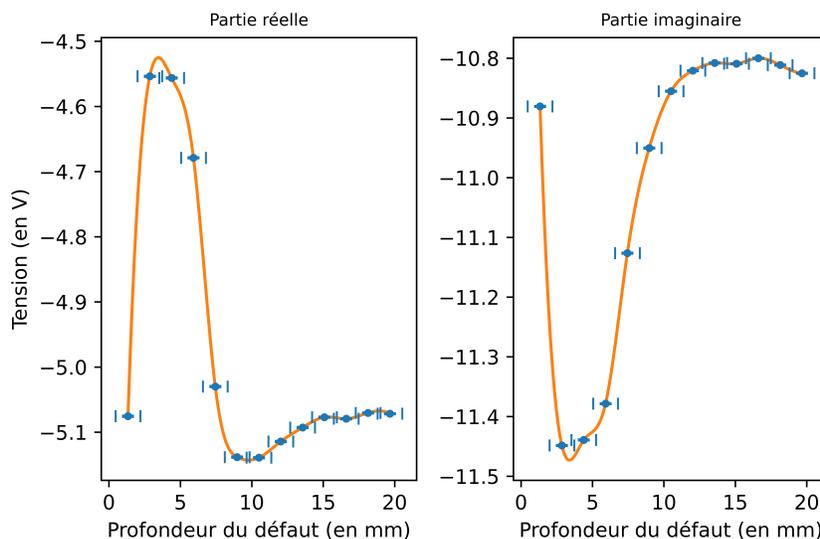


FIGURE 25 – Influence de la profondeur - Données expérimentales

3 Impédance - Résultats et Incertitudes

Résultats Après optimisation, j'ai atteint un rapport signal sur bruit de 10 pour une fissure débouchante dans une plaque d'aluminium (fig. 26).

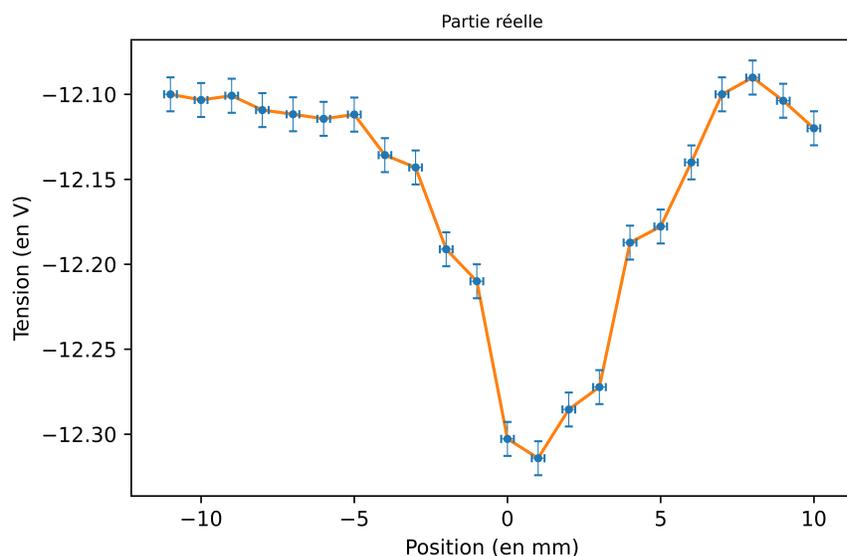


FIGURE 26 – Fissure dans l'aluminium - Données expérimentales



FIGURE 27 – Échantillon Al2

Le dispositif fonctionne également avec de la fonte et des fissures réelles comme celles d'une poulie fêlée quasiment invisibles à l'œil nu (fig. 29), et est sensible à l'état d'oxydation de la surface des deux cotés de la pièce ⁷.

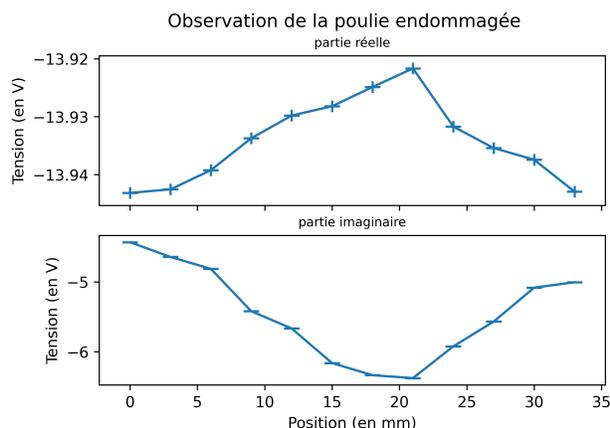


FIGURE 28 – Poulie en fonte - Données expérimentales



FIGURE 29 – Poulie en fonte - Fissures

Incertitudes Pour la position de la bobine, j'ai évalué des incertitudes de type B ($\pm 1\text{mm}$ du point considéré).

7. Ceci peut être néfaste à la détection de fissure (bruit) mais il est alors possible de détecter l'oxydation prématurée à l'intérieur d'une pièce métallique.

Pour la tension, la grandeur d'intérêt est la moyenne d'un signal périodique non harmonique. J'ai donc considéré que la moyenne du signal avait une incertitude de type A correspondant au bruit sur la porteuse.⁸ Dans l'aluminium, l'incertitude est de $\pm 1mV$, et dans l'acier elle est de $\pm 0,3V$.

Pour l'impédance ou d'autres mesures physiques déduites, il est nécessaire de prendre en compte les incertitudes du circuit électrique et son effet sur la fonction de transfert du signal, notamment sur le convertisseur tension-courant et le déphaseur. J'ai évalué les incertitudes sur les composants, la plage de déphasage de $\pi/2$, le coefficient du multiplieur et le convertisseur tension courant.⁹

4 Thermographie - Principe et Modélisation

Principe physique En chauffant la pièce métallique à contrôler à l'aide d'un montage à induction, il est possible d'observer sous une caméra thermique des discontinuités de température qui révèlent distinctement les défauts sur la plaque (fig 30).

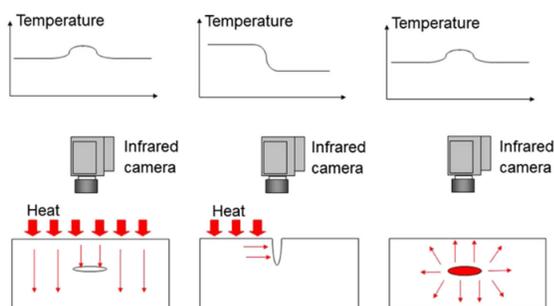


Fig. 6 Illustrations of thermal nondestructive testing classification.

FIGURE 30 – Principe de la thermographie

Modélisation Une simulation 2D par différences finies utilisant l'équation de Fourier et une condition limite à $150^{\circ}C$ sur le bord gauche de la plaque met en évidence l'échauffement de la fissure, modélisée par un coefficient de diffusion égal à celui de l'air (en bas à gauche fig. 31 & 32).¹⁰

8. L'incertitude de type A sur ce signal peut donc être approchée par son écart-type sur une mesure étalon. Il est néanmoins nécessaire de retirer la composante de la porteuse du signal, ce que j'ai essayé de faire par transformation de Fourier, sans succès car le signal n'était pas suffisamment périodique. C'est pourquoi j'ai utilisé le bruit sur la porteuse.

9. Non détaillé ici.

10. Cette modélisation ne prend pas en compte d'éventuels transferts par convection dans la fissure, et se limite au cas d'une fissure traversante.

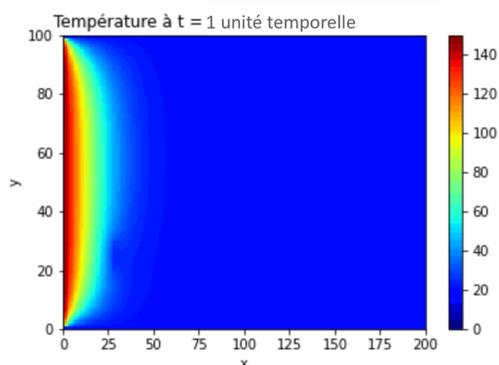


FIGURE 31 – Simulation par différence finie - $t=1$ unité de temps

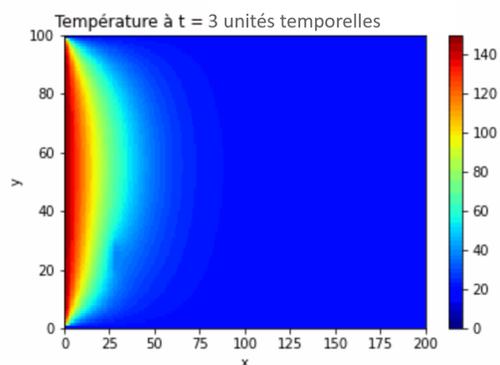


FIGURE 32 – Simulation par différence finie - $t=3$ unités de temps

5 Thermographie - Mise en Oeuvre et Optimisation

Protocole Nous chauffons les échantillons peints en noir¹¹ à 150°C à l'aide d'une plaque à induction portative (fig. 33). Une fois chauffés, ils sont déposés sous la caméra thermique sur une planche de bois qui fournit un fond uniforme, mat et isolant thermiquement. Nous prenons un cliché toutes les 10 secondes avec une caméra thermique FLIR E400 (fig. 34) jusqu'à une température uniforme. Nous analysons la série de photographie numériquement pour identifier la plus importante discontinuité de température sur une ligne donnée et tracer la variation de température sur cette dernière.



FIGURE 33 – Plaque à induction



FIGURE 34 – Caméra thermique

Durée d'observation La plus importante discontinuité de température est observable 10-30 s après le chauffage : le flux thermique a atteint la fissure, sans l'avoir contournée pour

11. La réflexion des ondes infrarouges sur la plaque gêne la mesure de température de celle-ci.

homogénéiser la température dans la plaque. (fig. 35 & 36).

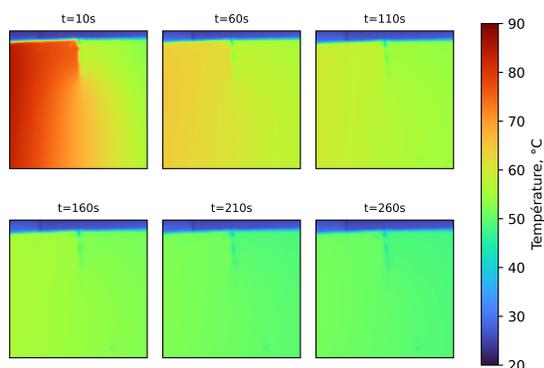


FIGURE 35 – Images IR à intervalles de temps réguliers

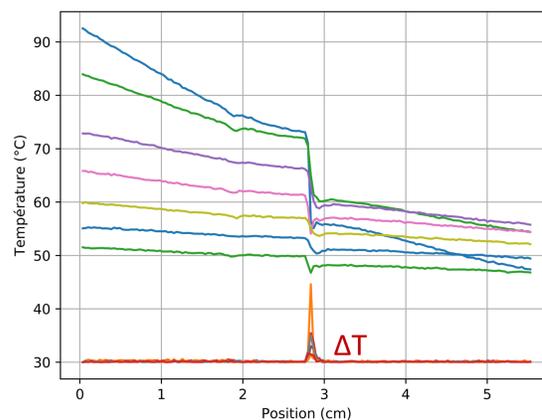


FIGURE 36 – Vue en coupe sur une ligne de la température, courbes hautes $t=0s$ à $t=120s$ température homogène

Longueur de la fissure Une fissure trop petite risque de ne pas gêner la diffusion sur un temps suffisamment long pour systématiquement révéler une discontinuité de température. La chaleur contourne alors la fissure et chauffe uniformément chacune des lèvres de la fissure (fig. 37 & 39) contrairement à une fissure longue (fig. 38 & 40).

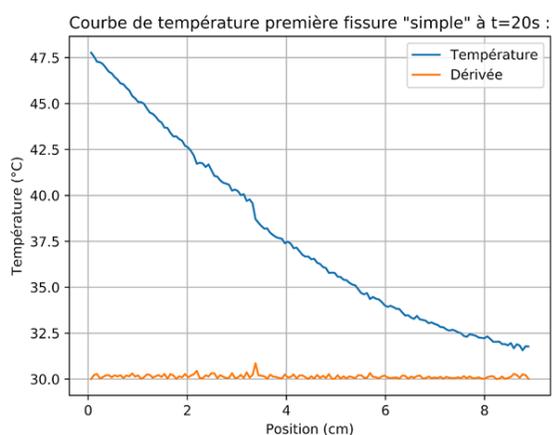


FIGURE 37 – Fissure courte (1cm)

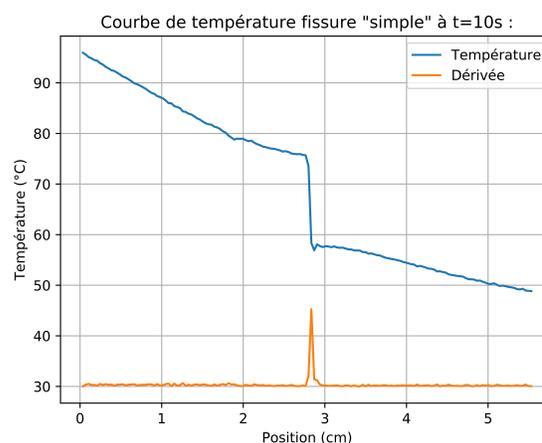


FIGURE 38 – Fissure longue (3cm)

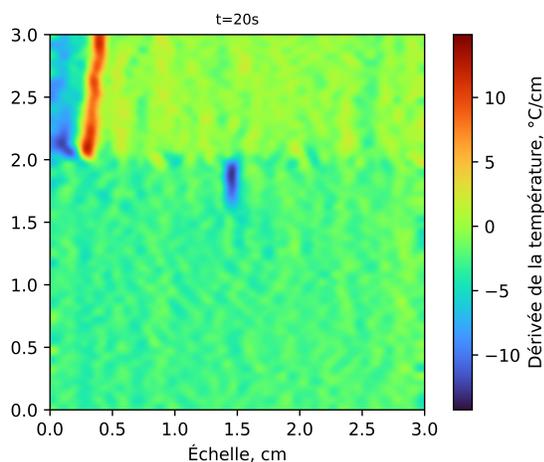


FIGURE 39 – Dérivée - Fissure courte (1cm)

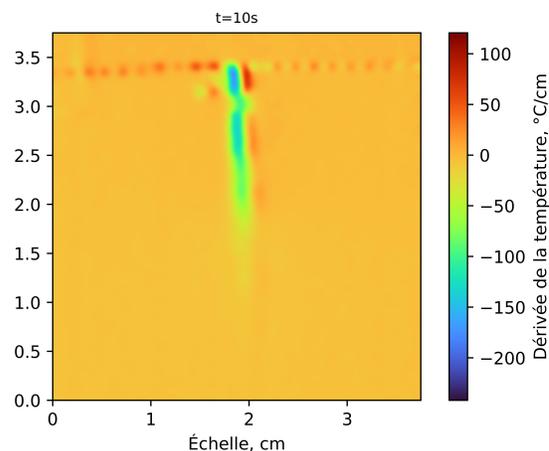


FIGURE 40 – Dérivée - Fissure longue (3cm)

6 Thermographie - Résultats et Incertitudes

Résultats Cette méthode permet de balayer rapidement une grande surface et de détecter des défauts débouchants, donnant des bons résultats qualitatifs et visuels.

Incertitudes L'incertitude provient majoritairement de la mesure de la température donnée par la caméra IR ($\pm 0, 1^\circ C$). Il serait aussi possible de considérer la résolution angulaire de la caméra. La méthode de détection de fissures par thermographie reste plus qualitative et visuelle que la méthode par variation d'impédance, donc j'ai choisi de ne pas mettre en avant les incertitudes sur les mesures sans pour autant les oublier.

7 Conclusion

Dans ce projet, j'ai mis en oeuvre et optimisé avec succès les méthodes de détection de fissure par thermographie et mesure d'impédance avec les moyens disponibles au laboratoire. A partir de cela, il a paru pertinent de comparer ces deux méthodes, ce qui permet de conclure que ces méthodes sont complémentaires pour leurs usages dans l'industrie (fig. 43).

Le cas d'un défaut non débouchant est intéressant à détailler : la thermographie est incapable de le dévoiler (fig. 42) (RSB=1) quand la méthode par mesure d'impédance le révèle parfaitement (fig. 41) (RSB=10). Cependant, une caméra plus sensible permettrait peut-être de le révéler.

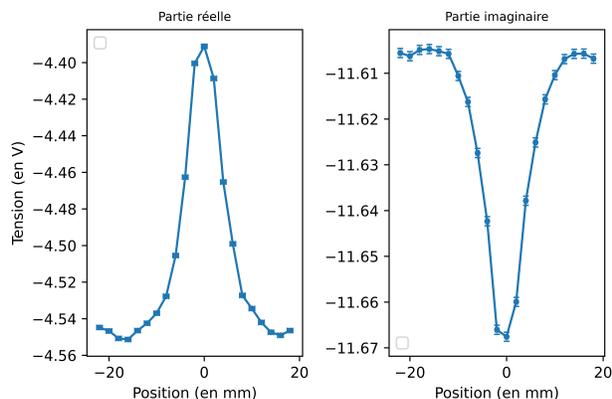


FIGURE 41 – Non-traversante Aluminium (impédance)

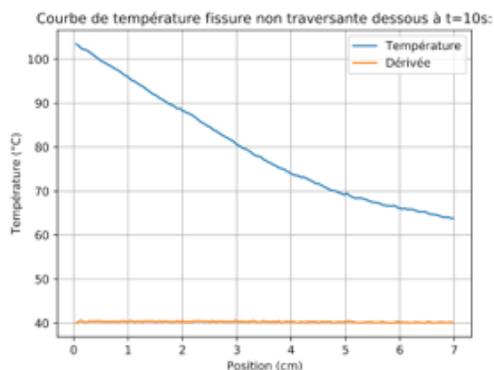


FIGURE 42 – Non-traversante Acier (thermographie)

Caractéristique	Impédance	Thermographie
RSB moyen	15	8
Détection de défaut non-débouchant	Possible	Difficile
Surface contrôlée	Petite surface linéaire	Grande surface d'un coup
Matériaux contrôlables	Acier, aluminium, fonte...	Acier
Caractérisation du défaut	Géométrie inconnue ou difficilement observable	Visualisation directe
Automatisation	Possible	Possible
Coût	Matériel accessible et relativement simple	Equipement coûteux
Puissance consommée	Faible	Forte
Utilisation	Sur un système en fonctionnement	Idem

FIGURE 43 – Tableau récapitulatif

Je désirais poursuivre d'autres pistes, telle que l'exploitation de la mesure simultanée de la partie réelle et de la partie imaginaire de la tension en sortie du circuit (ce que suggère la bibliographie [13]) et qui permet de s'affranchir de l'entrefer (observation en mode XY par exemple). Il aurait aussi été possible d'expérimenter avec un capteur multi-élément, ou encore une bobine excitatrice et l'autre réceptrice pour mieux caractériser les géométries de fissure. Enfin, la détection de fissure dans un tube en y glissant la bobine que nous a présenté Omexom était également une piste à développer, mais malheureusement le temps m'a manqué.

Références

- [1] J Hatsch and S Remond. Contrôle non destructif de structures composites pour l'aéronautique.
- [2] Patrick Bouteille and Gregory Legros. Thermographie par induction : une alternative aux contrôles conventionnels sur pièces forgées.
- [3] Awen Autret-Novitom. Titre : Un nouvel outil de simulation rapide pour la tomographie a rayons x.
- [4] John Wilson, Gui Yun Tian, Ilham Zainal Abidin, Suixian Yang, and Darryl Almond. Modelling and evaluation of eddy current stimulated thermography. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 25(3) :205–218, 2010.
- [5] Julien Kerouedan. *Conception et réalisation de sondes hyperfréquences pour la détection de micro-fissures de fatigue à la surface des métaux*. PhD thesis, Brest, 2009.
- [6] Farid Mabrouki. *Détection des fissures de fatigue par vibrothermographie*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2015.
- [7] Philippe Demy, Jean-Claude Golinval, and Daniel Simon. Détection d'endommagement de structures en matériaux composites cfrp par vibrothermographie. 2011.
- [8] Ala-Eddine Lakhdari. *Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : application à la détection de fissures*. PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2011.
- [9] Yann Le Bihan. Aspects expérimentaux du contrôle non destructif par courants de foucault. In *Colloque Inductique 2013*, page nc, 2013.
- [10] Johannes Vrana, Matthias Goldammer, Joachim Baumann, Max Rothenfusser, and Walter Arnold. Mechanisms and models for crack detection with induction thermography. In *AIP conference Proceedings*, volume 975, pages 475–482. American Institute of Physics, 2008.
- [11] G Zenzinger, J Bamberg, W Satzger, and V Carl. Thermographic crack detection by eddy current excitation. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 22(2-3) :101–111, 2007.
- [12] S Maillard, J Cadith, H Walaszek, A Dillenz, and JL Bodnar. La thermographie infrarouge stimulée, une nouvelle technique de contrôle sur les lignes de production. In *COFREND congress proceedings, Toulouse (France)*, 2008.
- [13] Chiara Zorni. *Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction*. PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI, 2012.