

DÉTECTION DE MICRO-FISSURES À LA SURFACE DES MÉTAUX PAR DES TECHNIQUES MICRO-ONDES

DETECTION OF MICRO – CRACKS ON METAL SURFACES USING MICROWAVE TECHNIQUES

J. Kerouedan (*/**), P. Quéffélec (*), P. Talbot (*), C. Quendo (*), A. Le Brun (**)

(*) LEST - UMR CNRS 6165 – Université de Bretagne Occidentale, 29238 Brest, France

(**) EDF - R&D / STEP, BP 49, 78401 Chatou, France

julien.kerouedan@univ-brest.fr

Résumé

Dans ce papier, nous démontrons que les micro-fissures à la surface des métaux peuvent être détectées par une technique micro-onde en champ proche basée sur la mesure des variations induites par la fissure de la fréquence de résonance et du facteur de qualité d'un circuit résonant. En premier lieu, nous décrivons le principe de la méthode en utilisant un résonateur microruban $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique. La faible sensibilité de ce capteur nous a conduit à étudier si des sondes de types filtres DBR (Dual Behavior Resonator) passe-bande d'ordre 1 et d'ordre 2 étaient capables de détecter une rainure rectangulaire électro-érodée de 200 μm d'ouverture et de 3 mm de profondeur à la surface d'une plaque en acier. Ces expériences montrèrent une amélioration importante de la sensibilité. En outre, avec un DBR d'ordre 2, le pas d'incrément de la sonde fut augmenté en se servant du métal comme élément de couplage entre les deux stubs haute fréquence de la structure. Les résultats de simulation et de mesures sont présentés et analysés.

Abstract

This paper is aimed at demonstrating that micro-cracks at the surface of metals can be detected by a near-field microwave technique based on the measurement of the crack-induced variations of the resonance frequency and of the resonant circuit quality factor. The detection principle is developed, at first, from the use of a quarter-wavelength-long micro-strip line resonator ended by an electric dipole. The low sensitivity of the electric dipole resonator led us to investigate whether first- and second-order band-pass filters based on Dual Behavior Resonators were able to detect a 200- μm -wide and 3-mm-deep rectangular EDM notch at the surface of a steel plate. These experiments resulted in a marked enhancement of the sensitivity. Moreover, with the second-order filter, the incrementing step of detection was increased by using the metal as coupling element between the two high-frequency stubs of the device. Simulation data and measurement results are presented and discussed.

1. INTRODUCTION

Le phénomène de fatigue des structures métalliques est une des préoccupations majeures dans les centrales de production d'énergie en exploitation. La détection précoce des défauts de surface par Examen Non Destructif (END) permet une maintenance préventive pertinente des installations en évitant autant que faire se peut d'avoir à démonter, réparer ou remplacer prématurément les composants en service. Notre étude s'inscrit dans ce cadre. Nous nous intéressons à la détection de rainures rectangulaires électro-érodées, de 200 μm d'ouverture et de profondeur inférieure à 5 mm, situées à la surface d'une plaque en acier inoxydable AISI 304L de 20 mm d'épaisseur. Actuellement, la majorité des solutions automatisées d'END est basée sur des techniques utilisant les ultrasons [1] ou les courants de Foucault [2]. Cependant, malgré leurs sensibilité et résolution élevées, ces méthodes ne sont pas nécessairement adaptées à toutes les situations rencontrées en pratique. C'est pourquoi différents travaux de recherche sont en cours pour améliorer la détection, le dimensionnement et la modélisation [3], [4] des fissures de surface dans des matériaux conducteurs. D'autre part, les procédés de contrôle ultrasonore industriels ne permettent pas toujours de détecter de façon satisfaisante les défauts débouchants de faible profondeur (inférieure à 5 mm) localisés près de la surface d'inspection [5].

Pour dépasser ces limites, il nous a semblé intéressant d'évaluer le potentiel des techniques micro-ondes pour détecter des micro-fissures de surface dans les métaux, en complément des études menées sur les méthodes de contrôle plus classiques.

Dans ce papier, nous présentons une technique micro-onde en champ proche basée sur la mesure des variations (induites par le défaut débouchant) de la fréquence de résonance f_r et du facteur de qualité Q d'un circuit résonant. En premier lieu (§ 2), nous exposons un bref état de l'art des méthodes micro-ondes étudiées par le passé pour détecter des fissures de surface. Au § 3, nous présentons les critères utilisés pour évaluer le potentiel des différentes sondes que nous avons développées. Dans le § 4, nous décrivons le principe de la détection en utilisant un résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique rayonnant. Puis, dans le § 5, pour augmenter la sensibilité de la technique, nous proposons l'utilisation d'un autre type de résonateur : le filtre DBR (Dual Behavior Resonator) passe-bande. Le § 6 porte sur le filtre DBR d'ordre 2 et met en évidence la possibilité d'accroître le pas d'incrémentation de la détection en couplant deux résonateurs DBR avec la surface métallique. Enfin (§ 7), nous présentons quelques perspectives de nos travaux.

2. ETAT DE L'ART DES TECHNIQUES MICRO-ONDES ETUDIEES PAR LE PASSE POUR DETECTER DES FISSURES DE SURFACE

De nombreuses études récentes se sont intéressées à la détection des défauts de surface par des méthodes micro-ondes. Les approches champ proche et champ lointain ont été examinées pour estimer les dimensions des défauts de surface.

Avec une caractérisation en champ lointain [6], d'après la barrière de Abbe, les caractéristiques de dimensions inférieures à la demi-longueur d'onde ($\lambda/2$) de la radiation interagissant avec le matériau sous test ne sont pas détectables. La détection des micro-fissures avec des techniques en champ lointain implique donc de travailler à très haute fréquence ce qui entraîne une grande complexité des appareils et procédures de mesures et une miniaturisation coûteuse des capteurs. Par conséquent, une méthode de caractérisation en champ lointain s'avère peu adaptée à la détection d'objets de tailles micrométriques dans un environnement industriel.

Par contre, l'utilisation des ondes évanescentes permet d'atteindre des résolutions spatiales très inférieures à la longueur d'onde. L'amélioration de la résolution est due au fait qu'en champ proche, la résolution spatiale dépend principalement des dimensions de la sonde et pas nécessairement de la longueur d'onde de travail. Profitant de cette particularité de nombreuses méthodes de mesure en champ proche ont été développées pour permettre l'imagerie et la caractérisation des surfaces de divers matériaux sur une large gamme de fréquences.

Une première technique en champ proche consiste à mesurer les variations du paramètre de réflexion induites par un défaut localisé près de l'ouverture d'une structure de propagation ouverte (guide d'onde rectangulaire [7]-[9] ou ligne coaxiale [10], [11]). Les dimensions du défaut sont ensuite déduites des changements observés sur l'amplitude et la phase du coefficient de réflexion moyennant un étalonnage préalable effectué en plaçant le capteur devant un matériau sain. En outre, l'utilisation de guides d'ondes terminés par une antenne fente [12] ou par un taper [13], [14] ou de guides d'ondes diélectriques [13], [14] a permis d'améliorer la résolution spatiale et la sensibilité de la détection. Ces méthodes ont été appliquées avec succès à la détection de fissures de surface [7], [10], [11]. Toutefois, dans le cas d'une micro-fissure, les variations du module et de la phase du coefficient de réflexion à mesurer sont extrêmement faibles (variations du module de l'ordre du centième de dB), ce qui ne permet pas d'appliquer ces principes à des cas industriels.

Une seconde méthode repose sur l'utilisation de résonateurs en champ proche pour mesurer les changements de la fréquence de résonance f_r et du facteur de qualité Q induits par le matériau à tester. Ces variations peuvent être aisément observées en utilisant un analyseur de réseau. Les résonateurs décrits dans la littérature sont terminés soit par une extrémité en forme de pointe [15], [16]-[18], un dipôle électrique ou un dipôle magnétique [15], [19]-[22] de manière à focaliser le champ rayonné par le résonateur sur l'échantillon à caractériser. De nombreuses études ont montré que la résolution spatiale dépend de la taille de l'extrémité de la sonde et de la distance entre la sonde et l'échantillon à tester. Les résonateurs en champ proche ont permis de cartographier des défauts dans divers métaux [15], [16], [19], [21], [22] et d'atteindre des résolutions spatiales inférieures au micron [15].

Toutes ces considérations nous ont conduit à proposer la détection de micro-fissures à la surface des métaux par une technique en champ proche basée sur les variations (induites par le défaut débouchant) de la fréquence de résonance f_r et du facteur de qualité Q d'un circuit résonant. Il faut ajouter que dans cette étude, nous nous sommes focalisés sur la conception de sondes en technologie microruban.

3. DESCRIPTION DES PARAMETRES D'EVALUATION DES CAPTEURS

Pour tester les capteurs que nous avons développés, nous nous sommes intéressés à la détection d'une rainure rectangulaire électro-érodée de 200 μm d'ouverture et de 3 mm de profondeur localisée à la surface d'une plaque en acier inoxydable. Les deux critères retenus pour évaluer le potentiel des sondes réalisées sont : i) la sensibilité pour une distance sonde-métal donnée ($d \geq 50 \mu\text{m}$) et ii) le temps nécessaire pour contrôler une surface métallique. La résolution des sondes est également abordée mais ne sera pas discutée en détail dans ce papier.

Les simulations avec le logiciel commercial HFSS (méthode des éléments finis (FEM)) et les mesures réalisées avaient pour but de déterminer la sensibilité et la résolution de nos capteurs. Il est important à ce stade de rappeler que les variations de la fréquence de résonance et du facteur de qualité de la cavité résonante, notées f_r et Q respectivement, sont

causées par la présence d'un défaut localisé au voisinage de la cavité (méthode des faibles perturbations). Notons Δf_r la différence de fréquence de résonance et ΔQ la différence de facteur de qualité entre un métal présentant une fissure de surface et un métal sain. Les plus petites variations mesurables avec un analyseur de réseau sont notées Δf_{r_min} et ΔQ_{min} . Pour une fissure ayant une largeur et une profondeur connues, la sensibilité du capteur correspond à sa capacité à atteindre les plus fortes valeurs de Δf_r et de ΔQ . A condition que les dimensions de la sonde et la distance sonde-métal d soient fixées et que $\Delta f_r \geq \Delta f_{r_min}$ et $\Delta Q \geq \Delta Q_{min}$, la résolution est la largeur de fissure minimale que la sonde peut détecter.

D'autre part, les capteurs ont été réalisés sur substrat alumine (permittivité $\epsilon_r = 9.4$ et tangente de perte $tg\delta = 6.10^{-3}$) et leur dimensions ont été choisies de manière à obtenir une fréquence de résonance autour de 10 GHz. Ceci nous permet de travailler avec des circuits compacts et d'obtenir des variations de fréquence de résonance facilement mesurables avec un analyseur de réseau.

4. LIGNE $\lambda_g/4$ TERMINEE PAR UN DIPOLE ELECTRIQUE RAYONNANT

La première sonde que nous avons mise en oeuvre est une ligne microruban $\lambda_g/4$ [19] (sur substrat alumine 96% d'épaisseur $h = 508 \mu\text{m}$) terminée par un dipôle électrique rayonnant (cf. Figure 1). Les lignes de transmission déposées sur le substrat alumine sont en or (conductivité $\sigma = 4.1.10^7 \text{ S/m}$) et l'épaisseur de métallisation est de $t = 5 \mu\text{m}$. Le dipôle électrique rayonnant est constitué de deux fils d'or de $17 \mu\text{m}$ de diamètre qui sont soudés respectivement au taper et à l'extrémité du plan de masse. Son but est de focaliser le rayonnement qui provient du résonateur sur le défaut à détecter.

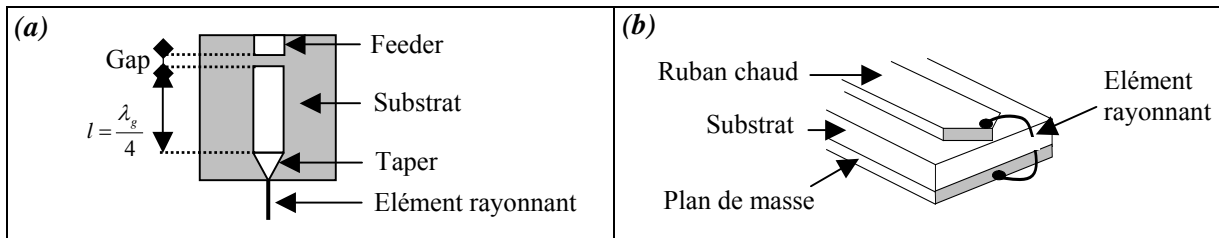


Figure 1 : Schéma du résonateur $\lambda_g/4$ (a) et zoom sur le dipôle électrique (b).

Des simulations HFSS ont été réalisées pour une plaque en acier inoxydable disposée à une distance $d = 50 \mu\text{m}$ de l'extrémité du capteur et présentant une rainure de surface de $200 \mu\text{m}$ de largeur et de 3 mm de profondeur. Elles ont montré une élévation de 10 MHz (données non présentées ici) de la fréquence de résonance f_r ainsi qu'une augmentation de facteur de qualité Q de 147 ($\Delta Q/Q = 20\%$) lorsque le capteur se trouve au dessus du milieu de la rainure.

Pour confirmer ces résultats de simulation, des mesures ont été réalisées en utilisant une plaque d'acier inoxydable contenant des entailles rectangulaires électro-érodées de $200 \mu\text{m}$ d'ouverture, et un dispositif de mesure comprenant un analyseur de réseau PNA E8364A et une table de déplacement XYZ. La figure 2 (a) montre un schéma de la sonde au dessus de la rainure. Les largeur (W , dans la direction x), profondeur (h , dans la direction z) et longueur (L , dans la direction y) de la rainure étudiée sont respectivement de 0.2 , 3 et 10 mm .

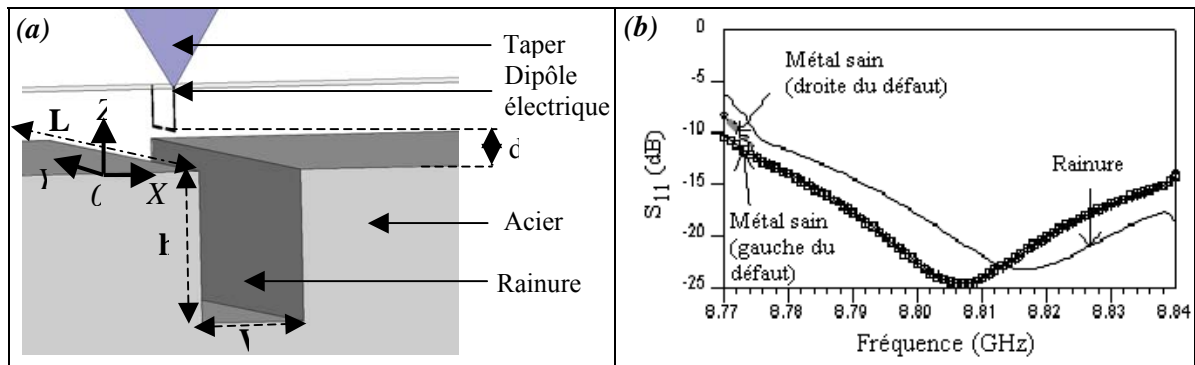


Figure 2 : Schéma du résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique rayonnant au dessus de la rainure (a) et mesures du paramètre de réflexion obtenues devant un métal sain et devant la rainure pour une distance sonde-métal $d = 50 \mu\text{m}$ (b). Les paramètres W , h , L représentent respectivement les largeur, profondeur et longueur de la rainure et d est la distance sonde-métal.

La figure 2 (b) donne l'évolution en fréquence du paramètre de réflexion observée lorsque la distance sonde-métal est de $d = 50 \mu\text{m}$. Les décalages de la fréquence de résonance et du facteur de qualité observés lorsque la sonde est positionnée juste au dessus du centre de la rainure sont respectivement de $\Delta f_r = 10 \text{ MHz}$ et $\Delta Q = 80$ ($\Delta Q/Q = 17.3\%$). De plus, on trouve la même valeur pour f_r et Q des deux côtés de la rainure (mesures réalisées à $x = -500 \mu\text{m}$ et $+500 \mu\text{m}$ du milieu de la rainure) ce qui signifie que les variations Δf_r et ΔQ ne sont pas causées par un défaut de planéité (i.e. par des variations de d) de la plaque. La mesure est donc reproductible. La différence de facteur de qualité observée entre les simulations et les mesures résulte des imprécisions inhérentes à la réalisation de la sonde.

La figure 3 présente les variations de la fréquence de résonance Δf_r quand un déplacement unidimensionnel est réalisé suivant la direction x pour des distances sonde-métal d de $50 \mu\text{m}$ et $75 \mu\text{m}$. Le pas d'incrément de la sonde est de $10 \mu\text{m}$ et l'origine ($x = 0$) correspond au milieu de la rainure. Elle montre que la sensibilité est meilleure pour $d = 50 \mu\text{m}$; dans ce cas, la variation Δf_r entre le milieu de la rainure et le métal sain est de 10 MHz contre 4.5 MHz pour $d = 75 \mu\text{m}$. En outre, il faut souligner qu'expérimentalement pour $d > 100 \mu\text{m}$, la sonde est incapable de détecter la rainure ($\Delta f_r \approx 0 \text{ MHz}$).

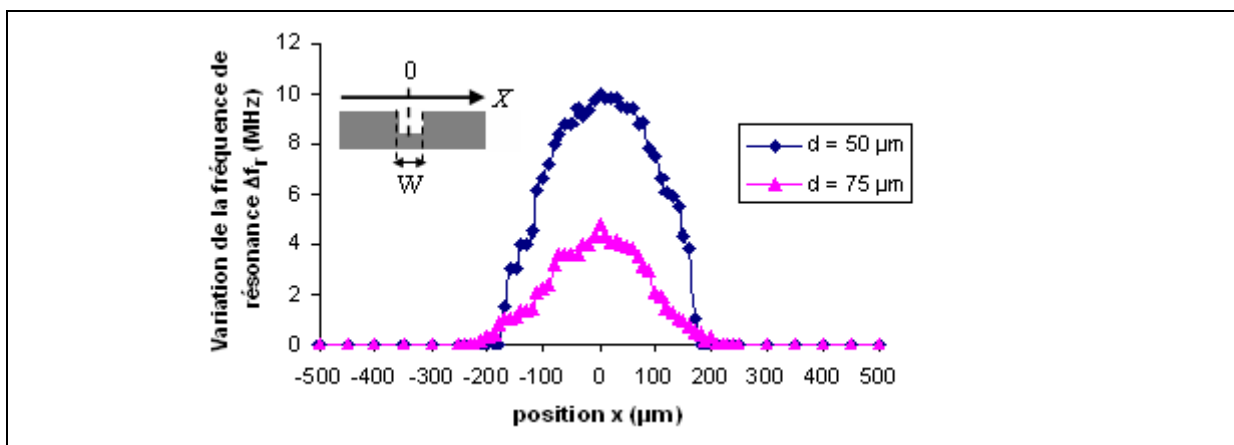


Figure 3 : Déplacement unidimensionnel (direction x) de la sonde au dessus d'une plaque en acier inoxydable présentant une rainure ($W = 200 \mu\text{m}$) de surface pour des distances sonde-métal d de $50 \mu\text{m}$ et $75 \mu\text{m}$; $x = 0$ correspond au milieu de la rainure. Mesure de la variation de la fréquence de résonance en fonction de x .

De plus, pour $d = 50 \mu\text{m}$, la figure 3 montre que : i) la variation la plus importante de f_r est obtenue au centre de la fissure et ii) la fréquence de résonance caractéristique d'un métal sain est mesurée à $x = \pm 180 \mu\text{m}$ du centre de la rainure. Cette distance est révélatrice de la résolution spatiale de la sonde et dépend de la taille du faisceau généré par la sonde. Les simulations réalisées avec HFSS ont montré que pour $d = 50 \mu\text{m}$, la surface métallique illuminée par la sonde avait la forme d'un disque de diamètre égal à environ $150 \mu\text{m}$.

Le résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique rayonnant est capable de détecter la rainure de surface de $200 \mu\text{m}$ d'ouverture et de 3 mm de profondeur. Cependant, la mesure a mis en évidence les inconvénients suivants : i) pour l'expérimentateur, le placement des deux fils constituant le dipôle électrique exactement face à face et le contrôle précis de la distance les séparant s'avèrent très délicats. Par conséquent, la sonde de mesure réalisée n'est pas parfaitement similaire à celle étudiée en simulation. ii) de plus, les fils étant fragiles, ils peuvent se casser facilement. Enfin, les variations de f_r et Q induites par le défaut étant relativement faibles, il serait intéressant de développer un capteur plus sensible.

5. SONDE DE TYPE FILTRE DBR PASSE-BANDE D'ORDRE 1

L'analyse critique de la campagne de mesure réalisée à l'aide du résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique nous a conduit à concevoir d'autres types de sondes. Afin d'augmenter la sensibilité de la méthode, nous avons choisi d'exploiter les paramètres de réflexion et de transmission d'un filtre DBR [23], [24] passe-bande.

Le premier dispositif que nous avons testé est un filtre passe-bande d'ordre 1 (avec deux stubs en circuit ouvert) en technologie microruban (substrat alumine 96% d'épaisseur $h = 508 \mu\text{m}$). Le principe de la mesure consiste à faire interagir le stub haute fréquence (stub HF, de largeur W_{HF}) du filtre avec la plaque métallique (cf. Figure 4 (a)). Le couplage capacitif entre la plaque métallique et le stub HF positionné à la distance sonde-métal d augmente artificiellement la longueur du stub HF et abaisse par conséquent la fréquence du zéro de transmission associée à ce dernier. D'après la littérature, les conditions requises pour détecter un défaut de largeur, W , sont $W_{HF} \leq W$ et $d \leq W$. Nous avons donc fixé la largeur du stub HF à $W_{HF} = 100 \mu\text{m}$. De plus, pour accroître l'intensité du champ électromagnétique rayonné vers l'échantillon sous test, le substrat a été coupé au bout du stub HF. L'interaction entre le stub HF et la rainure va induire un décalage de la fréquence haute et de la fréquence centrale du filtre. Par contre, la fréquence basse reste inchangée puisque le stub basse fréquence (stub BF) n'interagit pas avec la fissure. La mesure donne donc accès aux fréquences haute f_{HF} et centrale f_0 du filtre ainsi qu'aux facteurs de qualité associés à la bande haute et au filtre global. On dispose alors de quatre paramètres au lieu de deux avec le résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique (f_r et Q), ce qui est plus favorable pour la résolution du problème inverse (détermination des dimensions géométriques de la fissure).

La figure 4 présente la structure de la sonde DBR d'ordre 1 et les courbes du paramètre de transmission S_{21} mesurées en présence de la plaque d'acier contenant la rainure de surface de $200 \mu\text{m}$ de large et de 3 mm de profondeur pour une distance sonde-métal d de $50 \mu\text{m}$. Les simulations HFSS réalisées pour étudier ce cas de figure avaient permis de mettre en évidence des élévations de f_{HF} et f_0 de 98 et 32 MHz , respectivement (données non présentées) et une diminution du facteur de qualité ($Q_{rainure} = 42.841$ contre $Q_{m\acute{e}tal_sain} = 48.963$ i.e. $\Delta Q/Q = 12.5\%$) quand la sonde DBR d'ordre 1 était positionnée au dessus du centre de la rainure. Les mesures présentées sur la figure 4(b) montrent que la présence de la rainure induit des augmentations de f_{HF} ($\Delta f_{HF} = 39 \text{ MHz}$) et de f_0 ($\Delta f_0 = 15 \text{ MHz}$) (données non présentées) accompagnées d'une réduction du facteur de qualité du filtre ($Q_{rainure} = 44.741$ contre $Q_{m\acute{e}tal_sain} = 46.165$ i.e. $\Delta Q/Q = 3.1\%$).

Les décalages observés expérimentalement sont donc plus faibles que ceux obtenus en simulation. Néanmoins, la variation de fréquence observée en mesure lorsque la sonde DBR d'ordre 1 est située au centre de la rainure est près de quatre fois supérieure à celle observée avec le résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique rayonnant.

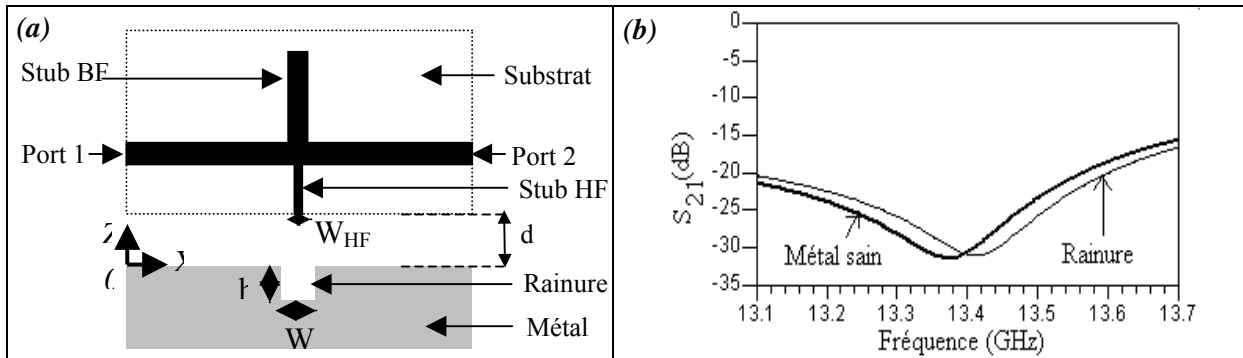


Figure 4 : Schéma du filtre DBR d'ordre 1 au-dessus de la rainure (a) et mesures du paramètre de transmission obtenues devant un métal sain et devant la rainure pour une distance sonde-métal $d = 50 \mu\text{m}$ (b).

La figure 5 présente les variations Δf_{HF} de la fréquence de résonance f_{HF} quand un déplacement unidimensionnel (suivant la direction x) est réalisé avec le filtre DBR d'ordre 1 pour une distance sonde-métal $d = 50 \mu\text{m}$. Le pas d'incrément de la sonde est de $10 \mu\text{m}$ et l'origine ($x = 0$) correspond au milieu de la rainure. Cette figure montre que la variation Δf_{HF} est la plus importante au milieu de la rainure ($\Delta f_{HF} = 39 \text{ MHz}$) et que la fréquence de résonance caractéristique du métal sain est mesurée à $x = \pm 350 \mu\text{m}$ du centre de la rainure. Ce résultat est en accord avec les résultats de simulations HFSS qui ont montré que pour une distance sonde-métal $d = 50 \mu\text{m}$, la surface métallique illuminée par le filtre d'ordre 1 avait la forme d'un disque d'environ $350 \mu\text{m}$ de diamètre. Comme la valeur correspondante de x pour le dipôle électrique était de $180 \mu\text{m}$, la résolution spatiale du dipôle électrique est meilleure que celle du filtre DBR d'ordre 1. Cependant, la sensibilité est améliorée de façon significative avec le filtre DBR.

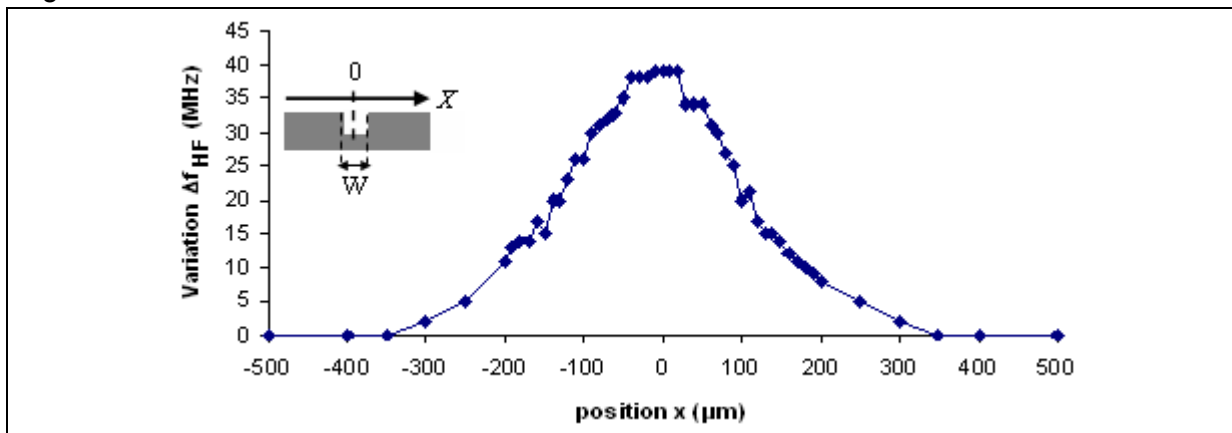


Figure 5 : Déplacement unidimensionnel (direction x) de la sonde au-dessus d'une plaque en acier inoxydable présentant une rainure ($W = 200 \mu\text{m}$) de surface pour une distance sonde-métal $d = 50 \mu\text{m}$; $x = 0$ correspond au milieu de la rainure. Mesure de la variation Δf_{HF} en fonction de x .

La figure 6 montre les variations de la fréquence de résonance Δf_{HF} quand un déplacement unidimensionnel (suivant la direction x) est réalisé avec le filtre DBR d'ordre 1 pour différentes valeurs de la distance sonde-métal d . Le pas d'incrément de la sonde est de $50 \mu\text{m}$ et l'origine ($x = 0$) correspond au milieu de la rainure. Cette figure met en évidence que la résolution et la sensibilité de la sonde diminuent lorsque d augmente. Toutefois, pour $d \leq 100 \mu\text{m}$, on remarque que la sensibilité reste pratiquement constante.

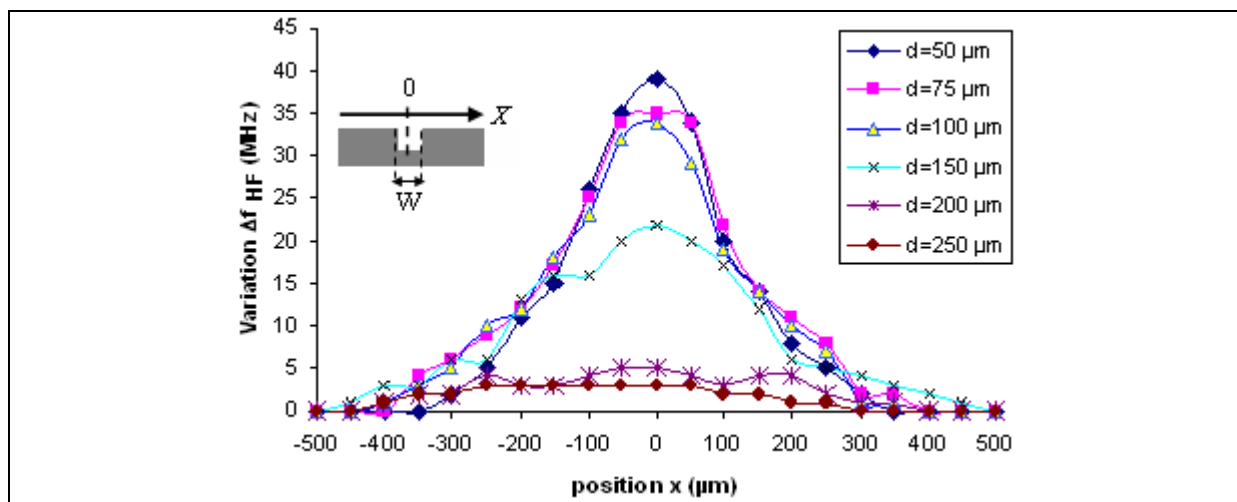


Figure 6 : Déplacement unidimensionnel (direction x) de la sonde au dessus d'une plaque en acier inoxydable présentant une rainure ($W = 200 \mu\text{m}$) de surface pour différentes valeurs de la distance sonde-plaque d ; $x = 0$ correspond au milieu de la rainure. Mesure de la variation Δf_{HF} en fonction de x .

Cette particularité peut être expliquée en analysant la courbe de calibration du filtre d'ordre 1 présentée sur la figure 7. La figure 7 montre la décroissance de f_{HF} en fonction de la distance sonde-métal d quand le capteur est situé au dessus d'une surface métallique saine (i.e. sans rainure de surface). Cette courbe illustre le niveau de couplage capacitif entre le sonde DBR d'ordre 1 et le métal. La référence de l'axe Δf_{HF} ($\Delta f_{HF} = 0$) correspond au cas où le filtre DBR n'est pas perturbé par la surface métallique. Sur cette courbe de calibration, on peut remarquer l'existence d'une zone où la variation Δf_{HF} est la plus forte. Cette partie de la courbe est dénommée ici Zone de Couplage Maximum (ZCM) et s'étend approximativement de $d = 0 \mu\text{m}$ à $d = 100 \mu\text{m}$. D'après la figure 6, elle correspond à la gamme de valeurs de d pour lesquelles la sensibilité est la meilleure. De plus, il faut souligner sur la figure 6 que pour $d = 150 \mu\text{m}$, la sonde DBR d'ordre 1 détecte encore la rainure ce qui est impossible avec le résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique rayonnant.

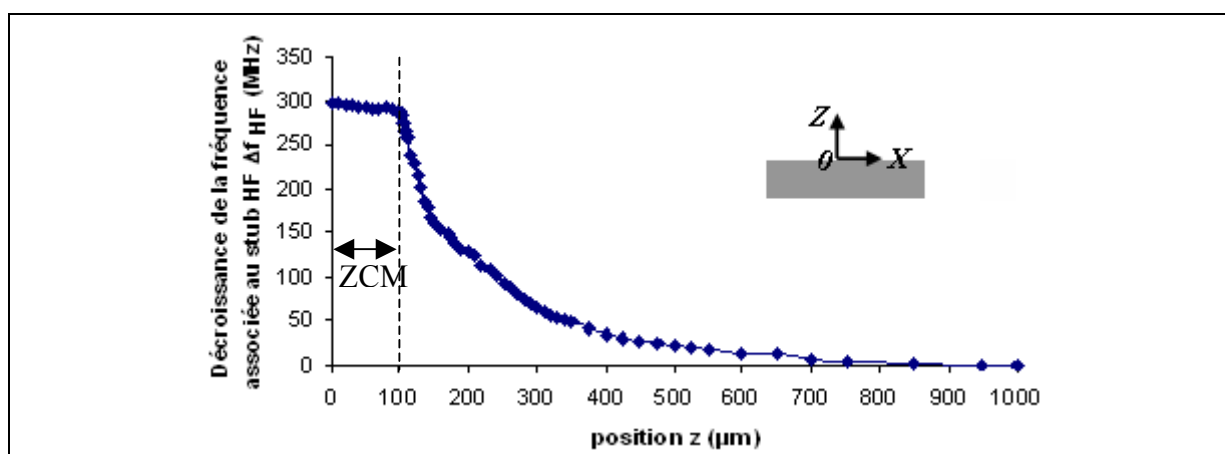


Figure 7 : Décroissance de la fréquence associée au stub HF en fonction de la distance sonde-métal d ; l'abréviation ZCM désigne la Zone de Couplage Maximum.

Tous ces résultats de mesure démontrent que la rainure étudiée est détectée par le filtre DBR d'ordre 1. Ils confirment que la sensibilité du filtre DBR d'ordre 1 est meilleure que celle du résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique. De plus, le filtre DBR d'ordre 1 apparaît plus robuste que le résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique parce qu'il ne requiert pas l'utilisation de fils d'or pour focaliser le faisceau rayonné par le résonateur sur la surface métallique à caractériser. Enfin, des études non présentées dans ce papier ont permis de

montrer qu'une réduction de la largeur du stub HF permet d'améliorer la résolution spatiale du filtre d'ordre 1 mais que ce gain en résolution se fait au détriment de la sensibilité du capteur.

6. SONDE DE TYPE FILTRE DBR PASSE-BANDE D'ORDRE 2

La sonde de type filtre DBR d'ordre 2 (cf. figure 6) est constituée de quatre stubs en circuit ouvert [23], [24]. Les deux stubs BF ont la même longueur, l_1 et la même impédance caractéristique, Z_{S1} , et les deux stubs HF sont également identiques et caractérisés par l_2 et Z_{S2} . Les deux résonateurs sont interconnectés par un inverseur d'admittance quart d'onde de longueur, l_{C12} , et d'impédance caractéristique Z_{C12} . Comme dans le cas du DBR d'ordre 1, le substrat est coupé à l'extrémité des stubs HF de manière à renforcer l'intensité du champ électromagnétique rayonné vers l'échantillon métallique à tester. Cette structure permet de se servir du métal comme élément de couplage entre les deux stubs HF. Ainsi la présence d'un défaut entre les deux stubs HF va provoquer un décalage de la fréquence haute f_{HF} du filtre. Puisqu'il est théoriquement possible de détecter une fissure sur toute la distance séparant les deux stubs HF ($l_{C12} = \lambda_g/4 = 3$ mm), nous devrions augmenter considérablement le pas d'incrémentation du système de pilotage de la sonde par rapport aux mesures effectuées avec le filtre d'ordre 1 (qui nécessite un pas d'incrémentacion inférieur à la largeur de la rainure).

La figure 8 présente le schéma du capteur DBR d'ordre 2 et l'évolution en fréquence du paramètre de transmission S_{21} mesurée en présence de la plaque d'acier contenant la rainure de surface de 200 μm de large et de 3 mm de profondeur pour une distance sonde-métal d de 50 μm . Il faut signaler que, comme dans le cas du filtre DBR d'ordre 1, la largeur des stubs HF a été fixée à $W_{HF} = 100$ μm . On observe une nette diminution de f_{HF} lorsque la rainure est située dans la zone de couplage délimitée par les deux stubs HF. Ces baisses de f_{HF} sont respectivement de 106 MHz en simulation sous HFSS (données non présentées) et de 76 MHz en mesures.

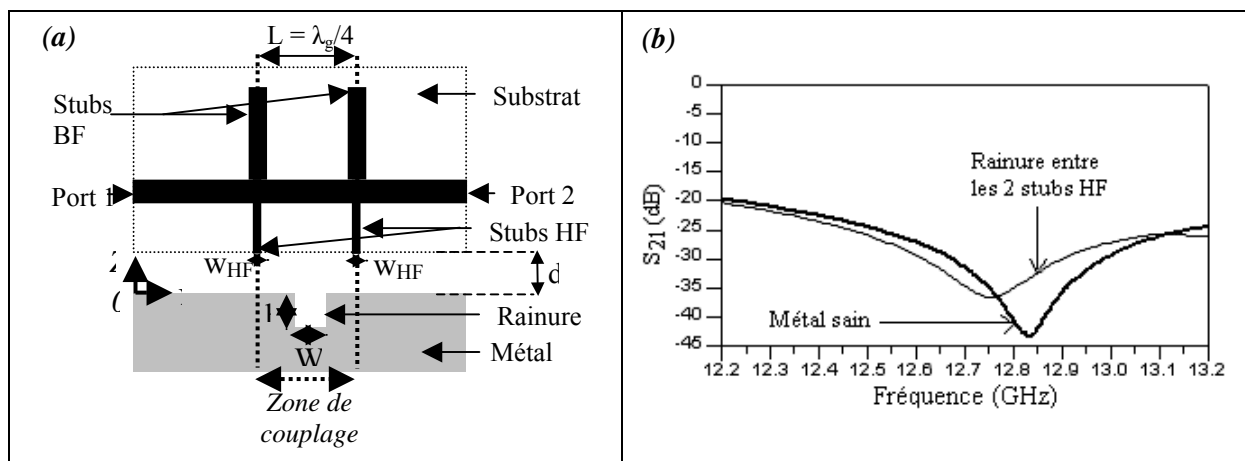


Figure 8 : Schéma du filtre DBR d'ordre 2 au-dessus de la rainure (a) et mesures du paramètre de transmission obtenues devant un métal sain et devant la rainure pour une distance sonde-métal $d = 50$ μm (b).

La diminution de f_{HF} est liée à l'induction d'un courant sur la surface métallique [25]. Ce courant est créé par le champ électromagnétique rayonné à l'extrémité des deux stubs HF. En circulant dans la profondeur de peau du métal, il génère un couplage entre les deux stubs HF. Ce courant se propage suivant un chemin rectiligne dans une plaque métallique saine; en revanche, en présence d'une rainure de surface, il doit suivre la forme de la

rainure, ce qui implique un trajet plus long pour le courant et donc une diminution de la valeur de la fréquence f_{HF} .

Un autre avantage de la structure filtre DBR d'ordre 2 est la possibilité de détecter une rainure même si la surface métallique étudiée présente un léger défaut de planéité. La figure 9 montre que lorsque la surface métallique n'est pas plane, les stubs HF1 et HF2 sont situés respectivement aux distances d_1 et d_2 au dessus du métal avec $d_1 \neq d_2$.

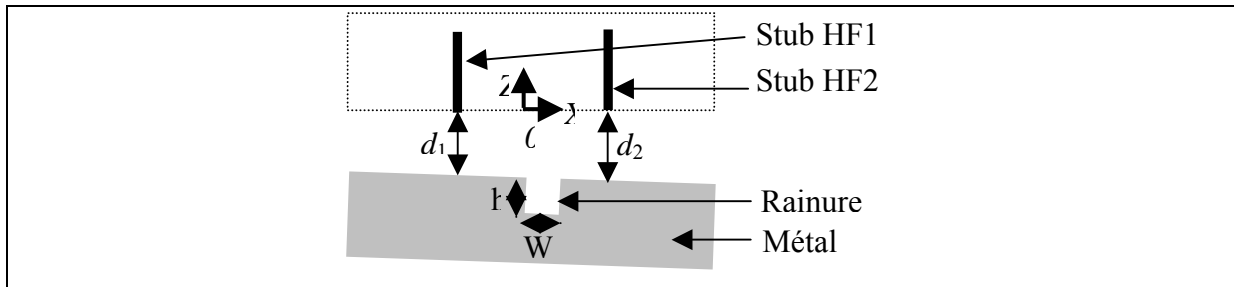


Figure 9 : Schéma des deux stubs HF du filtre DBR d'ordre 2 au dessus d'une surface métallique présentant un léger défaut de planéité; d_1 et d_2 représentent respectivement les distances stub HF1-métal et stub HF2-métal.

En raison de cette différence entre d_1 et d_2 , les couplages capacitifs créés par les stubs HF1 et HF2 sont différents et par conséquent la structure est déséquilibrée. Ce déséquilibre du filtre d'ordre 2 en interaction avec la surface métallique se manifeste par l'apparition de deux zéros de transmission en haute fréquence. La figure 10 présente les résultats obtenus avec le filtre DBR d'ordre 2 ayant des stubs HF de largeur $W_{HF} = 100 \mu\text{m}$. Le décalage Δf entre les fréquences de ces deux zéros de transmission, $\Delta f = f_{HF2} - f_{HF1}$, est révélateur du défaut de planéité de la plaque métallique.

La figure 11 illustre les variations de Δf mesurées lorsqu'un déplacement unidimensionnel est réalisé suivant la direction x (avec un pas d'incrément de la sonde de $500 \mu\text{m}$) et pour une distance entre le milieu de la zone de couplage et la plaque métallique variant entre $100 \mu\text{m}$ et environ $150 \mu\text{m}$. Il faut souligner que le pas d'incrément était réduit à $50 \mu\text{m}$ lorsque l'un de des deux stubs HF était situé en face de la rainure. Cette figure montre que la présence de la rainure au dessus de l'un de des deux stubs HF introduit une chute brutale sur la courbe des variations de Δf . La différence entre les amplitudes des décroissances de Δf observées lorsque la rainure est située sous le stub 1 et lorsque la rainure est située sous le stub 2 vient du défaut de planéité présenté par la plaque métallique. De plus, lorsque la rainure est localisée entre les deux stubs HF (i.e. dans la zone de couplage) Δf reste presque constante.

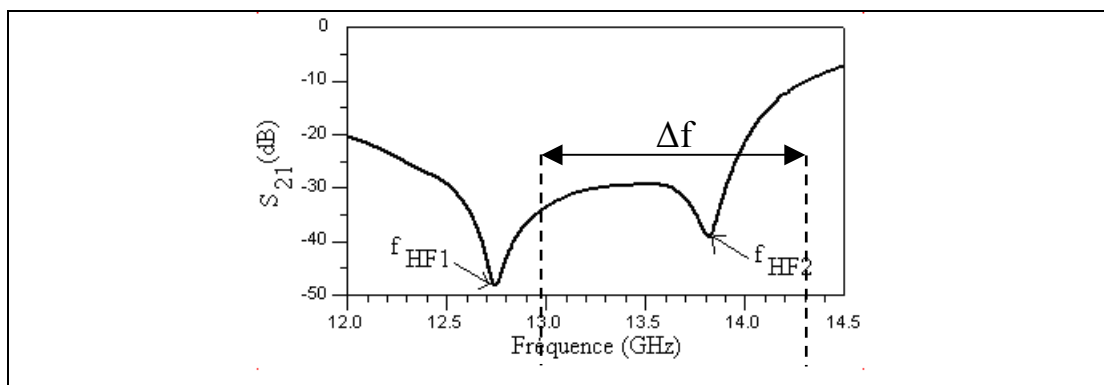


Figure 10 : Mesure du paramètre de transmission du filtre DBR d'ordre 2 obtenue devant une plaque métallique présentant un léger de planéité pour une distance entre le centre de la zone de couplage et le métal d'environ $50 \mu\text{m}$.

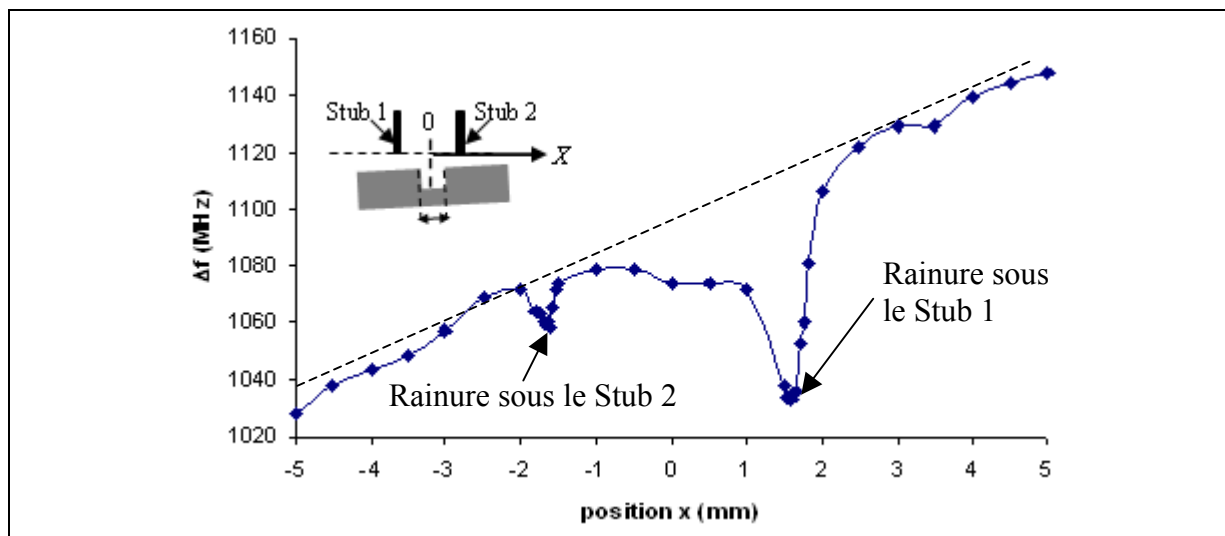


Figure 11 : Déplacement unidimensionnel (direction x) de la sonde DBR d'ordre 2 au dessus d'une plaque en acier inoxydable contenant une rainure ($W = 200 \mu\text{m}$) de surface et présentant un léger défaut de planéité. Mesure de la variation Δf en fonction de x .

Ainsi, avec une sonde de type filtre DBR d'ordre 2, la mesure d'une différence de pente dans la courbe $\Delta f(x)$ permet une détection de la rainure malgré un défaut de planéité (de quelques dizaines de micromètres) de l'échantillon à ausculter.

En permettant : i) la détection d'une rainure située à n'importe quelle position entre les deux stubs HF (i.e. dans la zone de couplage) et ii) un accroissement significatif du pas d'incrément de la sonde par rapport à celui requis avec le filtre DBR d'ordre 1 ($500 \mu\text{m}$ contre $50 \mu\text{m}$), la sonde de type filtre DBR d'ordre 2 a prouvé sa capacité à détecter une rainure de surface même si le métal à caractériser présente une planéité imparfaite.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons démontré théoriquement et expérimentalement la faisabilité de la détection des fissures de surface à l'aide de sondes résonantes en champ proche. L'utilisation de sondes originales de type filtre DBR passe-bande a apporté une amélioration substantielle de la sensibilité par rapport au résonateur $\lambda_g/4$ terminé par un dipôle électrique rayonnant. De plus, le capteur filtre DBR d'ordre 2 permet de faire une détection des défauts de surface avec un pas d'incrément de sonde plus important que le filtre DBR d'ordre 1 et permet par conséquent de diminuer le temps nécessaire pour caractériser une surface métallique. En outre le filtre DBR d'ordre 2 rend possible la détection d'une rainure même lorsque la surface métallique à caractériser présente un léger défaut de planéité.

Après avoir optimisé la sonde en termes de sensibilité et de résolution, nous chercherons à résoudre le problème inverse, c'est-à-dire à relier les variations des facteurs f_r et Q aux dimensions géométriques (largeur et profondeur) de la fissure.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Raymond Jézéquel, Bernard Della et Guy Chuiton, techniciens au LEST, pour la réalisation des différents circuits présentés dans ce papier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, "Ultrasonic Testing of Materials (4th ed.)," *Springer-Verlag*, 1990.
- [2] P.O. Moore, *Nondestructive Testing Handbook (3rd ed)*, vol. 5, Electromagnetic Testing, S.S. Udpa (Technical Ed.), American Society for Nondestructive Testing (ASNT), Columbus, OH, USA, 2004.
- [3] S. Dubost, L. Chatellier, F. Peisey, Y. Goussard, and R. Guichard, "Characterization of Small Surface-Breaking Defects with Eddy Current Sensor Measurements," *9th European Conference on Non-Destructive Testing*, Berlin, Sept. 2006.
- [4] N. Yusa, S. Perrin, K. Mizuno, and K. Miya, "Numerical modeling of general cracks from the viewpoint of eddy current simulations," *NDT&E International 2007*, 40, pp. 577-583, May 2007.
- [5] O. Zahran, and W. Al-Nuaimy, "Image Processing for Accurate Sizing of Weld Defects Using Ultrasonic Time-Of-Flight Diffraction," *9th European Conference on Non-Destructive Testing*, Berlin, Sept. 2006.
- [6] H. Shirai, H. Sehiguchi, "A Simple Crack Depth Estimation Method From Backscattering Response," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 4, pp. 1249-1253, August 2004.
- [7] C-Y. Yeh, R. Zoughi, "A Novel Microwave Method for Detection of Long Surface Cracks in Metals," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, no. 5, pp. 719-725, Oct. 1994.
- [8] C. Huber, H. Abiri, S.I. Ganchev and R. Zoughi, "Analysis of the "Crack Characteristics Signal" Using a Generalized Scattering Matrix Representation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 4, pp. 477-484, April 1997.
- [9] F. Mazlumi, S.H.H. Sadeghi, and R. Moini, "Interaction of an Open-Ended Rectangular Waveguide Probe With an Arbitrary-Shape Surface Crack in a Lossy Conductor," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.54, no. 10, pp. 3706-3711, October 2006.
- [10] Y. Wang, and R. Zoughi, "Interaction of Surface Cracks in Metals with Open-Ended Coaxial Probes at Microwave Frequencies," *Materials Evaluation*, vol. 58, no. 10, pp. 1228-1234, Oct. 2000.
- [11] Y. Ju, M. Saka, Y. Ju, D. Luo and H. Abe, "NDE of closed fatigue crack on metal surface," *10th International Conference on Non-Destructive Testing*, Brisbane, Sept. 2001.
- [12] M. Golosovsky, and D. Davidov, "Novel millimetre-wave near-field microscope," *Applied Physics Letters*, vol. 68, no. 11, pp. 1579-1581, March 1996.
- [13] M.T. Ghasr, S. Kharkovshy, R. Zoughi and R. Austin, "Comparison of Near-field millimeter-wave probes for detecting corrosion precursor pitting under paint," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 4, pp. 1497-1504, August 2005.
- [14] M.T. Ghasr, B. Carroll, S. Kharkovshy, R. Austin and R. Zoughi, Austin, "Millimeter-Wave Differential Probe for Nondestructive Detection of Corrosion Precursor Pitting," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 5, pp. 1620-1627, October 2006.
- [15] M. Tabib-Azar, D.-P. Su, A. Pohar, S.R. LeClair, G. Ponchak, "0.4 μm spatial resolution with 1 GHz ($\lambda = 30$ cm) evanescent microwave probe," *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, no. 3, pp. 1725-1729, March 1999.
- [16] T. Wei, X.-D. Xiang, W.G. Wallace-Freedman, and P.G. Schultz, "Scanning tip microwave near-field microscope," *Applied Physics Letters*, vol. 68, no. 24, pp. 3506-3508, June 1996.
- [17] A. Imtiaz, and S.H. Anlage, "Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microscope," *Journal of Applied Physics*, vol. 100, 044304 (8 pages), 2006.
- [18] V. V. Talanov, A. Scherz, and A.R. Schwartz, "A Microfabricated Near-Field Scanned Microwave Probe for Noncontact Dielectric Constant Metrology of Low-k Films," *2006 International Microwave Symposium*, pp. 1618-1621, June 2006.
- [19] M. Tabib-Azar, N.S. Shoemaker, and S. Harris, "Nondestructive characterization of materials by evanescent microwaves," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 4, pp. 583-590, May 1993.

- [20] M. Tabib-Azar, D. Akinwande, G. Ponchak, and S;R. Leclair, "Novel physical sensors using evanescent microwave probes," *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, no. 8, pp. 3381-3386, August 1999.
- [21] M. Tabib-Azar, P.S. Pathak, G. Ponchak, S. LeClair, "Nondestructive superresolution imaging of defects and nonuniformities in metals, semiconductors, dielectrics, composites, and plants using evanescent microwaves," *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, no. 6, pp. 2783-2792, June 1999.
- [22] R. Wang, F. Li, and M. Tabib-Azar, "Calibration methods of a 2 GHz evanescent microwave magnetic probe for noncontact and nondestructive metal characterization for corrosion, defects, conductivity, and thickness nonuniformities," *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, 054701, 2005.
- [23] C. Quendo, E. Rius, C. Person, "Narrow bandpass filters using dual-behavior resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 3, pp.734-743, March 2003.
- [24] C. Quendo, E. Rius, C. Person, "Narrow bandpass filters using dual-behavior resonators based on stepped-impedance stubs and different-length stubs," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 3, pp.1034-1044, March 2004.
- [25] H. Saguy, and D. Rittel, "Flaw detection in metals by the ACPD technique: Theory and experiments", *NDT&E International*, May 2007.