

Titre : Capteurs Courants de Foucault imprimés pour le monitoring de corrosion et de microstructure

Arnaud PELLETIER¹ – Benjamin DUCHARNE^{2,3} – Pierre-Jean COTTINET² – Elliott BRUN² - Fabrice COCKENPOT⁴

¹CMPHY, 26 Rue Paul Sabatier, 71530 Crissey, France;

²Univ. Lyon, INSA Lyon, LGEF EA682, Villeurbanne, France

³ELyTMaX IRL3757, CNRS, Univ Lyon, INSA Lyon, Tohoku University, Sendai, Japan

⁴SERPROTRONICS, 4 Rue du 19 Mars 1962, 71390 Buxy, France

Corresponding author, E-mail : arnaud.pelletier@cmphy.fr

Résumé

Dans le cadre du projet RAPID CMICA financé par l'Agence Innovation Défense, un consortium de trois entités regroupant les sociétés CMPHY et SERPROTRONICS, ainsi que le laboratoire commun LGEF-ELyTMaX de l'INSA de Lyon et Tohoku University (Japon), ont développés une technologie de micro-capteurs Courants de Foucault imprimés directement sur pièces ou substrat à coller pour le monitoring de structure et en particulier le suivi de la corrosion de structure aciers Fe-C et inoxydables, structure Aluminium et composite carbone avec des applications visées dans les domaines de l'énergie, la pétrochimie, l'aéronautique et le spatial.

Ces capteurs fabriqués par méthodes d'impression jet d'encre disposent de caractéristiques uniques à savoir une très faible épaisseur : < 500 µm et une tenue élevée à la température : -40°C à +200°C. Ils permettent à un instant donné d'obtenir une signature électromagnétique d'un acier (grandeurs magnétiques et électriques) et d'en suivre son évolution dans le temps : suivi de corrosion, changement aux niveaux de la microstructure.

Cette technologie de capteur par impression donne la possibilité de s'adapter à un large panel de pièces avec des géométries allant de structures planes à des formes incurvées (tubes, cuves). Il en effet possible d'épouser la forme de la pièce afin d'obtenir une très forte adhésion entre le capteur imprimé et la structure à monitorer. Un maillage de capteurs peut être facilement réalisé sur la pièce afin d'obtenir des cartographies et un suivi précis de son évolution. Ces micro capteurs peuvent être reliés à une console d'acquisition permettant de stocker et de transmettre les données sans fil vers l'extérieur pour traitement et analyse des composants monitorés.

1. Introduction

De nos jours, la plupart des méthodes et équipements de contrôle non destructif (CND) se présentent généralement sous la forme de capteurs de mesure destinés à être

utilisés manuellement par des opérateurs sur site. Ils sont principalement conçus pour les contrôles de fin de chaîne de production et pour détecter les défauts macroscopiques tels que les fissures, les porosités, les inclusions et les manques de matière. Ils sont également utilisés dans les services de maintenance pour contrôler la création et l'incidence des défauts après un certain nombre de cycles de fonctionnement [1]. Même si elles ne sont pas exploitées actuellement, ces méthodes de contrôle peuvent également nous fournir des paramètres supplémentaires liés à la santé du matériau et à son évolution dans le temps. Cependant, le coût et la taille de ces méthodes de mesure, ainsi que la nécessité d'un opérateur pour effectuer le contrôle, entravent leur utilisation pratique et le développement de la surveillance de l'état des matériaux [2]. En outre, certaines structures nécessitant des contrôles périodiques sont, de par leur environnement, difficiles à contrôler. Les principales causes de ces difficultés peuvent être les suivantes :

- Un environnement confiné, où les opérateurs peuvent difficilement atteindre les pièces à contrôler, ce qui entraîne des arrêts pour maintenance potentiellement longs et coûteux.
- Les travaux en hauteur, comme les ouvrages d'art, où l'accès est difficile et nécessite des opérateurs et des équipements spécialisés.
- Environnements dangereux caractérisés par des températures, des pressions ou des radiations élevées.

Le contrôle par courants de Foucault (ECT) est une méthode de CND qui permet d'inspecter les matériaux conducteurs d'électricité tels que les métaux ou les composites à base de carbone [3]. Dans sa forme la plus basique, la sonde ECT à élément unique (une bobine de fil conducteur) est excitée par un courant électrique alternatif. L'ensemble bobine/courant électrique produit un champ magnétique alternatif autour de lui. Le champ magnétique oscille à la même fréquence que le courant d'excitation. Lorsque la bobine s'approche de la pièce à contrôler, des courants sont induits dans le matériau : les courants de Foucault [4]. Les variations de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique de l'objet à

contrôler ou la présence de défauts entraînent une modification de la distribution des courants de Foucault. Cette variation se traduit par un changement de phase et d'amplitude qui peut être détectée en contrôlant l'impédance de la bobine tout au long du processus expérimental et qui constitue un signe révélateur de la présence de défauts.

L'architecture de l'ECT est suffisamment simple pour être envisagée pour la miniaturisation et le développement dans le cadre d'un projet de surveillance de la santé des structures (SHM) [7]. Plus spécifiquement pour la bobine du capteur, cette miniaturisation est possible en utilisant des bobines planaires fabriquées sur des circuits imprimés flexibles ou même imprimées, à l'aide d'encres conductrices, directement sur les pièces à contrôler. Les méthodes d'impression peuvent être utilisées pour obtenir des capteurs non invasifs d'une épaisseur réduite et d'une influence minimale sur les composants testés [6-8]. Ils peuvent être implantés de manière permanente sur les pièces testées (Fig. 1) et utilisés pour mener des campagnes d'essais dans des environnements confinés ou dangereux. À terme, les capteurs imprimés pourront également être utilisés pour inspecter des surfaces non planes (soudures [7], joints à rotule, etc.), impossibles à contrôler avec des méthodes conventionnelles et pour lesquelles le collage d'un capteur ne serait pas réaliste.

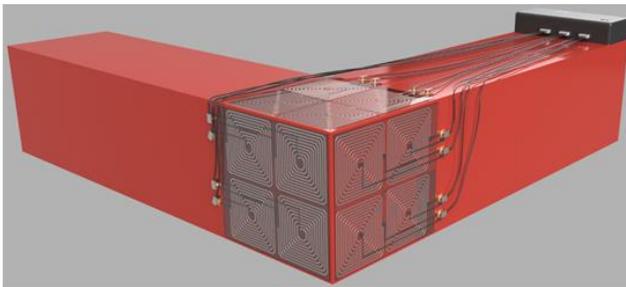


Fig 1 – illustration d'un capteur à spirale plate ECT imprimé sur pièce mécanique

Les bobines ECT miniaturisées et imprimées peuvent être construites séparément et utilisées comme un outil ECT conventionnel (manuellement par un opérateur). Elles peuvent également être intégrées directement pendant la fabrication, imprimées sur le composant à contrôler (Fig. 1), et utilisées comme outils pour le SHM et l'analyse. Cette perspective permet d'imaginer facilement la possibilité d'avoir des structures et des produits "intelligents" capables de s'autodiagnostiquer et de communiquer avec des services de maintenance externes [9].

2. Règles de conception des capteurs

L'objectif principal de ce développement de capteurs imprimés et leur utilisation pour le SHM et la détection de défauts. Pour atteindre notre objectif, nous devons concevoir des capteurs avec une géométrie spécifique. Dans le cas particulier de l'ECT, des bobines plates en spirale ont été favorisées.

Dans un processus classique de CND, l'opérateur effectue des balayages manuels le long de la pièce à tester pour détecter et localiser précisément les défauts potentiels. Le même résultat ne peut être obtenu avec des capteurs imprimés de manière permanente qu'en recouvrant entièrement la surface de la pièce à tester. Vient ensuite la question légitime de la résolution du pavage. Idéalement, elle devrait être aussi fine que possible pour maximiser l'efficacité de la détection. Cependant, dans un souci de limitation des coûts et de développement industriel à grande échelle, nous nous refusons d'utiliser des techniques issues de la microélectronique. La résolution maximale devient donc inhérente aux technologies de fabrication choisies pour l'étape d'impression.

Nous avons opté pour une surface de capteur d'environ 20 x 20 mm², ce qui semble une résolution acceptable pour la plupart des pièces mécaniques ciblées comme candidats potentiels pour des contrôles SHM périodiques. Une telle surface permet d'imprimer facilement des bobines de 10 à 20 spires. La technologie PCB a une meilleure résolution, et une bobine de 50 tours peut être obtenue avec la même surface.

Pour améliorer les performances des capteurs ECT, le facteur de qualité de la bobine Q (Eq. 1) doit être maximisé :

$$Q = \frac{Z'}{Z''} = \frac{R}{L\omega}$$

Eq. 1 – Facteur de qualité d'un capteur bobine

→ Un bon Q implique de maximiser L en fonction de R.

La façon la plus simple d'augmenter l'inductance de la bobine est d'augmenter le nombre de spires. Cependant, un tel changement implique des variations géométriques délétères pour d'autres caractéristiques.

Différentes options peuvent être énumérées pour augmenter le nombre de spires (voir l'illustration de la figure 2) :

- Augmenter la surface du capteur, mais cette solution diminuera la résolution de pose.
- Conserver la même surface, mais réduire la taille des pistes conductrices et ajouter de nouvelles spires à la conception d'origine. Toutefois, cette solution augmentera intrinsèquement la résistance.
- Diminuer la distance entre les pistes conductrices, mais le risque est d'ajouter des capacités parasites à la conception initiale.
- Opter pour une bobine multicouche, mais le défi de l'impression augmente de manière exponentielle en raison de la superposition des couches conductrices et diélectriques.

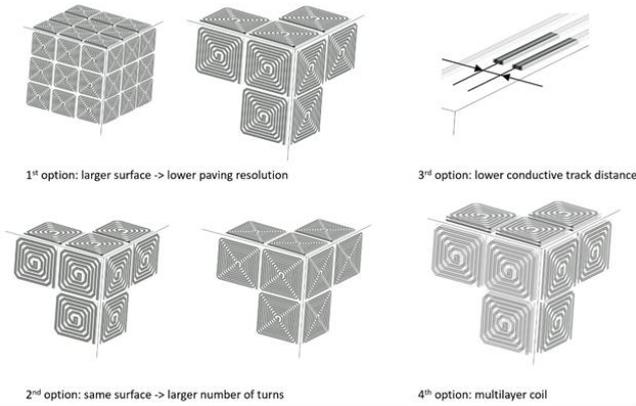


Fig 2 – Illustration des différentes options

Une vaste gamme de formes peut être envisagée pour la bobine hélicoïdale plane (Fig. 3). Les plus courantes sont circulaires, carrées ou rectangulaires :

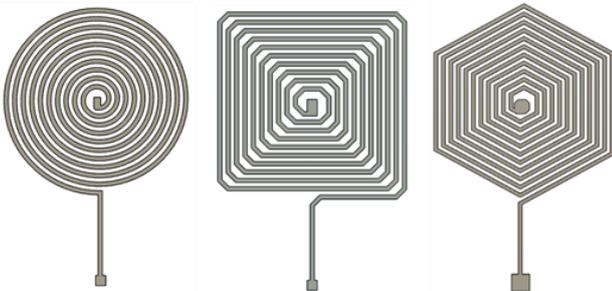


Fig 3 – Bobine circulaire, carrée et hexagonale à 10 spires

Chaque géométrie présente des avantages et des inconvénients :

- Les détecteurs circulaires sont recommandés pour la détection des fissures. Le problème des capteurs à ligne droite (carrés, rectangulaires, etc.) vient du fait que les fissures se développant parallèlement à ces lignes, créeront des variations d'impédance limitées.
- Néanmoins, dans le contexte du SHM, où une pose sur toute la surface est nécessaire, les capteurs circulaires produisent des zones "aveugles" où rien ne peut être détecté.

Un compromis possible consiste à utiliser des bobines hexagonales (figure 3). Même si des lignes droites sont toujours nécessaires, elles sont de taille réduite. La pose sur toute la surface est possible et le niveau de détection des fissures est amélioré.

3. Développement de capteurs imprimés

Trois techniques de fabrication peuvent être utilisées pour développer des bobines imprimées : l'impression dispensing, la sérigraphie et le circuit imprimé flexible.

L'impression dispensing et la sérigraphie impliquent l'utilisation d'encre diélectriques et conductrices et permettent de fabriquer le capteur directement sur la pièce à tester. L'ECT exigeant que les matériaux à contrôler soient conducteurs, il est impossible d'imprimer

directement sur une pièce, et une couche d'isolation diélectrique doit être mise en place dans un premier temps. Vient ensuite la couche d'encre conductrice de la spirale plane, suivie d'une couche diélectrique pour protéger le capteur de l'environnement extérieur. Enfin, une dernière couche d'encre conductrice est nécessaire pour relier le centre de la spirale et permettre les mesures électriques. La figure 4 illustre le processus d'impression et les différentes couches et la figure 5 l'empilement réalisé au sein du capteur.

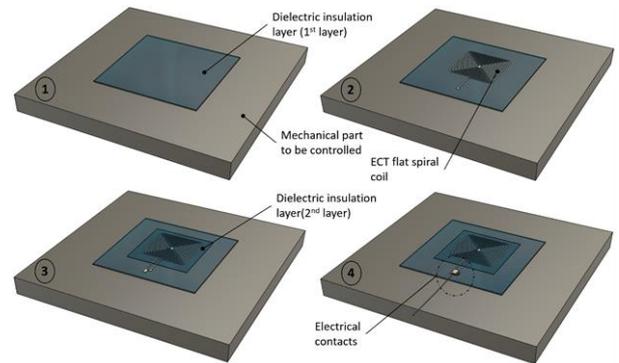


Fig 4 – Bobine circulaire, carrée et octogonale plane à 10 spires

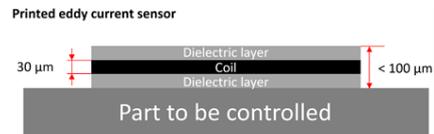


Fig 5 – Capteur de courants de Foucault imprimé, dimensions typiques

3.1. Dispenser printing

Un système d'impression par dispensing se compose d'une seringue qui dépose de l'encre sur un substrat. Des encres de viscosités très diverses peuvent être utilisées. L'encre peut être imprimée en continu, sous forme de filaments ou de gouttes successives (Fig. 6). Un contrôle précis de la pression dans le cylindre d'encre permet de passer du mode d'impression continu au mode d'impression discontinu.

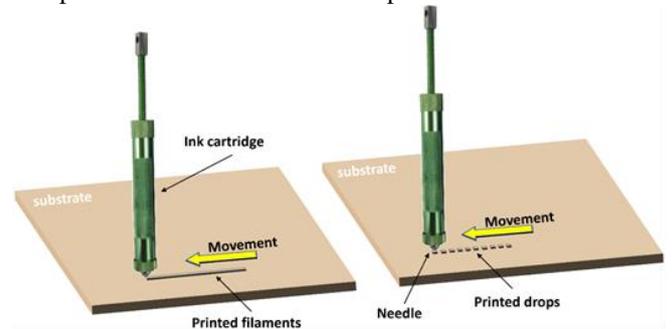


Fig 6 – Capteur de courants de Foucault imprimé, dimensions

Le diamètre de l'aiguille peut varier de 0,10 à 400 µm. Elle est constituée de capillaires de verre tirés pour les petits diamètres et d'acier inoxydable pour les autres. La

pression dépend du comportement viscoélastique de l'encre et du diamètre de l'aiguille.

Pour ce projet, l'imprimante 3D est associée à une tête d'impression. Un logiciel dédié contrôle l'ensemble du système. Cette tête d'impression comprend une seringue en aluminium anodisé dont le déplacement du piston est contrôlé par une vis sans fin. La seringue est assemblée sur un support spécifique, comprenant un moteur pas à pas pour régler précisément le couple vis/piston. La largeur des pistes déposées dépend du diamètre de l'aiguille. Cette étude a obtenu les meilleurs résultats (spirale de 10 tours dans une zone de 150 mm²) avec une aiguille de 0,33 mm de diamètre.

Le système permet l'accès à de multiples paramètres, dont la vitesse de déplacement de la tête d'impression et la vitesse de rotation du moteur pas à pas associée au flux d'encre. Le réglage de ces paramètres constitue la principale difficulté pour obtenir une impression de qualité.

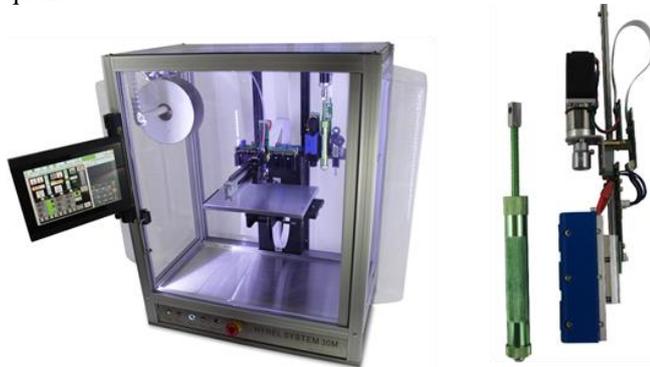


Fig 7 – Imprimante 3D et Tête d'impression pour capteur de courants de Foucault

La préparation des encres pour l'impression en distributeur apparait plus complexe que pour les autres méthodes d'impression. Les encres combinent des particules conductrices et des solvants appropriés.

Dans le cadre de ce projet, nous avons recherché des **encres conductrices et diélectriques capables de résister aux conditions de travail les plus extrêmes : jusqu'à une température de 200°C.**

Pour se faire, deux encres ont été mises au point :

- Une encre à base de polyimide pour la couche diélectrique,
- Une encre polyimide/particules d'argent pour la couche conductrice,

La figure 8 montre des capteurs à bobine planaire de 10 et 20 tours obtenus avec la technique d'impression dispensing et les combinaisons d'encres. Des essais d'endurance sur l'évolution dans le temps de la combinaison d'encres sélectionnée sont toujours en cours et seront publiés dans un prochain article.

Même si l'objectif final de ce projet est d'imprimer des capteurs permanents, nous avons décidé d'imprimer notre

premier lot de capteurs sur une feuille de Kapton de 50 µm. Les caractéristiques des techniques d'impression peuvent être évaluées en comparant les capteurs dans les mêmes conditions expérimentales (même substrat). Les capteurs imprimés peuvent être déplacés facilement pour tester différentes natures de matériaux. Le Kapton est "bon marché" et se caractérise par une rugosité de surface limitée, ce qui facilite le processus d'impression. Le kapton est également très flexible et les capteurs obtenus peuvent être testés sur une vaste gamme de géométries. Enfin, le Kapton présente une excellente résistance à la chaleur, ce qui nous offre un degré de liberté supplémentaire pour les conditions d'essai.

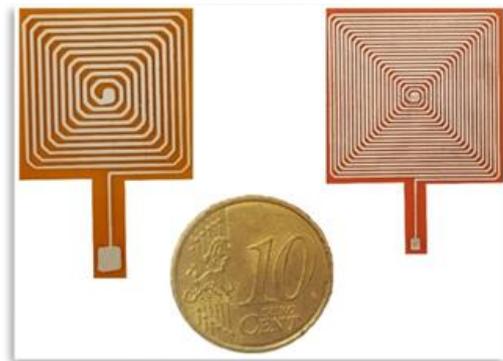


Fig 8 – Capteurs à bobine planaire de 10 et 20 tours obtenus avec la technique d'impression dispensing et les combinaisons d'encres

3.2. Sérigraphie - ScreenPrinting

La sérigraphie est une technique d'impression dans laquelle un tissu est utilisé pour transférer de l'encre sur un substrat, à l'exception des zones rendues imperméables par un pochoir de blocage. Une raclette est déplacée sur l'écran pour remplir d'encre les ouvertures du tissu. Un mouvement inverse fait que l'écran touche momentanément le substrat le long d'une ligne de contact. L'encre mouille alors le support et est extraite des ouvertures de la maille lorsque l'écran se redresse après le passage de la lame.

Toutes les combinaisons d'encres décrites ci-dessus peuvent être utilisées avec succès pour la sérigraphie. Néanmoins, nous avons limité le test à la combinaison sélectionnée en 3.1, qui a donné les meilleurs résultats en matière de résistance thermique.

La sérigraphie présente de nombreux avantages, dont les suivants :

- Une bonne reproductibilité
- Une meilleure résolution permettant un plus grand nombre de tours dans une zone donnée.

La figure 9 montre un capteur à bobine spirale de 20 tours obtenu avec la technique de sérigraphie et les combinaisons d'encres décrites en 3.1. À des fins de comparaison, le substrat est à nouveau une feuille de Kapton de 125 µm.

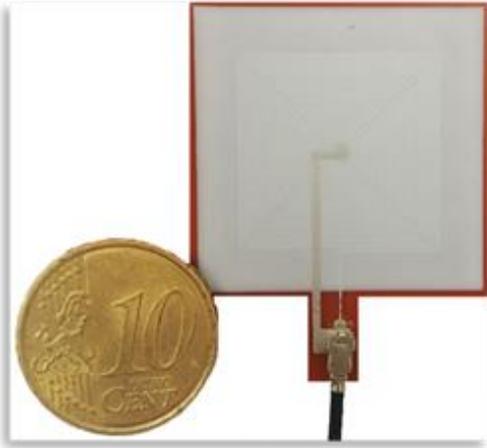


Fig 9 – Capteurs à bobine spirale planaire de 20 spires obtenu par la méthode de sérigraphie

3.3. Circuits imprimés Flex, PCB-Flex

La technologie PCB flex consiste à graver une couche conductrice en cuivre sur un substrat flexible. Alors que les circuits imprimés standard utilisent une base en fibre de verre ou en métal, les substrats PCB flex sont fabriqués à partir d'un polymère souple, ce qui permet à un circuit imprimé flexible de conserver ses fonctionnalités même dans une configuration pliée.

La plupart du temps, ce sont des films de polyimide qui sont utilisés. Le polyimide présente des propriétés thermomécaniques idéales, y compris la capacité de rester flexible même après thermodurcissement.

Dans le processus standard, une fois l'étape de gravure terminée, un second film de polyimide est déposé pour encapsuler et isoler le circuit de l'environnement extérieur. Tous les capteurs flexibles sur PCB ont été conçus à l'aide du logiciel CAD Altium Designer dans le cadre de ce travail. La figure 10 montre des capteurs flexibles à bobine spiralée de 10 et 20 tours.

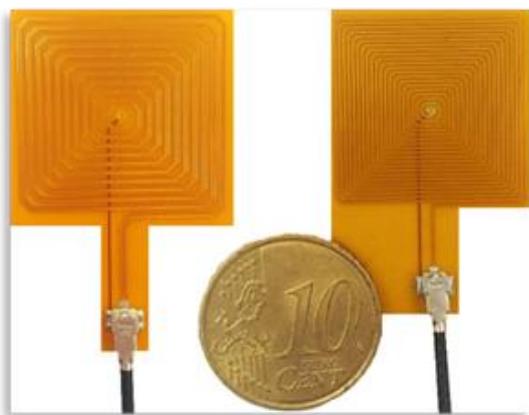


Fig 10 – Capteurs flexibles PCB à bobine planaire de 10 et 20 spires

4. Caractérisation des capteurs imprimés

4.1. Tests et identification de différentes natures de matériaux par capteurs imprimés sur substrat Kapton

* La première étape consiste à placer les capteurs testés loin de pièces conductrices ou magnétiques et pour éviter la génération de courants de Foucault et/ou des interactions indésirables. L'évolution de l'impédance électrique est mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau. La fréquence testée f augmente de 10 kHz à 5 MHz. Pour chaque fréquence, la résistance et l'inductance de la bobine ainsi que le facteur de qualité peuvent être calculés et utilisés pour comparer les capteurs. Tous les capteurs testés avaient la même géométrie : bobines en spirale de 10 tours, surface de 20 x 20 mm². Le tableau 1 présente les données obtenues pour les trois types de capteurs. Le comportement résonant proche de $f = 5$ MHz, qui induit des changements significatifs dans la réponse de la bobine, mérite d'être mentionné.

Tab. 1 - Résultats de la caractérisation des bobines planaires 10 spires.

	Dispenser Printing			Screen Printing			Flex PCB		
	R	L ω	Q	R	L ω	Q	R	L ω	Q
10 kHz	12.556	0.0450	0.0036	24.234	0.0772	0.0032	2.7319	0.0471	0.0172
100 kHz	12.572	0.9244	0.0735	24.268	1.0208	0.0421	2.7737	0.8646	0.3117
500 kHz	12.654	4.8292	0.3816	24.219	5.2975	0.2187	2.8563	4.4226	1.5584
1 MHz	12.235	9.7059	0.7933	23.915	10.648	0.4453	2.8700	8.9339	3.1129
5 MHz	0.0974	46.529	477.60	11.343	51.086	4.5038	0.1241	45.406	365.84

Les variations d'inductance sont limitées d'un capteur à l'autre, ce qui confirme que la géométrie de la bobine et le nombre de tours sont les seuls paramètres faisant varier l'inductance.

Les résistances des capteurs obtenus par dispensing et sérigraphie sont proches, environ dix fois plus élevées que celles des PCB. Une telle différence était prévue et est principalement due à la conductivité relativement limitée de l'encre utilisée.

Les capteurs dispensing et sérigraphiés présentent des caractéristiques très proches. Les deux méthodes peuvent être utilisées indifféremment pour capteur permanent.

* La deuxième étape consiste à reproduire les mêmes tests, mais en plaçant les capteurs à proximité d'un échantillon conducteur et éventuellement magnétique. Les courants de Foucault sont censés être générés dans les parties conductrices et modifier les impédances de la bobine du capteur [15]. Différentes natures d'échantillons ont été testées et des conclusions ont été tirées concernant la capacité des capteurs imprimés à distinguer un type de matériau d'un autre. Tous les spécimens testés ont été explicitement sélectionnés comme des matériaux modèles classiquement testés dans l'industrie. Il s'agit notamment de composites au carbone, de pièces en acier inoxydable et de pièces en acier ferritique.

Le tableau 2 présente une liste précise de tous les échantillons testés :

Carbon Composite	Carbon/epoxy
Stainless Steel	304L
	316L
	321
Ferritic Steel	35NCD16
	A37
	40CMD8

Tab. 2 – Liste exhaustive des échantillons testés.

La figure 11 montre toutes les mesures des spécimens testés sur le même plan d'impédance et pour différents niveaux de fréquences. La Fig. 11-a de 100 à 750 kHz, et la Fig. 11-b de 1 à 5 MHz. Le capteur est une bobine en spirale de 20 tours. La partie gauche de la figure 11-a a été mesurée avec un capteur sérigraphié et la combinaison d'encre, et la partie droite avec le circuit imprimé. Les mesures du capteur sérigraphié ne sont pas présentées ici pour des raisons d'espace, mais elles étaient très similaires à celles du capteur imprimé en dispensing.

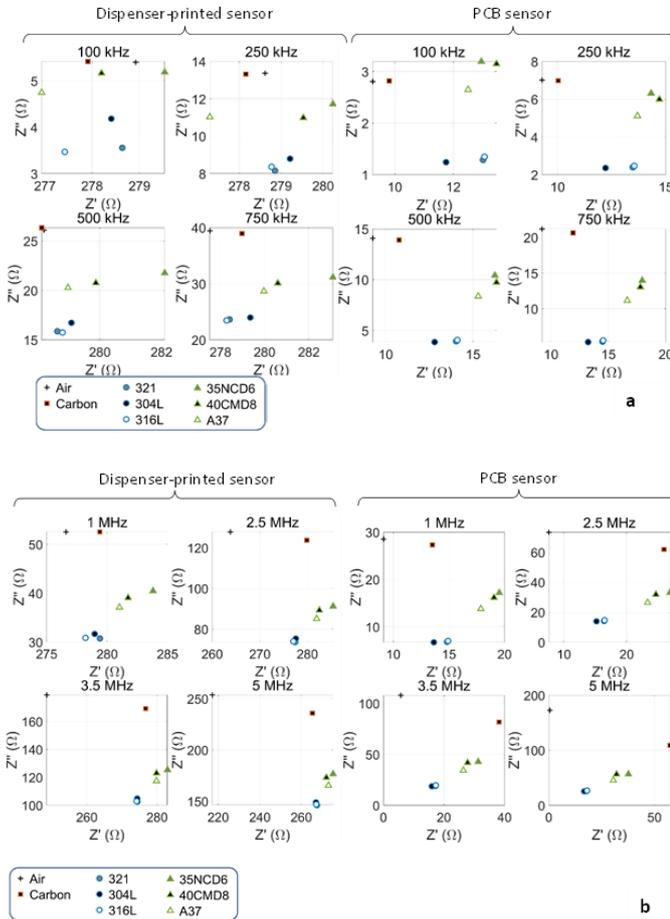


Fig. 11 – a Caractérisation de l'impédance des capteurs imprimés par dispensing et des capteurs PCB dans la gamme des basses fréquences et pour différentes natures de pièces testées. Fig. 11 - b Même caractérisation dans la gamme des hautes fréquences.

Même si la conductivité électrique du capteur imprimé à l'encre conductrice est inférieure à celle du PCB, une nette distinction peut être observée en fonction de la nature de la pièce testée, en particulier en dessous de 2,5 MHz, ce qui

confirme la viabilité du capteur imprimé. Cette observation est encore plus claire dans la figure 12, où les impédances des deux capteurs sont comparées sous forme d'histogramme et à 1 MHz.

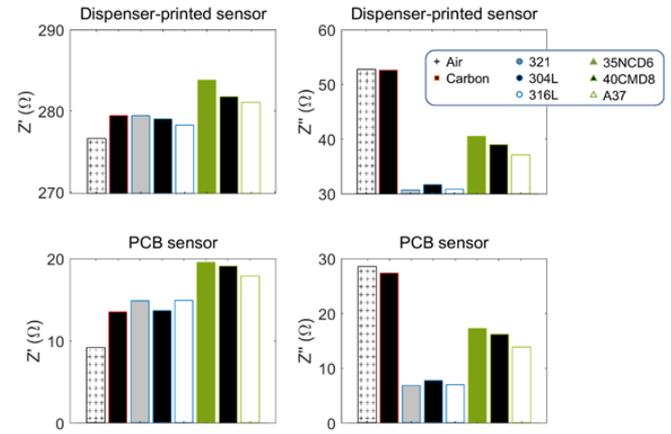


Fig. 12 – Comparaisons détaillées de l'impédance à 1 MHz.

Ces histogrammes nous permettent de comprendre les réponses de capteur lorsqu'ils sont à proximité de matériaux conducteurs. Pour chaque matériau on observe une augmentation de la partie réelle de l'impédance, en effet lorsque le capteur est posé sur le matériau un couplage apparaît, les courants de foucault apparaissent dans le conducteur, ils créent un champ magnétique secondaire opposé à celui généré par la bobine, augmentant son impédance. On voit que cette augmentation est plus importante pour les aciers ferromagnétiques. En effet ils ont une perméabilité magnétique plus élevées que leurs homologues inoxydables.

4.2. Mise en place de capteurs imprimés sur des pièces mécaniques

La dernière étape consiste à vérifier la viabilité de la méthode imprimée en implantant des capteurs sur des pièces solides. Pour ce faire, des spirales de 20 spires ont été imprimées sur des blocs d'acier inoxydable de 3 mm d'épaisseur. La combinaison d'encres développées a été utilisée. L'un de ces capteurs est illustré en figure 13.



Fig. 13 – Spirale plate de 20 spires dispensée-imprimée sur un bloc d'acier inoxydable de 3 mm d'épaisseur à l'aide de la combinaison d'encres diélectriques et conductrice

Six blocs d'acier inoxydable ont été instrumentés de cette manière pour tester la reproductibilité des mesures, et deux blocs ont été laissés intacts pour les mêmes raisons. Une fois cette reproductibilité confirmée, nous sommes allés plus loin dans le processus de vérification. Pour ce faire, nous avons comparé les réponses électromagnétiques du capteur permanent avec un capteur portatifs illustrés à la figure 9 et présentant des caractéristiques similaires (même géométrie et même combinaison d'encre). Deux capteurs portatifs ont été positionnés sur la surface supérieure des blocs vierges et leurs réponses électromagnétiques ont été contrôlées. La figure 14 montre ces comparaisons, qui sont, comme prévu, très similaires. La légère différence dans l'amplitude de $[Z]$ peut être attribuée à la variabilité du processus d'impression et aux variations mineures de résistance qui en résultent. Nous avons également calculé l'inductance des deux bobines à 1 MHz, nous obtenons respectivement $3,04 \times 10^{-6}$ H pour le capteur permanent et $4,09 \times 10^{-6}$ H pour le capteur portable, ces valeurs similaires confirment également la faisabilité de l'impression directe sur le substrat.

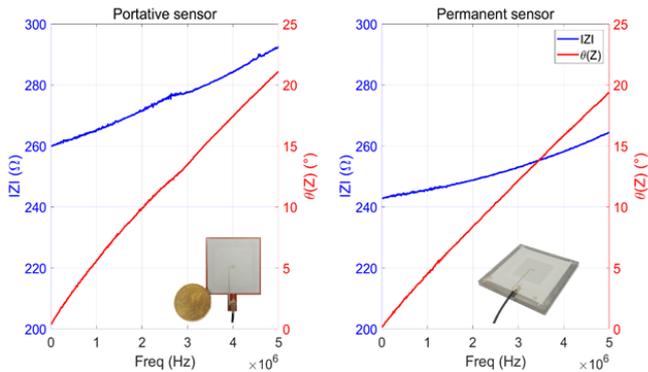


Fig. 14 – Comparaison des variations d'impédance entre les capteurs permanents et les capteurs portatifs.

Une autre étape de validation a été réalisée en perçant un trou de petite taille (\varnothing 0,35 mm, longueur 2 mm) dans la face inférieure d'une pièce instrumentée et en agissant comme un défaut potentiel, comme illustré dans la figure 15 ci-dessous.

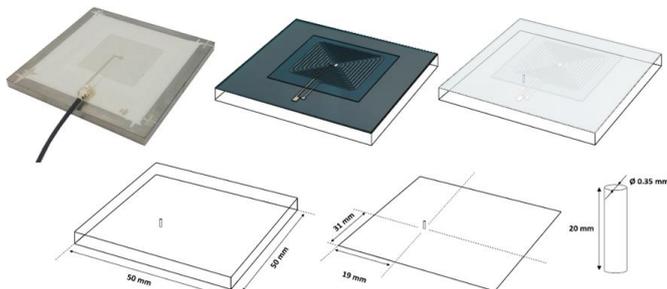


Fig. 15 – Distribution géométrique du défaut

Une nouvelle campagne expérimentale a été menée dans les conditions expérimentales de la figure 14, et les variations d'impédance résultant de la partie endommagée ont été comparées à celles des parties valides. Des variations évidentes ont été observées sur les diagrammes

complexes de la figure 16, confirmant la fiabilité des capteurs imprimés dans des conditions expérimentales proches de celles d'un environnement industriel.

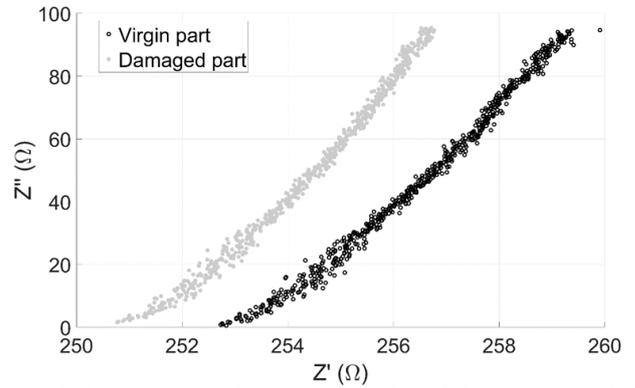


Fig. 16– Comparaison entre les réponses d'impédance de la pièce vierge et de la pièce endommagée (f compris $[100 - 5 \cdot 10^6]$ Hz).

En guise de test final, les capteurs portatifs ont été testés avec différents systèmes électroniques de conditionnement, y compris des systèmes commercialisés. Ces essais ont été réalisés sur des tôles plates en acier inoxydable et ferritique, comportant des défauts ouverts de 1×5 mm. Une bonne détection des défauts a été observée pour tous les capteurs testés, ce qui confirme leur compatibilité avec les équipements ECT industriels.

5. Applications Industrielles

Les applications visées de ces micro capteurs à courants de Foucault imprimés sont relativement large, à savoir :

- La mesure et suivi d'épaisseur sur acier inoxydable ou acier ferromagnétique de faible épaisseur
- La détection de fissuration de surface et le suivi de leur évolution sur pièce acier et composite carbone
- La détection et suivi de l'évolution de corrosion localisée ou généralisée

Pour ces essais, les capteurs ont été branchés sur un appareil Courant de Foucault du marché, le μ S2G2 de SGNDT, figure 17 :

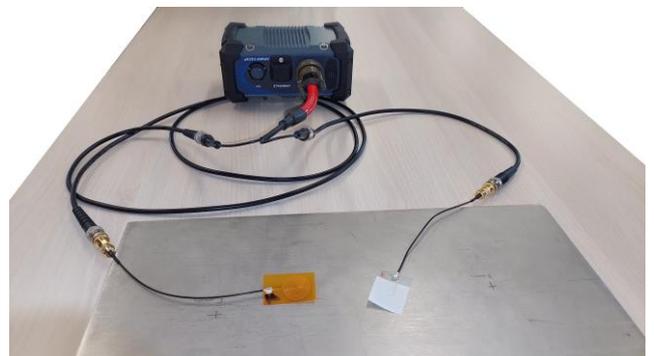


Fig. 17– Capteurs Courants de Foucault imprimés connectés à un appareil SGNDT

5.1. Mesure et suivi d'épaisseur

Des essais de mesures d'épaisseur ont été réalisés sur un acier inoxydable austénitique 310 avec un capteur imprimé à base d'encres développés dans le projet. Le capteur comporte 10 spires, diamètre ext20mm et travaille à une fréquence de 3kHz, figure 18. Le capteur est appliqué successivement en contact direct avec des pièces d'épaisseurs différentes.

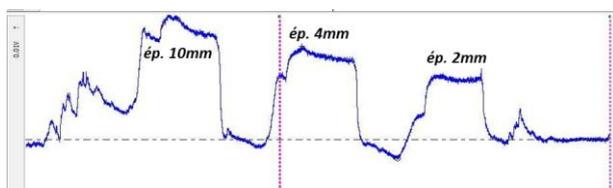


Fig. 18– Mesure d'épaisseur – Z'' à une fréquence de 3KHz

L'essai met en évidence la capacité du capteur à générer des courants de Foucault dans l'épaisseur totale des pièces permettant la mesure et le suivi d'épaisseur. Ces premiers essais sont prometteurs, des combinaisons de capteurs avec Emetteur et Récepteurs séparés seront réalisés afin d'augmenter la précision et la sensibilité de mesure de l'épaisseur.

5.2. Détection de fissure

L'essai suivant consiste à évaluer la capacité des capteurs Courants de Foucault imprimés à détecter des défauts type fissuration. La pièce d'essai est une tôle en acier ferromagnétique comportant de la fissuration de fatigue non détectable et non visible à l'œil (largeur 0.1-0.3mm).

Le capteur imprimé utilisé pour l'essai comporte 20 spires, diamètre ext20mm. Il est déplacé en surface de la pièce au-dessus du défaut, figure 19. La détection de la fissure est facilement réalisée :

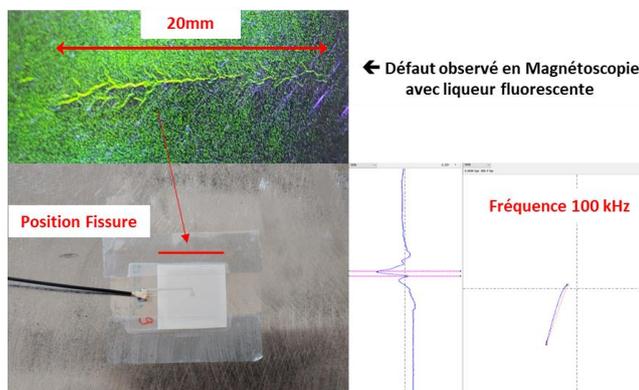


Fig. 19– détection de fissure – variation de Z à une fréquence de 100KHz

Afin d'évaluer leur capacité en termes d'apparition et de suivi de défaut, le même capteur a été placé en deux points écartés : à côté du défaut et sur la fissure, figure 20.

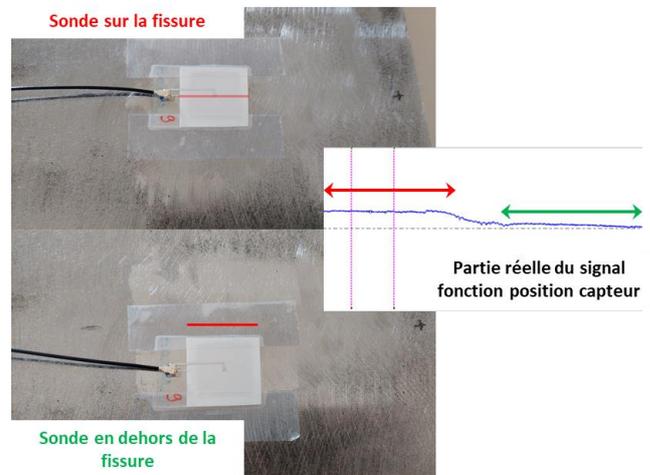


Fig. 20– Mesure d'épaisseur – visualisation de Z' à une fréquence de 200KHz

Une variation du plan d'impédance électrique du capteur a été observée entre les deux positions. Nous pouvons alors aisément imaginer un maillage partiel ou complet de pièce plane ou légèrement courbe afin de suivre l'apparition et l'évolution de défaut de fatigue type fissuration.

5.3. Suivi de processus de corrosion, vieillissement de matériau

Un dernier essai a été réalisé afin d'évaluer la sensibilité des capteurs imprimés à détecter une variation de structure représentative de la corrosion d'un acier. L'objectif est d'anticiper ces phénomènes et de suivre leurs évolutions dans le temps avant que la corrosion ne se généralise et que l'épaisseur commence à varier, figure 21.

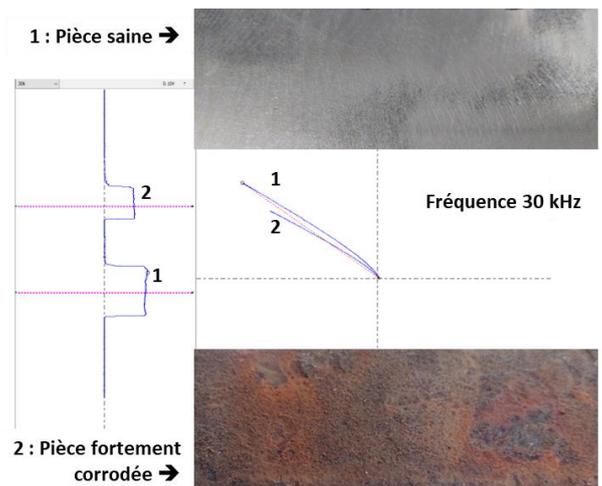


Fig. 21– Variation matière – Z'' à une fréquence de 30KHz

Les variations entre les deux signaux sont relativement fines mais détectables et quantifiables par notre capteur. Elles traduisent des variations locales de conductivité électrique et perméabilité magnétique liée à une variation de structure en surface de la pièce.

6. Mode de fabrication

Comme décrit au paragraphe 3 de cette publication, la fabrication des capteurs imprimés s'avère une opération délicate et nécessite une maîtrise complète du process en termes de :

- Homogénéité de l'encre déposée, pression en sortie de tête d'impression, vide d'air
- Viscosité et température du produit
- Positionnement de la tête d'impression par rapport à la pièce, en particulier pour des pièces courbes

Deux types d'équipements sont envisagés pour la fabrication en série par impression de capteurs courants de Foucault.

Tout d'abord des systèmes fermés type machine avec une tête d'impression fixe et une mécanique de déplacement trois axes de la buse d'impression, figure 22.

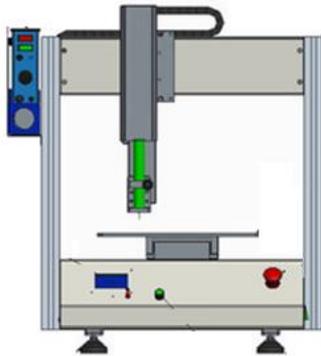


Fig. 22 – Machine d'impression de capteur

Ce type de machine permettra l'impression d'un ensemble de capteurs sous forme de feuille comportant plusieurs capteurs. Les capteurs sont ensuite collés sur les pièces à monitorer. Il est également possible d'imprimer directement sur surface plane, illustrations figure 23.

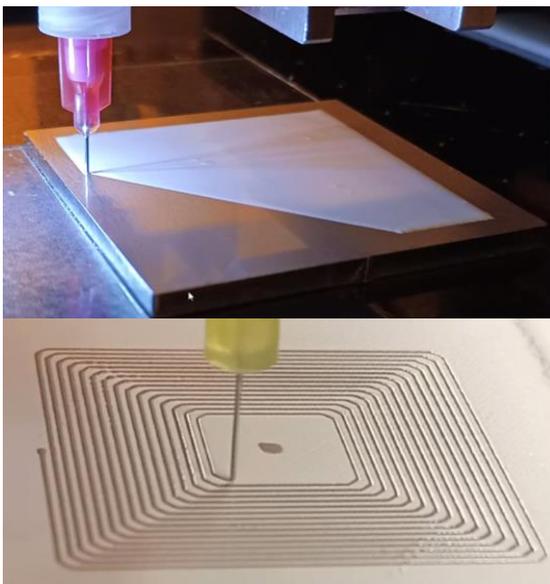


Fig. 23 – Impression directe sur pièce à monitorer

Un autre mode d'impression est également envisagé pour les pièces massives et difficilement positionnables dans une machine fixe en laboratoire. Il s'agit d'instrumenter un bras robot 6 axes avec une tête d'impression, ci-dessous en figure 24 un exemple possible d'instrumentation de bras mécanisé et automatisé.

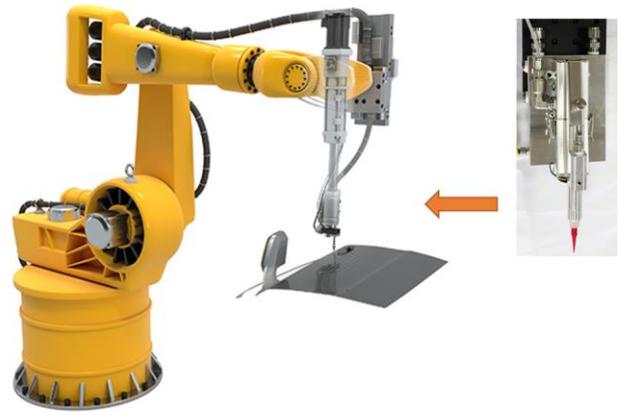


Fig. 24 – Impression directe sur pièce à monitorer

A ce stade du projet la principale difficulté est la maîtrise de l'impression en donnant une inclinaison et un mouvement à la tête.

Un module de gestion de la tête d'impression devra être développé pour gérer le dépôt de l'encre avec des géométries plus complexes : synchronisation du mouvement avec la position/orientation de la buse et des paramètres d'impression. Ce travail fera l'objet d'un développement spécifique à l'issue de ce projet de conception et design des micro capteurs imprimés.

7. Conclusions

Dans le cadre du projet RAPID CMICA, il a été démontré la possibilité d'utiliser un ensemble d'encres diélectrique et conductrice pour réaliser des capteurs de Contrôle Non Destructif à Courants de Foucault.

Cette technologie de capteur s'avère des plus intéressantes et prometteuses pour des applications de monitoring, SHM Structural Health Monitoring en particulier grâce à leur très bonne tenue dans le temps pour des températures pouvant monter jusqu'à 200°C.

Ce mode de fabrication permettra à terme d'envisager des productions de capteurs en grandes séries à bas coût et avec une excellente reproductibilité entre les sondes. En effet une fois le programme de fabrication mis au point, la production peut se faire de façon automatisée sans intervention humaine contrairement à des capteurs traditionnels réalisés en grande partie « à la main ».

A noter que des capteurs à base d’encres piézoélectrique et diélectrique sont également à l’étude et en cours de prototypage dans le cadre du projet CMICA, figure 25.

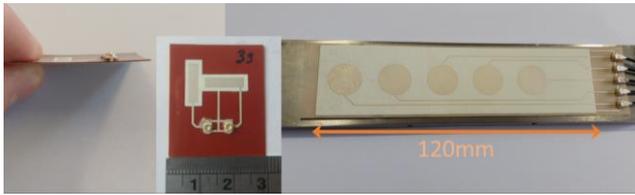


Fig. 25 – Capteurs Ultrasons réalisés par impression – Fréquence 5-15MHz

Ces capteurs sont implantés sur les pièces par collage avec des colles type cyanoacrylate ou aux doubles faces 3M. Ils pourront également être imprimés directement sur les pièces à monitorer.

Ils permettront de réaliser des mesures et suivi d’épaisseurs InSitu avec des technologies de capteurs similaires aux capteurs Courants de Foucault, figure 26.

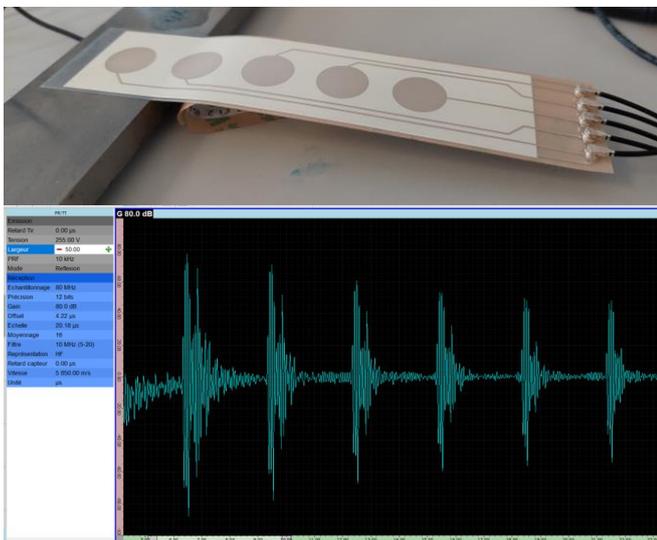


Fig. 26 – Mesure par Ultrason capteur piézoélectrique imprimé – Fréquence 10MHz

Une électronique compacte permettant de faire fonctionner l’ensemble de ces capteurs imprimés Courants de Foucault, Ultrason piézoélectrique est également en cours de conception, voir figure 27.



Elle permettra d’alimenter les capteurs, de stocker/traiter les données et de transférer les datas de mesures par une communication sans fil type Bluetooth. L’ensemble du

projet RAPID CMICA se terminera fin 2024 avec une industrialisation visée pour 2025/2026.

References

- [1] Raj B, Jayakumar T, Thavasisimithu M. Practical non-destructive testing. Woodhead Publishing; 2002.
- [2] Kot P, Muradov M, Gkantou M, Kamaris GS, Hashim K, Yeboah D. Recent advancements in non-destructive testing techniques for structural health monitoring. Applied Sciences. 2021 Mar 18;11(6):2750.
- [3] García-Martín J, Gómez-Gil J, Vázquez-Sánchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. Sensors. 2011 Feb 28;11(3):2525-65.
- [4] Xiang Z, Ducharme B, Della Schiava N, Capsal JF, Cottinet PJ, Coativy G, Lermusiaux P, Le MQ. Induction heating-based low-frequency alternating magnetic field: High potential of ferromagnetic composites for medical applications. Materials & Design. 2019 Jul 15;174:107804.
- [5] Gasparin E, Santi G, Nussbaumer A. Eddy current crack monitoring system for structural health monitoring (SHM) applications. In Proceedings of the 68th International Institute for Welding (IIW) Annual Assembly and International Conference, Helsinki, Finland 2018 Jun 28 (pp. 1084-1090).
- [6] Lynch JP, Loh KJ. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. Shock and vibration digest. 2006 Mar 1;38(2):91-130.
- [7] Nagayama T, Spencer Jr BF. Structural health monitoring using smart sensors. Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series 001. 2007.
- [8] Ni Y, Ji R, Long K, Bu T, Chen K, Zhuang S. A review of 3D-printed sensors. Applied Spectroscopy Reviews. 2017 Aug 9;52(7):623-52.
- [9] Khan SM, Atamturktur S, Chowdhury M, Rahman M. Integration of structural health monitoring and intelligent transportation systems for bridge condition assessment: current status and future direction. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016 Feb 29;17(8):2107-22.