

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
CHAPITRE 1 – LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT	15
1.1 INTRODUCTION AU CND	17
1.2 PRÉSENTATION DU CND PAR COURANTS DE FOUCAULT	18
1.2.1 PRINCIPE ET APPLICATIONS DU CND PAR COURANTS DE FOUCAULT	18
1.2.2 DISTRIBUTION DES COURANTS DE FOUCAULT	21
1.2.3 CLASSIFICATION FONCTIONNELLE DES CAPTEURS COURANTS DE FOUCAULT	24
1.2.4 MODES DE MESURE DES COURANTS DE FOUCAULT	25
1.2.5 MODES D'EXCITATION DES COURANTS DE FOUCAULT	26
1.2.6 REPRÉSENTATION DES SIGNAUX COURANTS DE FOUCAULT	27
1.2.6.1 Plan d'impédance	27
1.2.6.2 Plan de tension	29
1.2.6.3 Acquisition 1D et 2D	30
1.2.7 EXEMPLES DE CAPTEURS COURANTS DE FOUCAULT	30
1.2.8 TECHNOLOGIES DES BOBINES	32
1.3 PROPRIÉTÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DES MATERIAUX INSPECTÉS PAR CF	33
1.3.1 CONDUCTIVITÉ ELECTRIQUE	33
1.3.2 COMPORTEMENT MAGNETIQUE DES MATERIAUX FERROMAGNETIQUES	34
1.3.2.1 Courbe de première aimantation et comportement non linéaire	34
1.3.2.2 Différents types de perméabilité magnétique	36
1.4 CONCLUSION	38

CHAPITRE 2 – OPTIMISATION DE CAPTEURS CF POUR L’ÉVALUATION DES PARAMÈTRES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DES MATÉRIAUX	39
2.1 ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE PAR MÉTHODES CONVENTIONNELLES	41
2.1.1 ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ PAR LA MÉTHODE A QUATRE POINTES	41
2.1.2 ÉVALUATION DE LA PERMÉABILITÉ PAR LA MÉTHODE DU PERMEAMETRE	42
2.1.2.1 <i>Principe de l'hystérisigraphe</i>	42
2.1.2.2 <i>Évaluation expérimentale de la perméabilité</i>	44
2.1.3 CARACTERISATION DE MATERIAUX MAGNETIQUES DE REFERENCE	46
2.2 CONCEPTION D’UN CAPTEUR CF POUR L’ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ DES MATÉRIAUX NON MAGNÉTIQUES	47
2.2.1 ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ ELECTRIQUE DE MATERIAUX NON MAGNETIQUES PAR CAPTEUR COURANTS DE FOUCAULT DOUBLE FONCTION	47
2.2.2 OPTIMISATION D’UN MOTIF SENSIBLE A LA CONDUCTIVITÉ	49
2.2.2.1 <i>Étude de l’effet d’entrefer</i>	49
2.2.2.2 <i>Détermination de la configuration des bobines</i>	51
2.2.2.3 <i>Réalisation du motif sur film Kapton</i>	55
2.2.2.4 <i>Simulation du comportement en fréquence du capteur</i>	55
2.2.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX POUR L’ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITÉ	56
2.2.3.1 <i>Évaluation de la conductivité sur cales étalons</i>	57
2.2.3.2 <i>Test du capteur optimisé en présence de défauts</i>	59
2.2.4 MISE EN ŒUVRE DU CAPTEUR SUR MATERIAUX MAGNETIQUES	62
2.2.4.1 <i>Résultats expérimentaux sur différents matériaux ferromagnétiques</i>	62
2.2.4.2 <i>Application à la détection d’une zone brûlée</i>	65
2.3 ÉVOLUTION DU CAPTEUR CF POUR ÉVALUER LA CONDUCTIVITÉ ET LA PERMÉABILITÉ D’UN MATÉRIAU FERROMAGNÉTIQUE	70
2.3.1 INTRODUCTION	70
2.3.2 INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LA MESURE COURANTS DE FOUCAULT	71
2.3.2.1 <i>Cas des matériaux non magnétiques</i>	71
2.3.2.2 <i>Cas des matériaux magnétiques</i>	72
2.3.3 PROPOSITION ET EVALUATION EXPERIMENTALE D’UN RECEPTEUR BOBINE	73
2.3.3.1 <i>Simulation de récepteurs inductifs</i>	73
2.3.3.2 <i>Mesures avec un récepteur bobiné</i>	76
2.3.4 PROPOSITION ET EVALUATION EXPERIMENTALE D’UN CAPTEUR MAGNETIQUE	80
2.4 CONCLUSION	83

CHAPITRE 3 – DÉVELOPPEMENT D'UN IMAGEUR CF STATIQUE	85
3.1 PROBLÉMATIQUE DE L'IMAGERIE COURANTS DE FOUCAULT	87
3.2 TEST D'UN PREMIER PROTOTYPE.....	94
3.2.1 DESCRIPTION DE L'IMAGEUR	94
3.2.2 MISE EN ŒUVRE DU PROTOTYPE.....	97
3.3 OPTIMISATION DU MOTIF ÉLÉMENTAIRE	100
3.3.1 CHOIX DE LA COMPOSANTE DE CHAMP MAGNETIQUE A MESURER	100
3.3.2 ÉTUDE DE L'EMETTEUR.....	102
3.3.3 ÉTUDE DU RECEPTEUR.....	103
3.3.4 SPECIFICATIONS DU CAPTEUR FLEXIBLE	108
3.3.5 RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION.....	110
3.4 RÉALISATION ET ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DE L'IMAGEUR STATIQUE	112
3.4.1 REALISATION DU CAPTEUR.....	112
3.4.2 ÉTUDE D'UN MONOELEMENT POUR CARACTERISER LA ZONE DE FAIBLE SENSIBILITÉ DU CAPTEUR	114
3.4.3 ÉTUDE DE L'IMAGEUR COMPLET	115
3.4.3.1 Influence des dimensions d'un défaut.....	115
3.4.3.2 Influence de l'orientation d'un défaut.....	117
3.4.3.3 Détection d'un défaut de faible longueur	119
3.4.4 APPLICATION A L'INSPECTION DE DEFAUTS AUX ABORDS D'UN TROU DE RIVET.....	119
3.5 CONCLUSION	122
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	123
ANNEXE A – COMPLÉMENTS SUR LA MÉTHODE DU PERMÉAMÈTRE	127
ANNEXE B – MÉTHODE DE CALCUL DU RAPPORT SIGNAL À BRUIT	131
TABLE DES FIGURES	133
TABLE DES TABLEAUX.....	139
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	141
COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES	151

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ce travail de thèse s'est déroulé au sein du Laboratoire d'Instrumentation et Capteurs (LIC) dans le Département d'Imagerie, Simulation et Contrôle du CEA - LIST (Laboratoire d'Intégration de Systèmes et des Technologies) sur le plateau de Saclay. Il a été également réalisé avec le laboratoire Génie Électrique et Électronique de Paris (GeePs), une unité mixte de recherche (UMR 8507) du CNRS, de CentraleSupélec et des Universités Paris-Sud et Pierre et Marie Curie.

Les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur la conception de capteurs à courants de Foucault (CF) pour le contrôle non destructif (CND). Le CND par CF consiste en l'induction de courants de Foucault dans un milieu conducteur à inspecter à l'aide d'un champ magnétique généré par une bobine. Cette méthode est employée dans différentes applications telles que la caractérisation des métaux, la mesure d'épaisseur ou encore la détection de défauts. Les secteurs visés concernent principalement l'aéronautique, l'énergie nucléaire, l'industrie pétrochimique et la métallurgie.

Technique de contrôle déjà bien établie, le CND par CF fait toujours l'objet d'études et de développements visant, par exemple, à l'augmentation de la rapidité d'un contrôle ou bien à l'amélioration de la sensibilité des capteurs CF. Ces développements s'appuient sur les outils informatiques et plus particulièrement sur les outils de simulation des phénomènes électromagnétiques qui permettent d'améliorer la compréhension des signaux mesurés ou encore d'optimiser la conception de capteurs CF. Par exemple, la plateforme de simulation CIVA développée par le Département d'Imagerie, Simulation et Contrôle du CEA – LIST, est composée de modules de simulation, d'imagerie et d'analyse permettant de concevoir et d'optimiser des méthodes d'inspection notamment en CF, ainsi que de prédire leurs performances dans des configurations réalistes de contrôle.

Pour simuler une configuration de capteur CF, lors de l'utilisation de CIVA ou de toute autre plateforme de simulation, il est nécessaire de connaître les paramètres électromagnétiques (conductivité électrique et perméabilité magnétique) du matériau inspecté afin d'obtenir une bonne adéquation entre les données simulées et les données expérimentales. L'évaluation des paramètres électromagnétiques d'un matériau, et plus particulièrement dans le cas des matériaux magnétiques du fait de leur comportement non linéaire, est souvent problématique. D'autre part, une demande des industriels visant à augmenter la cadence des contrôles conduit à un fort intérêt pour la réalisation et la mise en œuvre de capteurs multiéléments. Dans ce contexte, l'imagerie CF statique est une technique émergeante destinée à inspecter la surface d'une pièce avec un capteur multiéléments, dont les éléments sont disposés en matrice, sans avoir à déplacer le capteur. Cette méthode d'imagerie CF semble être une piste prometteuse du fait de sa potentielle rapidité et simplicité de mise en œuvre.

Introduction générale

Le travail de thèse développé dans ce document porte donc sur ces deux aspects : l'estimation des paramètres électromagnétiques (conductivité électrique et perméabilité magnétique) et l'imagerie CF statique. Le plan du manuscrit, divisé en trois chapitres, est le suivant. Le chapitre 1 présente la technique du CND par CF, son historique ainsi que son principe de fonctionnement. Les modes d'excitation et de mesure ainsi que la représentation des signaux CF sont exposés. La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à l'étude des matériaux inspectés par CF et plus particulièrement à l'étude des propriétés électromagnétiques des matériaux ferromagnétiques caractérisés, dans ce travail, par les deux paramètres que sont la conductivité électrique et la perméabilité magnétique.

Le chapitre 2 porte sur l'évaluation des propriétés électromagnétiques des matériaux typiquement rencontrés en CND par CF. Les paramètres évalués correspondent à la conductivité électrique et à la perméabilité magnétique. Des méthodes conventionnelles (la méthode à quatre pointes et le perméamètre) sont dans un premier temps investiguées et mises en œuvre dans le but de créer un panel d'échantillons de référence. Ensuite, un capteur CF optimisé dans le but d'évaluer la conductivité des matériaux purement conducteurs est présenté. Le capteur est par la suite complété afin d'évaluer la perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques. Des évaluations expérimentales du capteur sont conduites. Ces évaluations sont ensuite étendues aux matériaux présentant des défauts surfaciques de type discontinuité. Une application du capteur CF initial est par ailleurs présentée : il s'agit de la détection d'une zone brûlée lors de l'usinage d'une pièce métallique magnétique.

La conception et l'évaluation d'un imageur CF statique fait l'objet du chapitre 3. Ce chapitre est introduit par un historique de l'imagerie CF et une présentation des problématiques rencontrées lors de l'imagerie CF classique ; c'est-à-dire lorsque le capteur balaye la surface à inspecter d'une pièce. Un premier prototype d'imageur CF statique, déjà disponible au laboratoire, est évalué. À partir des résultats expérimentaux obtenus avec ce capteur, une étude de conception par simulation d'un imageur CF, composé de 576 éléments récepteurs, est menée. Son principe de fonctionnement et sa réalisation sont présentés. Des études expérimentales de ce nouvel imageur sont ensuite exposées en vue d'étudier les performances de celui-ci. Enfin, l'imageur CF est appliqué à l'inspection de défauts surfaciques aux abords d'un trou de rivet.

CHAPITRE 1 – LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULTS

1.1	INTRODUCTION AU CND	17
1.2	PRÉSENTATION DU CND PAR COURANTS DE FOUCAULT	18
1.2.1	PRINCIPE ET APPLICATIONS DU CND PAR COURANTS DE FOUCAULT	18
1.2.2	DISTRIBUTION DES COURANTS DE FOUCAULT	21
1.2.3	CLASSIFICATION FONCTIONNELLE DES CAPTEURS COURANTS DE FOUCAULT	24
1.2.4	MODES DE MESURE DES COURANTS DE FOUCAULT	25
1.2.5	MODES D'EXCITATION DES COURANTS DE FOUCAULT	26
1.2.6	REPRESENTATION DES SIGNAUX COURANTS DE FOUCAULT	27
1.2.6.1	Plan d'impédance	27
1.2.6.2	Plan de tension	29
1.2.6.3	Acquisition 1D et 2D	30
1.2.7	EXEMPLES DE CAPTEURS COURANTS DE FOUCAULT	30
1.2.8	TECHNOLOGIES DES BOBINES	32
1.3	PROPRIÉTÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DES MATERIAUX INSPECTÉS PAR CF	33
1.3.1	CONDUCTIVITÉ ELECTRIQUE	33
1.3.2	COMPORTEMENT MAGNETIQUE DES MATERIAUX FERROMAGNETIQUES	34
1.3.2.1	Courbe de première aimantation et comportement non linéaire	34
1.3.2.2	Différents types de perméabilité magnétique	36
1.4	CONCLUSION	38

Ce chapitre bibliographique est découpé en deux principales parties. Le principe du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF) ainsi que ses différents modes de mesure et d'excitation sont décrits dans la première partie de ce chapitre. La seconde partie porte sur l'étude des propriétés des matériaux inspectés par CF et, plus particulièrement, sur la conductivité électrique puis des notions du ferromagnétisme.

1.1 INTRODUCTION AU CND

Le CND est défini comme un ensemble de méthodes permettant d'inspecter une partie d'un matériau ou d'un système sans impacter son bon fonctionnement [[NDTH_2004](#)]. Cette méthode regroupe différentes techniques telles que les rayons X, les ultrasons ou encore les courants de Foucault.

Le CND est couramment employé par les industriels depuis le début du XXème siècle. Il est devenu indispensable lors de la fabrication ou l'assemblage de pièces ou encore dans le cadre de la maintenance industrielle. Autrement dit, il permet un contrôle de la matière brute jusqu'au produit fini. Le CND a pour but de détecter, entre autres, la présence de défauts, de mesurer l'épaisseur d'un matériau ou d'un revêtement ou encore de déterminer des paramètres caractéristiques d'un échantillon comme, par exemple, sa conductivité électrique.

Il n'est pas possible de donner une date précise de l'apparition du CND mais la liste ci-dessous [[Hellier_2001](#)], non exhaustive, donne une idée de l'apparition des étapes clés dans le développement du CND :

- 1800 : Première observation thermographique par Sir William Herschel ;
- 1831 : Première observation de l'induction électromagnétique par Michael Faraday ;
- 1840 : Première image infrarouge produite par John Herschel ;
- 1868 : Première référence à l'inspection de défauts. Inspection de fissures longitudinales dans des tubes à l'aide d'une aiguille aimantée par Stephen Martin Saxby ;
- 1879 : Première exploitation des CF pour contrôler les alliages de métaux par David Hughes ;
- 1895 : Découverte des rayons X par Wilhelm Conrad Roentgen ;
- 1898 : Découverte du radium par Marie et Pierre Curie ;
- 1922 : Première radiographie industrielle développée par le Dr. Horace Lester ;
- 1927 : Développement d'un système de contrôle CF des rails de chemin de fer par le Dr. Elmer Sperry et Harcourt Drake ;
- 1929 : Développement d'un système de contrôle par particules magnétiques par Alfred deForest et Foster Doane ;
- 1929 : Première expérimentation des transducteurs à quartz par Sergey Sokolov ;
- 1930 : Première utilisation pratique des rayons gamma via le radium par le Dr. Robert Mehl ;
- 1935-1940 : Développement des premiers systèmes de mesure par CF par Horace Knerr, Cecil Farrow, Theo Zuschlag et le Dr. Friedreich Förster ;
- 1940-1944 : Première méthode ultrasonique développée par le Dr. Floyd Firestone ;
- 1946 : Commercialisation du premier instrument portable à ultrasons par la société Branson.

Des années 1950 à nos jours, le CND s'est développé de façon importante. Son innovation s'est faite grâce au développement de l'électronique, des instruments mais surtout des outils informatiques. Ces outils informatiques ont modifié la vision du CND en introduisant la modélisation des phénomènes physiques sur lesquels reposent les différentes méthodes d'inspection. Cette modélisation permet notamment la réalisation de capteurs optimisés afin de répondre à des problématiques industrielles bien spécifiques. Le traitement des données et des images effectuées après l'acquisition de mesures a un rôle très important dans le développement du CND. En effet, le traitement des données est un plus lorsque l'on souhaite interpréter des résultats expérimentaux.

1.2 PRÉSENTATION DU CND PAR COURANTS DE FOUCault

1.2.1 Principe et applications du CND par courants de Foucault

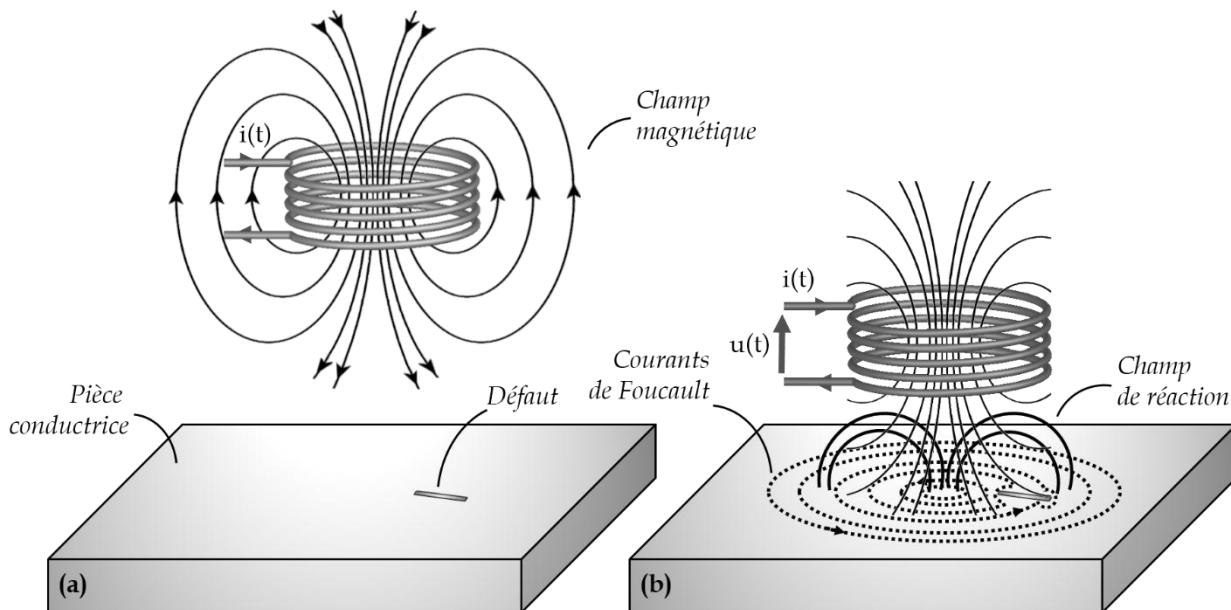
Le phénomène des courants induits dits courants de Foucault est découvert par le physicien français Léon Foucault en 1855. La figure 1.1 représente l'expérience de Foucault basée sur un dispositif constitué d'un disque de cuivre placé entre les deux pôles d'un électro-aimant [Bertrand_1878]. Le disque en cuivre, sous l'action de la manivelle, peut atteindre une vitesse de 150 à 200 tours par seconde. Quand le disque est lancé à toute vitesse, l'alimentation de l'électro-aimant arrête la rotation du disque en quelques secondes. Afin de restituer au disque le mouvement qu'il a perdu, une certaine force doit être appliquée à la manivelle. La résistance éprouvée lors de l'action de la manivelle s'accumule sous forme de chaleur à l'intérieur du corps tournant. Cette expérience permet de démontrer la présence de courants induits au sein d'un matériau conducteur en mouvement lorsqu'un champ magnétique est appliqué. Effectivement, l'induction de courants dans le disque génère un champ qui, s'opposant au champ magnétique de l'électro-aimant, permet de freiner le mouvement du disque.



Figure 1.1 : Machine d'induction de Foucault (collection de l'École Polytechnique)

Le phénomène de courants induits dans le conducteur apparaît lorsqu'un champ magnétique est variable dans le temps. Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable à proximité d'un matériau conducteur donne lieu, dans ce conducteur, au phénomène des CF.

La figure 1.2(a) représente la génération du champ magnétique variable lorsqu'une bobine est parcourue par un courant alternatif. Compte tenu de la distance, ou entrefer, qui sépare la bobine de l'échantillon, on remarque une quasi absence de CF dans la pièce conductrice. En d'autres termes, la bobine est placée dans l'air. Dans le cas de la figure 1.2(b), une réduction de l'entrefer donne lieu à l'apparition de courants induits dans la pièce conductrice. Les CF sont formés de boucles de courant, engendrant un champ magnétique dit champ de réaction. Le champ de réaction modifie la force électromotrice de la bobine et permet de fournir une information sur l'état du matériau contrôlé. En l'absence de défaut, le champ de réaction dépend, entre autres, de la conductivité électrique (σ) et de la perméabilité magnétique (μ) de la pièce. Dans le cas d'une inhomogénéité locale du matériau, par exemple un défaut de type fissure, les lignes de courants induits sont modifiées, entraînant ainsi une modification du champ de réaction.



Le principe du CND par CF repose donc sur la mesure de l'effet de la variation du champ de réaction. Pour cela, différentes méthodes et différents capteurs peuvent être employés. Une analyse des diverses configurations de capteurs CF est présentée par la suite.

L'histoire de l'apparition du CND par CF est intéressante : on constate que cette technique est employée dans de nombreuses applications. Plusieurs de ces applications, classées par ordre chronologique d'apparition, sont présentées ci-dessous.

- Mesure de la variation de conductivité électrique ou détection d'une variation de la perméabilité magnétique :

En 1879, David Edward Hughes met en évidence l'effet de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique sur le champ de réaction [[Hughes_1879](#)]. Hughes met au point un dispositif, la balance d'induction, qui est employé par la Royal Mint dans le but de vérifier les alliages de métaux utilisés pour la frappe des monnaies britanniques.

- Mesure de l'épaisseur d'un matériau :

La mesure d'épaisseur d'un matériau conducteur par les CF apparaît comme application en 1926 suite aux recherches d'Hermann Ernest Kranz [[Kranz_1931](#)]. Les travaux de Kranz ont comme objectif la mesure d'épaisseur de matériaux conducteurs inaccessible aux instruments mécaniques.

- Détection de défauts (par exemple fissures ou trous) :

L'utilisation des CF pour la détection de défauts apparaît à la suite d'un accident grave aux États-Unis : le déraillement d'un train. Pour éviter une nouvelle catastrophe, la compagnie Sperry Rail Service, toujours en activité, est fondée en 1928. Le système de contrôle, monté dans une locomotive, permet la mise en évidence de discontinuités dans les rails [[Drake_1932](#)].

- Mesure de l'épaisseur d'un revêtement :

La première référence de mesure d'épaisseur de revêtement est datée de 1945 [[Dinger_1952](#)]. Dinger développa une méthode et un appareil afin de mesurer l'épaisseur d'un revêtement de peinture sur un matériau conducteur non magnétique. Le film de peinture protège une structure métallique de la corrosion.

L'instrumentation des CF se développe considérablement lors de la seconde guerre mondiale. C'est en 1948 que fut fondé l'institut Foerster par le Dr. Friedrich Förster, pionnier du CND par CF. La figure 1.3 représente un des premiers appareils industriels [[Hellier_2001](#)]. Le principe de mesure repose sur la comparaison entre un échantillon à tester et un échantillon de référence. L'institut Foerster développa la représentation des mesures sous la forme d'un plan d'impédance (cf. sous-section 1.2.6.1) dans les années 1950.



Figure 1.3 : Unité de mesure développée par l’Institut Foerster [[Hellier_2001](#)]

1.2.2 Distribution des courants de Foucault

Les CF, non homogènes dans la profondeur du matériau, sont régis par les équations de Maxwell. L’intensité des CF dans un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ [S/m] et une perméabilité magnétique μ [H/m], diminue avec la profondeur notée z [m]. Dans le cas d’une pièce conductrice infiniment épaisse à surface plane, excitée uniformément à une fréquence f [Hz] par une onde plane, le module de la densité de courant J [A/m²] est exprimé par [[Le Bihan_2003](#)]:

$$J(z, f) = J_s e^{-z\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (1.1)$$

Où J_s est le module de la densité des CF [A/m²] à la surface du matériau ($z = 0$).

L’équation 1.1 montre que l’amplitude de J diminue de manière exponentielle en fonction de la profondeur du matériau. Cette décroissance de l’amplitude des CF en fonction de la profondeur du matériau est représentée par la figure 1.4. L’épaisseur de peau δ [m], aussi dite profondeur de pénétration effective, caractérise la distance à laquelle la densité des CF a perdu 63 % de son amplitude [[Perdrix_1990](#)]. Cette profondeur de pénétration est décrite par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (1.2)$$

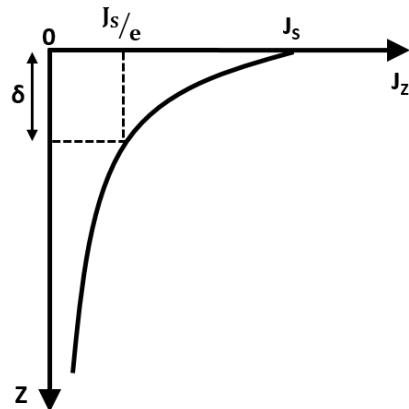
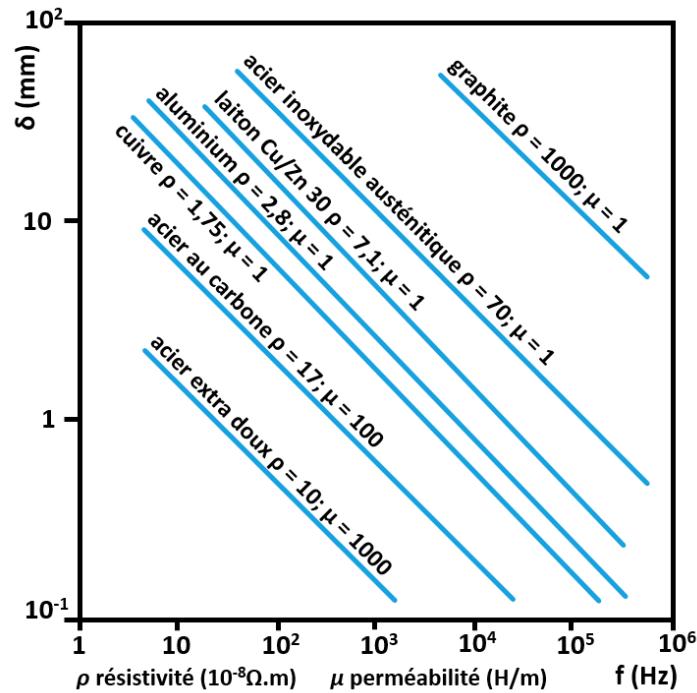


Figure 1.4 : Distribution des CF sous une surface plane d'épaisseur infinie

L'équation 1.1 est valable seulement dans le cas d'un matériau d'épaisseur infinie. Pour une épaisseur de plaque de quelques δ , la décroissance importante des CF en fonction de z admet de considérer le matériau comme infini. La grandeur δ permet d'estimer une fréquence d'excitation adéquate selon les paramètres électromagnétiques du matériau. Par exemple, dans le cas d'une inspection de défauts surfaciques, on cherchera à obtenir une épaisseur δ la plus faible possible en travaillant à une fréquence élevée (typiquement environ 1 à 10 MHz). En pratique, la détection des défauts est possible au plus jusqu'à quelques δ . L'abaque en figure 1.5 représente l'épaisseur de peau δ en fonction de la fréquence d'excitation des CF [Dumont_1996]. Le ferromagnétisme de certains aciers diminue fortement δ car la perméabilité magnétique de ces aciers est relativement élevée. Pour obtenir des profondeurs de pénétration de l'ordre du millimètre, il convient d'utiliser, selon le matériau, des fréquences de 10 Hz à 1 MHz dans le cas des métaux.


 Figure 1.5 : Exemples de profondeur δ selon la fréquence d'excitation des CF [Dumont_1996]

La capacité de détection de défauts (une fissure par exemple) dans un matériau en CND par CF diffère selon le degré de perturbation de la circulation des courants. Idéalement, la circulation des CF doit être perpendiculaire au défaut afin d'obtenir une réponse maximale [IAEA48_2011]. La figure 1.6 décrit trois configurations dans lesquelles, selon l'emplacement d'un défaut surfacique, la circulation des CF créés par une bobine circulaire, peut être impactée. Le cas (a) représente un cas défavorable où l'impact du défaut par rapport aux CF est limité. Dans le cas où le défaut est parallèle aux CF (cf. figure 1.6(b)), le niveau de détection du défaut par le capteur reste faible, contrairement à la figure 1.6(c) où le défaut coupe perpendiculairement la circulation des CF.

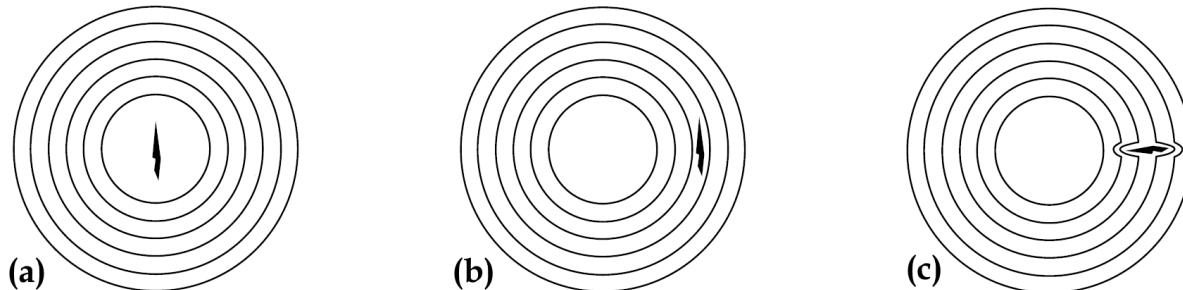


Figure 1.6 : Sensibilité réduite (a), faible (b) et maximum (c) à la détection d'un défaut selon son emplacement [Hellier_2001]

La figure 1.7(a) représente la circulation surfacique des CF lorsque ces derniers ne sont pas modifiés par un défaut ou bien par les bords du matériau [Hellier_2001]. Dans le cas de l'effet de bord (cf. figure 1.7(b)), la circulation des CF est fortement perturbée. Les lignes de courants ne peuvent pas évoluer librement. Dans une application de détection de défauts, cette modification des courants peut avoir un effet comparable à la présence d'un défaut et risque donc d'être interprétée comme tel.

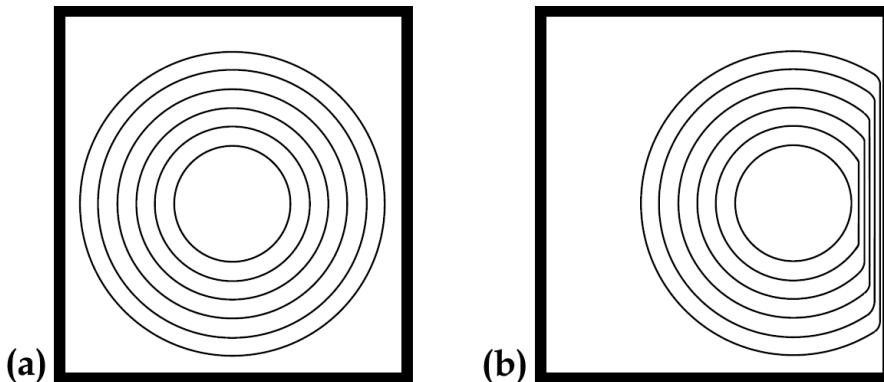


Figure 1.7 : Modification de la circulation des CF due aux bords du matériau. (a) CF non perturbés. (b) Perturbation des CF liée à l'effet de bord [Hellier_2001]

La suite du chapitre porte, entre autres, sur les différents types et modes de fonctionnement des capteurs CF. Cette partie ne prétend pas à l'exhaustivité mais vise à mettre en relief les informations nécessaires à la lecture de ce manuscrit.

1.2.3 Classification fonctionnelle des capteurs courants de Foucault

Par définition, l'émetteur alimenté par un courant alternatif crée un champ magnétique, répondant ainsi à la fonction d'émission, et le récepteur fait une mesure de champ magnétique, c'est la fonction de réception. Les capteurs CF se décomposent en deux configurations : les capteurs à double fonction et les capteurs à fonctions séparées.

- Capteur à double fonction :

Le capteur à double fonction est un capteur dont le ou les éléments constitutifs jouent simultanément le rôle d'émetteur et de récepteur. Le capteur à double fonction le plus simple est constitué d'une seule bobine (cf. figure 1.8). Comme énoncé en section 1.2.1, le champ magnétique de réaction varie selon la circulation des CF dans le matériau. En cas de perturbation, ce champ de réaction modifie l'impédance du bobinage ; c'est-à-dire la réactance inductive et la résistance effective de la bobine. C'est une variation de l'impédance de la bobine qui est mesurée, donnant ainsi une information sur l'état du matériau inspecté. Les capteurs à double fonction sont les capteurs CF les plus couramment utilisés.

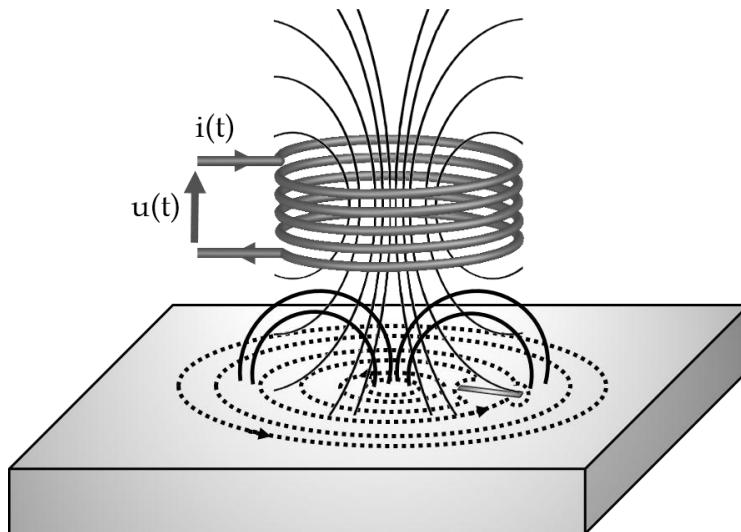


Figure 1.8 : Capteur à double fonction

- Capteurs à fonctions séparées :

Les capteurs à fonctions séparées sont composés d'éléments distincts pour l'émission et la réception. La fonction d'émission est assurée par au moins une bobine. En ce qui concerne la fonction de réception, différentes technologies de capteurs de champ magnétique peuvent être envisagées telles que les capteurs inductifs (bobines), à effet Hall, fluxgates, à magnétorésistance géante (GMR) ou encore à magnéto-impédance géante (GMI) [Peng_2014]. C'est le champ magnétique qui est dans tous les cas mesuré. Dans l'exemple représenté en figure 1.9, la fonction de réception est réalisée par l'intermédiaire d'une bobine.

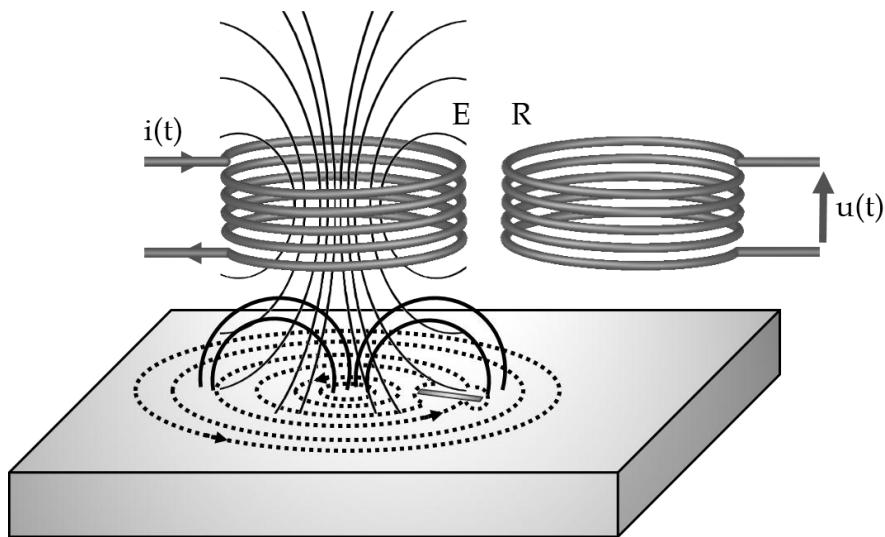


Figure 1.9 : Capteur CF à fonctions séparées

Dans le cas d'une application de détection de défauts, le signal perçu par le récepteur se décompose en deux champs magnétiques distincts. D'une part le couplage direct des lignes de champ magnétique entre l'(ou les) émetteur(s) et le (ou les) récepteur(s) en présence de la pièce conductrice. D'autre part, une variation (souvent faible) de champ lors de la présence d'un défaut. Lorsque l'on souhaite détecter des défauts de faibles dimensions, il est souvent nécessaire de limiter le couplage direct. En effet, l'amplitude du couplage direct peut être si importante que le signal porteur de l'information peut être noyé dans le signal total.

1.2.4 Modes de mesure des courants de Foucault

Les modes de mesure se réfèrent, en partie, au branchement des éléments constituant le capteur. On distingue deux modes de mesure : la mesure absolue et la mesure différentielle.

- Mesure absolue :

Une mesure absolue se compose, dans son principe, d'un seul récepteur. Cette mesure permet d'être sensible à la fois aux paramètres électromagnétiques du matériau (conductivité électrique et perméabilité magnétique) et à l'épaisseur du matériau. Avant le contrôle d'une pièce, un équilibrage sur cale étalon peut, dans certains cas, être effectué pour compenser le signal afin d'atteindre une valeur prédéterminée, par exemple zéro [12718_2008].

- Mesure différentielle :

La mesure différentielle se compose d'au moins deux éléments récepteurs proches. Cette mesure revient à effectuer une différence des acquisitions réalisées simultanément entre les éléments récepteurs. Cette méthode permet notamment de s'affranchir de l'influence de paramètres perturbateurs telles que les propriétés électromagnétiques (conductivité électrique et perméabilité magnétique), la température du matériau ou bien l'effet d'entrefer.

Par ailleurs, la mesure différentielle est sensible aux défauts locaux présents dans le matériau inspecté. Lors du déplacement du capteur, en cas de présence d'un défaut, un déséquilibre du signal est perçu. Ce déséquilibre apparaît lorsqu'un seul des récepteurs se situe à proximité du défaut.

1.2.5 Modes d'excitation des courants de Foucault

Pour réaliser la fonction d'émission, trois principales excitations sont possibles : l'excitation mono-fréquence, multifréquence ou bien pulsée.

- Excitation mono-fréquence :

L'excitation mono-fréquence consiste à alimenter l'émetteur par un courant sinusoïdal et de fréquence donnée. La fréquence des CF est identique à celle qui leur a donné naissance. Dans le cas d'une détection de défauts, le choix de la fréquence dépend essentiellement de la profondeur des défauts recherchés et du matériau.

Dans le cas de la détection de défauts surfaciques, il est souvent intéressant de travailler à de hautes fréquences (en pratique à l'ordre du MHz). Au-delà, l'effet de résonance de la bobine peut apparaître. A contrario, lors de l'inspection de défauts enterrés ou bien dans le cas de matériaux magnétiques, l'équation 1.2 donne une fréquence de travail beaucoup plus basse.

- Excitation multifréquence :

Le principe de l'excitation multifréquence est d'alimenter successivement, ou simultanément, l'émetteur à plusieurs fréquences différentes. Cette excitation peut permettre, par rapport à l'excitation mono-fréquence, de s'affranchir de paramètres perturbateurs du fait que les informations relatives aux matériaux (conductivité électrique, perméabilité magnétique, entrefer ou dimensions d'un défaut) sont potentiellement enrichies par les différentes fréquences utilisées.

- Excitation pulsée :

L'excitation pulsée quant à elle est une alternative à l'excitation multifréquence. Dans ce cas, l'émetteur est excité avec un signal impulsionnel, à durée finie et de contenu spectral riche, qui peut être de différentes formes telles que rectangulaire, triangulaire ou bien demi-sinusoïdale.

L'excitation pulsée voit une utilité dans l'inspection de défauts enterrés, la mesure d'épaisseur ou encore la mesure des paramètres électromagnétiques de matériaux.

1.2.6 Représentation des signaux courants de Foucault

1.2.6.1 Plan d'impédance

Le plan d'impédance permet de représenter les mesures de l'impédance d'une bobine dans le plan complexe. L'axe des abscisses de ce plan représente la partie résistive (R) et l'axe des ordonnées la partie réactive (X) de l'impédance d'une bobine. Ce plan (R, X) est couramment employé lorsque l'on effectue des mesures avec une bobine en mode double fonction [[Vuillermoz_1994](#)].

L'expression de l'impédance Z d'une bobine, parcourue par un courant alternatif, placée dans l'air (i.e. lorsque la bobine est suffisamment éloignée de tout matériau conducteur) s'écrit :

$$Z = Z_0 = R_0 + jX_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (1.3)$$

Où R_0 , X_0 et L_0 représentent respectivement la résistance [Ω], la réactance [Ω] et l'inductance [H] de la bobine dans l'air. La pulsation s'écrit $\omega = 2\pi f$, avec f la fréquence [Hz].

En présence d'une pièce conductrice homogène, la répartition dans l'espace du champ magnétique est modifiée du fait des CF et l'impédance de la bobine devient :

$$Z = Z_{PIÈCE} = R_{PIÈCE} + jX_{PIÈCE} \quad (1.4)$$

Si cette pièce conductrice présente une inhomogénéité alors la circulation des CF est déviée. L'impédance de la bobine, en présence d'un défaut, peut s'écrire :

$$Z = Z_{PIÈCE_DÉFAUT} = Z_{PIÈCE} + \Delta Z_{DÉFAUT} \quad (1.5)$$

Si l'on place ces points dans un plan d'impédance, représenté par la figure 1.10, il est intéressant de constater l'effet du défaut sur l'impédance de la bobine. Le point $Z_{PIÈCE}$ correspond à l'impédance de la bobine en l'absence de défaut et le point Z_0 à une mesure dans l'air. La différence entre les points Z_0 et $Z_{PIÈCE}$ correspond à un effet d'entrefer. La présence d'un défaut dans le matériau fait varier le point de fonctionnement $Z_{PIÈCE}$ vers $Z_{PIÈCE_DÉFAUT}$ suivant une trajectoire communément nommée signature du défaut.

L'affichage du plan (R, X) porte aussi le nom de courbe de Lissajous dans la littérature. Cette courbe fait référence aux travaux menés par Jules Antoine Lissajous. La méthode Lissajous permet, entre autres, d'observer le déphasage entre deux signaux sinusoïdaux [[Lissajous_1857](#)].

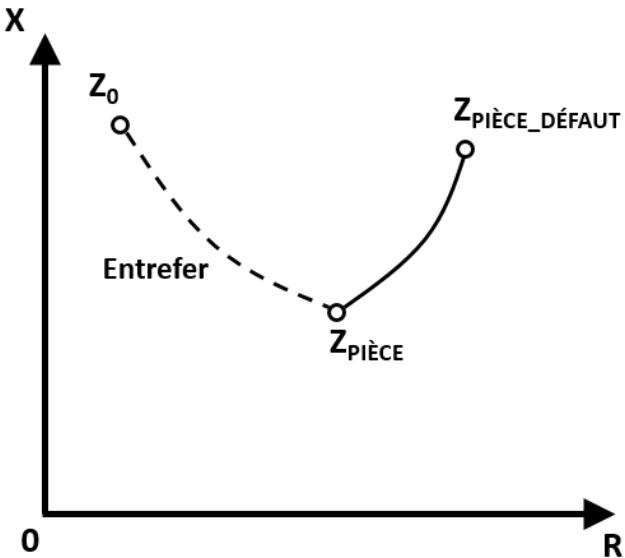


Figure 1.10 : Représentation d'un plan d'impédance

Les mesures de l'impédance peuvent aussi être représentées dans un plan d'impédance dit normalisé (ou normé). La normalisation de l'impédance est effectuée, tout d'abord, par une soustraction de la résistance à vide de la bobine. Ensuite, il est nécessaire de diviser l'équation 1.4 par la réactance dans l'air de la bobine [Libby_1971]. La normalisation de l'impédance permet de s'affranchir de certaines caractéristiques de la bobine comme, par exemple, son nombre de spires. Ces mesures dépendent alors des paramètres géométriques de la bobine, de l'entrefer, de la fréquence d'excitation et des caractéristiques du matériau inspecté telles que sa géométrie et ses paramètres électromagnétiques (conductivité électrique et perméabilité magnétique) [Vuillermoz_1994].

L'impédance normalisée de la bobine se définit :

$$Z_{\text{NORM}} = R_{\text{NORM}} + jX_{\text{NORM}} = \frac{R_{\text{PIÈCE}} - R_0}{X_0} + j \frac{X_{\text{PIÈCE}}}{X_0} \quad (1.6)$$

Dans l'exemple d'une bobine placée dans l'air, son impédance normalisée est un imaginaire pur égal à j . Son point se situe sur l'ordonnée du plan d'impédance normalisée à la valeur (0, 1). La figure 1.11 représente deux exemples de plans d'impédance où la conductivité électrique σ , la perméabilité magnétique μ et l'entrefer sont modifiés.

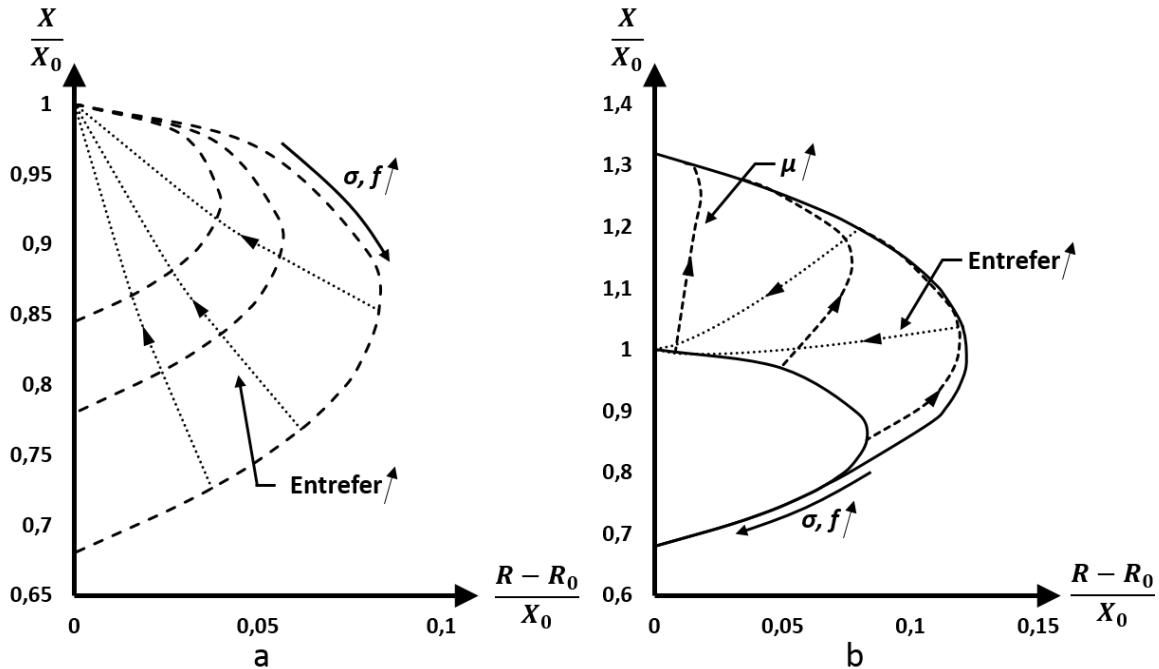


Figure 1.11 : Exemples de plans d’impédance normalisée. (a) Cas de matériaux non magnétiques.
(b) Cas de matériaux magnétiques

1.2.6.2 Plan de tension

Lors de l’utilisation d’un capteur à fonctions séparées, ce n’est pas l’impédance qui est mesurée mais la tension complexe U [V] aux bornes de l’élément récepteur. Cette tension est plus communément appelée force électromagnétique ou f.é.m. Il est préalablement nécessaire de définir une référence de phase, comme par exemple le courant d’excitation de la bobine émettrice. L’expression de cette tension, lorsque le récepteur est dans l’air, peut s’écrire :

$$U = U_o = \operatorname{Re}(U_o) + j \operatorname{Im}(U_o) \quad (1.7)$$

Où $\operatorname{Re}(U_o)$ et $\operatorname{Im}(U_o)$ représentent respectivement les parties réelle et imaginaire [V] de la f.é.m. aux bornes du récepteur dans l’air. En présence d’une pièce conductrice, la f.é.m. devient :

$$U = U_{PIÈCE} = \operatorname{Re}(U_{PIÈCE}) + j \operatorname{Im}(U_{PIÈCE}) \quad (1.8)$$

L’expression de la tension normalisée aux bornes du récepteur peut être définie par :

$$U_{NORM} = \frac{U_{PIÈCE} - \operatorname{Re}(U_o)}{\operatorname{Im}(U_o)} \quad (1.9)$$

Dans le cas d’un capteur à fonctions séparées, avec récepteur bobiné et comme référence de phase le courant d’excitation, $\operatorname{Re}(U_o)$ est nulle et l’équation 1.9 devient :

$$U_{NORM} = \frac{\operatorname{Re}(U_{PIÈCE})}{\operatorname{Im}(U_o)} + j \frac{\operatorname{Im}(U_{PIÈCE})}{\operatorname{Im}(U_o)} \quad (1.10)$$

Les valeurs Z et U normalisées peuvent être comparées dans un même plan complexe. En effet, lorsque le capteur présentant un émetteur et un récepteur confondus est alimenté en courant, la définition de U_{NORM} donne un résultat identique à l'impédance normalisée Z_{NORM} . Les points $(0, 1)$ et $(0, 0)$ du plan d'impédance, après normalisation des mesures, sont communs aux deux configurations de capteurs. Le point $(0, 1)$ représente une mesure du capteur dans l'air et le point $(0, 0)$ une mesure en présence d'un matériau ayant une conductivité qui tend vers l'infini si le couplage magnétique entre le capteur et le matériau est parfait.

1.2.6.3 Acquisition 1D et 2D

L'acquisition en CND par CF consiste à relever une succession de points de mesure. Cet ensemble de points provient de la réponse du récepteur. Dans le cas de l'acquisition une dimension, ou 1D, on acquiert les mesures d'un capteur se translatant selon un seul axe.

L'acquisition 2D permet d'obtenir une cartographie d'une pièce. Pour cela, le capteur se déplace selon deux axes. L'assemblage d'une multitude de lignes de mesure permet de recréer une image de l'état de surface du matériau (cf. figure 1.12).

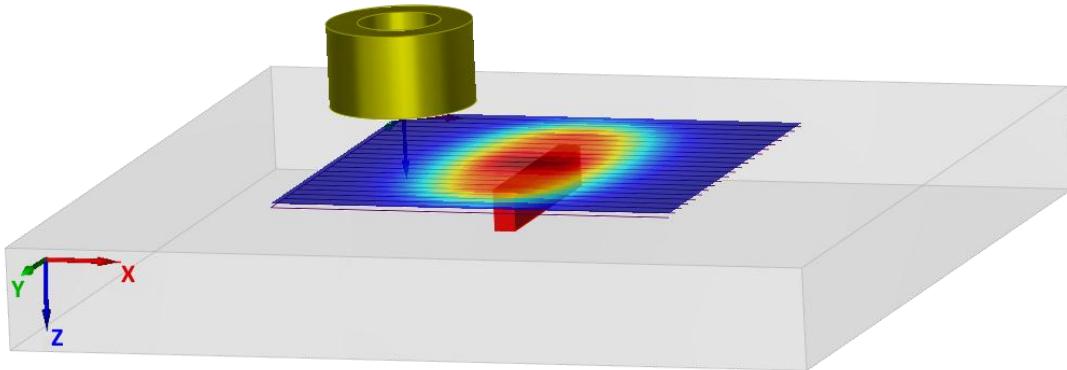


Figure 1.12 : Représentation d'un contrôle 2D simulé sous CIVA [CIVA]

L'acquisition 1D peut permettre, dans certains cas, d'obtenir une acquisition 2D lorsque l'on utilise, par exemple, un capteur multiéléments. De par sa constitution, les éléments étant généralement disposés sous forme d'un réseau de motifs, la translation du capteur selon un axe permet d'obtenir une image 2D. L'imagerie CF multiéléments est approfondie dans le chapitre 3.

1.2.7 Exemples de capteurs courants de Foucault

Les capteurs CF peuvent avoir une grande variété de formes. Le choix du type de capteur, par conséquent sa structure, dépend de l'application. On rencontre essentiellement trois types de capteurs que l'on peut décrire de la façon suivante [12718_2008] :

- Les capteurs surfaciques ou palpeurs permettent d'inspecter des surfaces planes ou bien de formes complexes. Ce sont les capteurs les plus présents sur le marché. Il existe différents types de capteurs surfaciques tels que les capteurs plans (cf. figure 1.13(a)) ou bien sous forme de stylo.
- Les capteurs encerclants entourent complètement l'échantillon à inspecter. Ces capteurs sont destinés au contrôle de matériaux de formes cylindriques telles que les tubes, barres ou encore les fils. L'utilisation d'un guide est nécessaire pour que le matériau sous test soit parfaitement centré par rapport au capteur. Le diamètre interne du capteur est légèrement supérieur au diamètre externe du matériau à inspecter (cf. figure 1.13(b)).
- Les capteurs internes dits sondes permettent le contrôle interne de tubes. Pour cela, on distingue notamment les sondes tournantes, nécessitant un mouvement hélicoïdal afin de balayer toute la surface interne du tube à l'aide d'un élément (ou d'un nombre réduit d'éléments) de la sonde autour de son axe de translation. Ainsi que les sondes multiéléments dont la partie active du capteur est composée de plusieurs éléments disposés radialement et équi-répartis autour de l'axe de la sonde, nécessitant un mouvement de translation (cf. figure 1.13(c)).

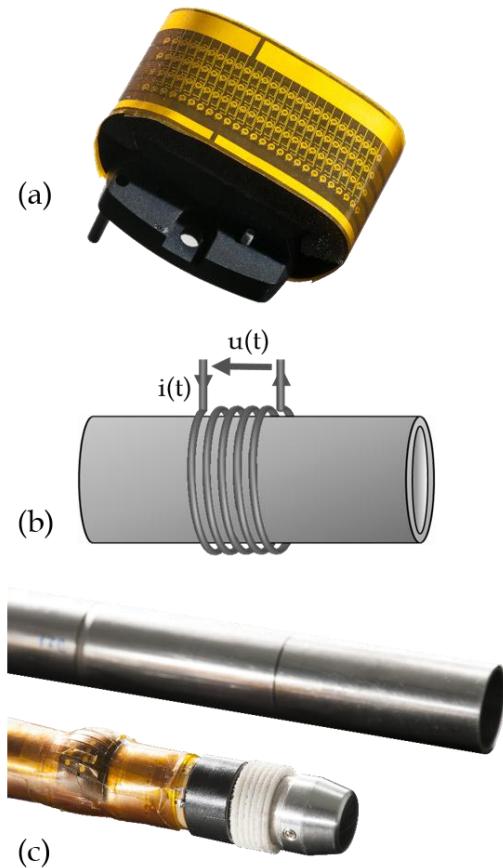


Figure 1.13 : Trois exemples de capteurs CF : tête d'un capteur multiéléments flexible pour l'inspection de surfaces planes (a) [Marchand_2012], schéma de principe d'un capteur encerclant (b) et sonde multiéléments interne (c) [Marchand_2010]

1.2.8 Technologies des bobines

Dans le cas des capteurs inductifs, on retrouve deux classes principales de bobines :

- Les bobines classiques fabriquées par l'enroulement d'un fil conducteur généralement en cuivre émaillé autour d'un noyau (cf. figure 1.14). Le noyau est généralement à air, en plastique ou bien magnétique, en ferrite. Les noyaux en ferrite sont souvent employés en CND par CF car ils permettent de focaliser et/ou amplifier le champ magnétique émis par la bobine d'excitation.



Figure 1.14 : Bobines composées d'un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau d'air

- Les bobines gravées sont réalisées sur PCB standard ou bien sur film flexible type Kapton. Le Kapton est un film très fin de polyimide, d'une dizaine à plusieurs centaines de micromètres, qui présente une très bonne flexibilité. Ces capteurs souples permettent d'épouser et d'inspecter des formes complexes. La figure 1.15 montre un capteur multiéléments composé de 4x32 bobines gravées sur film Kapton. Ces bobines sont reliées aux connecteurs de part et d'autre du film Kapton par de nombreuses pistes électriques.

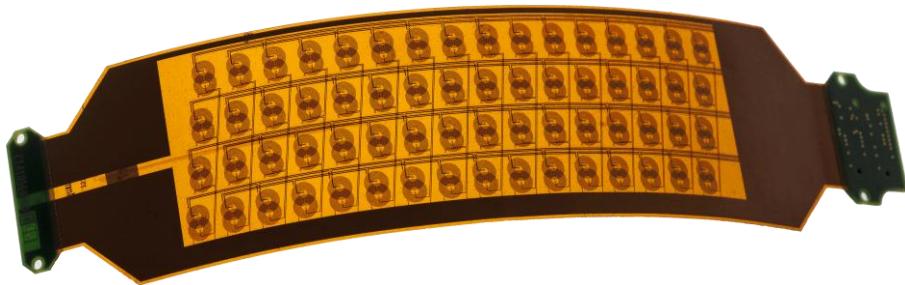


Figure 1.15 : Capteur multiéléments composé de bobines gravées sur film Kapton [Decitre_2014]

1.3 PROPRIÉTÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DES MATERIAUX INSPECTÉS PAR CF

Une induction de CF dans un matériau n'est possible que si ce dernier est conducteur. Dans certains cas, le matériau peut présenter des propriétés magnétiques particulières. Dans cette partie, nous nous intéresserons à la conductivité électrique des métaux et au comportement magnétique des matériaux ferromagnétiques.

1.3.1 Conductivité électrique

La conductivité électrique σ [S/m], inverse de la résistivité électrique ρ [$\Omega \cdot \text{m}$], caractérise la capacité d'un matériau à laisser circuler des porteurs de charge, électrons dans le cas des métaux, sous l'action d'un champ électrique extérieur. Dans les conditions théoriques idéales (cristal parfait à 0 K), ces électrons ne trouvent pas de résistance à leur mouvement [[Stossel_1981](#)]. La conductivité est liée à différents paramètres dont la taille des grains du matériau conducteur (monocristallin ou polycristallin) ou bien la température ambiante. Pour un matériau donné, σ varie en fonction de la température appliquée : pour les métaux, l'augmentation de la température fait décroître la conductivité du matériau car la mobilité des électrons en est réduite. Le tableau 1.1 liste la conductivité électrique, évaluée à 300 K, de quelques exemples de métaux purs [[Haynes_2016](#)].

Tableau 1.1 : Conductivité électrique de métaux purs à 300 K

Matériaux	σ [MS/m]
Néodyme	1,55
Titane ¹	2,56
Plomb	4,69
Étain	8,7
Platine	9,26
Fer	10,02
Lithium	10,47
Nickel	13,89
Zinc	16,5
Cobalt ¹	17,86
Tungstène	18,38
Magnésium	22,17
Aluminium	36,59
Or	44,03
Cuivre	57,97
Argent	61,39

¹ Conductivité électrique évaluée à 273 K.

1.3.2 Comportement magnétique des matériaux ferromagnétiques

En CND par CF, une bobine alimentée par un courant donne naissance à un champ magnétique H [A/m]. En présence d'un champ H , les matériaux magnétiques ont la propriété de s'aimanter. L'aimantation M [A/m] s'écrit :

$$M = \chi H \quad (1.11)$$

Où χ , susceptibilité magnétique (sans dimension), est un tenseur d'ordre 2 [Heck_1974] qui caractérise l'aptitude du matériau à conduire les lignes de champ [Gié_1985].

L'induction magnétique B [T], autrement dit densité de flux magnétique, est la réponse d'un matériau magnétique à un champ H . L'équation 1.12 définit la loi générale de l'induction magnétique :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.12)$$

Où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ($4\pi 10^{-7}$ H/m).

À partir des équations 1.11 et 1.12, l'induction B peut être formulée ainsi :

$$B = \mu_0 (I + \chi) H \quad (1.13)$$

Où I est la matrice identité.

En réalité, la réponse de l'induction B pour un matériau ferromagnétique n'évolue pas linéairement mais présente un effet de saturation et hystérotique selon l'intensité du champ H . Ces matériaux ont la faculté de conserver une aimantation après disparition du champ H [Debus_1992].

1.3.2.1 Courbe de première aimantation et comportement non linéaire

Les matériaux ferromagnétiques se subdivisent en domaines dits de Weiss. Les domaines sont séparés par des parois dites de Bloch. Chaque domaine possède une aimantation uniforme et, d'un domaine à l'autre, l'aimantation n'a pas la même direction [Trémolet_2000]. La courbe de première aimantation d'un matériau ferromagnétique représente le passage de son état désaimanté ($M = 0$) à son état dit de saturation. L'action du champ magnétique H a pour effet de favoriser l'augmentation du volume des domaines de Weiss orientés dans le sens du champ [Mazaleyrat_2013].

La figure 1.16 représente l'allure de l'aimantation M en fonction d'un champ croissant H de direction donnée lorsque le matériau ferromagnétique est initialement désaimanté. Lors de l'application d'un champ (H_2), le volume des domaines, dont les directions d'aimantation sont voisines à celle du champ appliqué, augmente grâce au déplacement irréversible des parois de Bloch. En augmentant l'intensité du champ (H_3), les domaines, dont les directions d'aimantation sont opposées à celle du champ appliqué, disparaissent. L'augmentation du champ (H_4) provoque l'état de saturation du matériau : c'est-à-dire que l'aimantation M atteint une valeur maximum M_s . L'état de saturation correspond à une rotation de tous les moments magnétiques selon la direction du champ H .

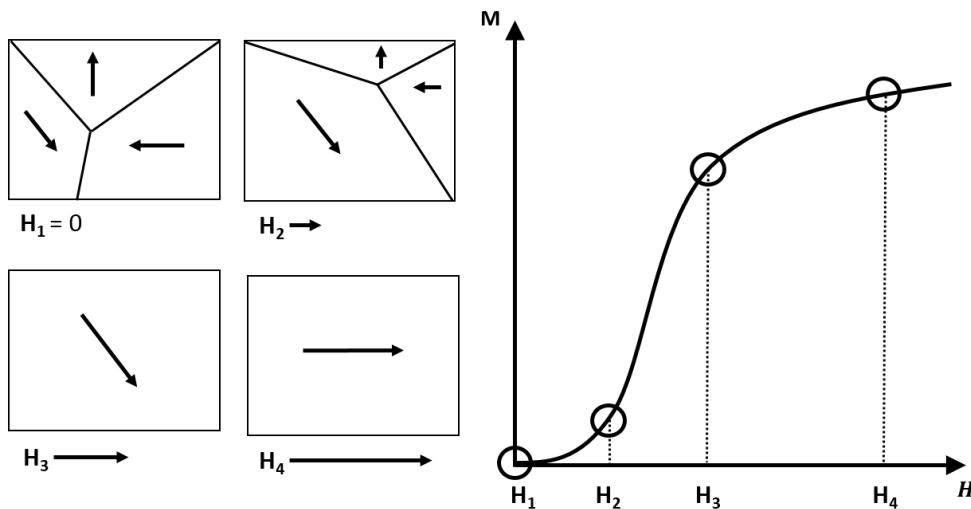


Figure 1.16 : Courbe de première aimantation

Après saturation du matériau, une diminution de l'intensité du champ H donne naissance au comportement hystérotique du matériau ferromagnétique. Ce phénomène se traduit, par rapport à la première aimantation, par une diminution plus faible de l'aimantation M en fonction du champ H . Lorsque le champ H devient nul ($H = 0$), le matériau conserve une aimantation rémanente M_R et par conséquent un champ rémanent B_R . L'annulation de l'aimantation du matériau nécessite l'application d'un champ $-H_c$, ou champ coercitif. L'application d'un champ magnétique $-H_4$ puis H_4 permet l'obtention du cycle d'hystérosis majeur du matériau (cf. figure 1.17).

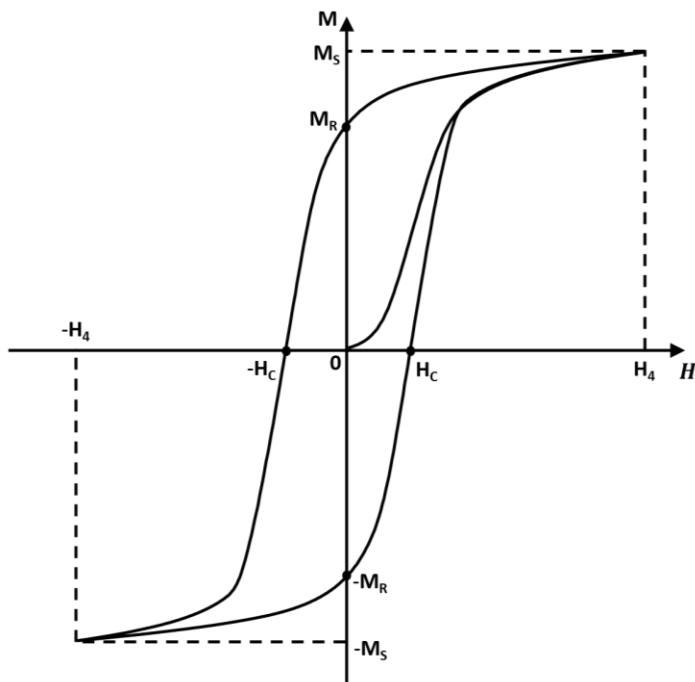


Figure 1.17 : Cycle d'hystérosis

On distingue deux familles de matériaux ferromagnétiques en fonction du comportement hystérotique de ces derniers [Brissonneau_1997]. Les matériaux ferromagnétiques dits doux ont un cycle d'hystérésis étroit. Les matériaux ferromagnétiques durs sont, quant à eux, caractérisés par un large cycle d'hystérésis. Les matériaux ferromagnétiques durs ne peuvent être désaimantés qu'avec difficultés, d'où leur intérêt pour la réalisation d'aimants permanents.

1.3.2.2 Différents types de perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique μ représente la capacité d'un matériau à réagir à un champ magnétique d'excitation [Coey_2011]. La perméabilité magnétique est définie par un rapport entre B et H et peut être relative ; c'est-à-dire divisée par la perméabilité du vide μ_0 . Du fait du comportement non linéaire et hystérotique des matériaux ferromagnétiques, différentes perméabilités peuvent être définies : la perméabilité absolue, initiale, différentielle, superposée et réversible. En effet, les types de perméabilités exposées dans la littérature sont nombreux et les définitions données parfois contradictoires selon leurs auteurs [Heck_1974] [Lebougeois_2005].

- La perméabilité absolue et relative :

En tout point sur la courbe $B(H)$, la perméabilité absolue μ [H/m] est définie par :

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \mu_R \quad (1.14)$$

Où μ_R correspond à la perméabilité relative (sans dimension). La perméabilité μ passe par un maximum μ_{MAX} lorsque H varie. Les équations 1.13 et 1.14 permettent la réécriture suivante de μ_R :

$$\mu_R = \chi + 1 \quad (1.15)$$

- La perméabilité initiale :

La perméabilité initiale μ_i correspond à la perméabilité magnétique lorsque le matériau est désaimanté et excité à basse fréquence et à très faible champ. On peut définir μ_i par l'équation suivante :

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (1.16)$$

- La perméabilité différentielle :

La perméabilité différentielle μ_{DIF} représente la pente de la tangente en un point $B(H)$ donné:

$$\mu_{DIF} = \frac{dB}{dH} \quad (1.17)$$

- La perméabilité superposée et la perméabilité réversible :

La perméabilité superposée μ_Δ est obtenue par une variation de champ autour d'un point de polarisation et s'écrit :

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1.18)$$

Où ΔB et ΔH sont les valeurs crête-à-crête respectives de l'induction B et du champ H en un point donné $B(H)$.

La perméabilité réversible μ_{REV} , cas particulier de la perméabilité superposée, est obtenue par une très faible variation de champ. La perméabilité réversible peut s'écrire ainsi :

$$\mu_{REV} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \mu_\Delta = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1.19)$$

L'évaluation de la perméabilité magnétique, à l'exception des matériaux anisotropes, dépend de la direction d'aimantation étudiée. L'illustration de ces perméabilités est présentée par la figure 1.18. Le tableau 1.2 liste la perméabilité relative initiale et maximale de matériaux et d'alliages ferromagnétiques [Haynes_2016].

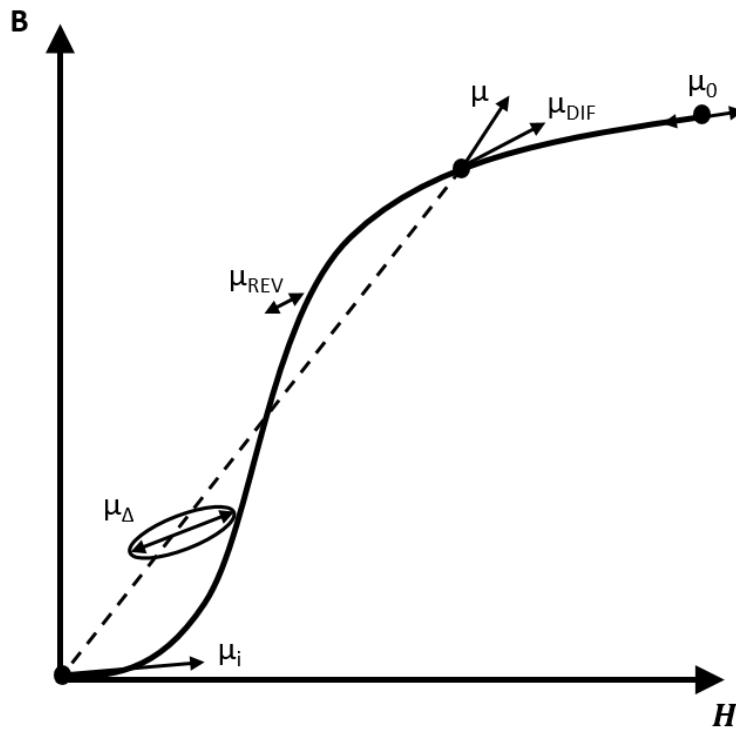


Figure 1.18 : Représentation de différentes perméabilités [Mazaleyrat_2013]

Tableau 1.2 : Exemples de perméabilités relatives initiales et maximales

Matériaux	Composition	μ_i/μ_0	μ_{MAX}/μ_0
Fer	99Fe	200	6 000
25Perminvar	45Ni-30Fe-25Co	400	2 000
Fer-Silicium	96Fe-4Si	500	7 000
Fer-Aluminium	96,5Fe-3,5Al	500	19 000
Alfer	87Fe-13Al	700	3 700
Acier doux	Fe-0,1C-0,1Si-0,4Mn	800	1 100
2V-Supermendur	49Fe-49Co-2V	800	4 000
Hypernik	50Fe-50Ni	4 000	70 000
78 Permalloy	78Ni-22Fe	4 000	100 000
Mumetal	77Ni-16Fe-5Cu-2Cr	20 000	100 000
Fer	99,9Fe	25 000	350 000
Sendust	85Fe-10Si-5Al	36 000	120 000
Supermalloy	79Ni-16Fe-5Mo	100 000	1 000 000

1.4 CONCLUSION

Ce chapitre, introduit par l'historique de l'apparition du CND, a porté sur l'approfondissement du CND par CF qui est l'objet d'étude de cette thèse. Les applications du CND par CF sont nombreuses et variées, tout comme les configurations de capteurs permettant de réaliser les mesures CF. La configuration et/ou le mode de mesure retenue résulte directement de l'application visée telle que l'inspection de défauts ou bien la mesure d'entrefer. Les capteurs développés durant cette thèse se basent, en partie, sur l'étude bibliographique relatée dans ce premier chapitre. Étant donné que les CF dépendent des paramètres électromagnétiques du matériau étudié, le CND par CF est donc approprié à l'évaluation expérimentale de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique : le chapitre suivant est consacré à ce sujet d'étude.

Il a également été exposé, dans les grandes lignes, le comportement magnétique des matériaux ferromagnétiques ainsi que les effets non linéaires et hystéritiques de ces derniers. Au regard de ces caractéristiques, le contrôle de pièces ferromagnétiques peut s'avérer difficile à mettre en œuvre.

CHAPITRE 2 – OPTIMISATION DE CAPTEURS CF POUR L'ÉVALUATION DES PARAMÈTRES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DES MATERIAUX

2.1	ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE PAR MÉTHODES CONVENTIONNELLES	41
2.1.1	ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ PAR LA MÉTHODE A QUATRE POINTES.....	41
2.1.2	ÉVALUATION DE LA PERMÉABILITÉ PAR LA MÉTHODE DU PERMEAMETRE.....	42
2.1.2.1	<i>Principe de l'hystérésigraphe.....</i>	42
2.1.2.2	<i>Évaluation expérimentale de la perméabilité</i>	44
2.1.3	CARACTERISATION DE MATERIAUX MAGNETIQUES DE REFERENCE	46
2.2	CONCEPTION D'UN CAPTEUR CF POUR L'ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ DES MATERIAUX NON MAGNÉTIQUES	47
2.2.1	ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ ELECTRIQUE DE MATERIAUX NON MAGNETIQUES PAR CAPTEUR COURANTS DE FOUCAULT DOUBLE FONCTION	47
2.2.2	OPTIMISATION D'UN MOTIF SENSIBLE A LA CONDUCTIVITÉ	49
2.2.2.1	<i>Étude de l'effet d'entrefer</i>	49
2.2.2.2	<i>Détermination de la configuration des bobines.....</i>	51
2.2.2.3	<i>Réalisation du motif sur film Kapton.....</i>	55
2.2.2.4	<i>Simulation du comportement en fréquence du capteur.....</i>	55
2.2.3	RESULTATS EXPERIMENTAUX POUR L'ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITÉ.....	56
2.2.3.1	<i>Évaluation de la conductivité sur cales étalons.....</i>	57
2.2.3.2	<i>Test du capteur optimisé en présence de défauts</i>	59
2.2.4	MISE EN ŒUVRE DU CAPTEUR SUR MATERIAUX MAGNETIQUES	62
2.2.4.1	<i>Résultats expérimentaux sur différents matériaux ferromagnétiques</i>	62
2.2.4.2	<i>Application à la détection d'une zone brûlée</i>	65
2.3	ÉVOLUTION DU CAPTEUR CF POUR ÉVALUER LA CONDUCTIVITÉ ET LA PERMÉABILITÉ D'UN MATERIAU FERROMAGNÉTIQUE	70
2.3.1	INTRODUCTION	70
2.3.2	INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LA MESURE COURANTS DE FOUCAULT	71
2.3.2.1	<i>Cas des matériaux non magnétiques.....</i>	71
2.3.2.2	<i>Cas des matériaux magnétiques</i>	72
2.3.3	PROPOSITION ET EVALUATION EXPERIMENTALE D'UN RECEPTEUR BOBINE.....	73
2.3.3.1	<i>Simulation de récepteurs inductifs</i>	73
2.3.3.2	<i>Mesures avec un récepteur bobiné</i>	76
2.3.4	PROPOSITION ET EVALUATION EXPERIMENTALE D'UN CAPTEUR MAGNETIQUE	80
2.4	CONCLUSION	83

Un des intérêts du CND par CF porte sur sa sensibilité à la détection de défauts surfaciques ou proches de la surface dans des pièces conductrices, éventuellement magnétiques. Ces contrôles sont couramment utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique ou encore le secteur de l'énergie.

La conception de capteurs optimisés en vue de la détection de défauts repose de plus en plus sur l'utilisation de plateformes de simulation, comme par exemple CIVA [CIVA], qui permettent de simuler la réponse du capteur durant une inspection. Pour simuler le comportement d'un capteur, il est nécessaire de connaître les paramètres électromagnétiques (conductivité électrique σ et perméabilité magnétique μ) du matériau inspecté. Le renseignement de ces paramètres est une nécessité pour avoir une bonne adéquation entre les données simulées et les données expérimentales. Malheureusement, les propriétés électromagnétiques d'une pièce sont fréquemment mal connues. Dans un premier temps, afin d'évaluer la conductivité et la perméabilité, deux méthodes conventionnelles basées sur des normes [60468_1974] [60404-3_2009] [A773_2001] [B193_2014] sont investiguées. Ces méthodes conventionnelles par rapport à des méthodes par CF présentent des conditions de mise en œuvre difficiles. C'est pourquoi, deux capteurs CF optimisés sont ensuite présentés : un premier capteur porte sur l'évaluation de σ dans le cas des matériaux purement conducteurs. Il est ensuite complété par un second capteur afin d'accéder à σ et μ des matériaux ferromagnétiques.

2.1 ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE PAR MÉTHODES CONVENTIONNELLES

L'étalonnage des capteurs CF ou la comparaison entre les données simulées et les mesures nécessite de posséder des matériaux étalons. Les matériaux évalués se décomposent en deux catégories : les matériaux purement conducteurs et les matériaux ferromagnétiques. Certains de ces matériaux présentent des paramètres σ ou μ inconnus. En dehors des CF, il existe des méthodes conventionnelles permettant d'évaluer ces paramètres séparément.

2.1.1 Évaluation de la conductivité par la méthode à quatre pointes

La méthode volt-ampèremétrique dite à quatre pointes, représentée par la figure 2.1, est employée pour évaluer σ . Lorsque qu'un courant continu I [A] traverse le matériau, une chute de tension V [V] apparaît aux bornes du voltmètre. Cette tension est proportionnelle à la conductivité du matériau ainsi qu'à la distance d [m] entre les pointes du voltmètre. L'estimation de la conductivité [S/m] est caractérisée par la formule suivante :

$$\sigma \approx \frac{I \cdot d}{V \cdot S} \quad (2.1)$$

Où S [m^2] est la section du matériau perpendiculaire à la circulation du courant.

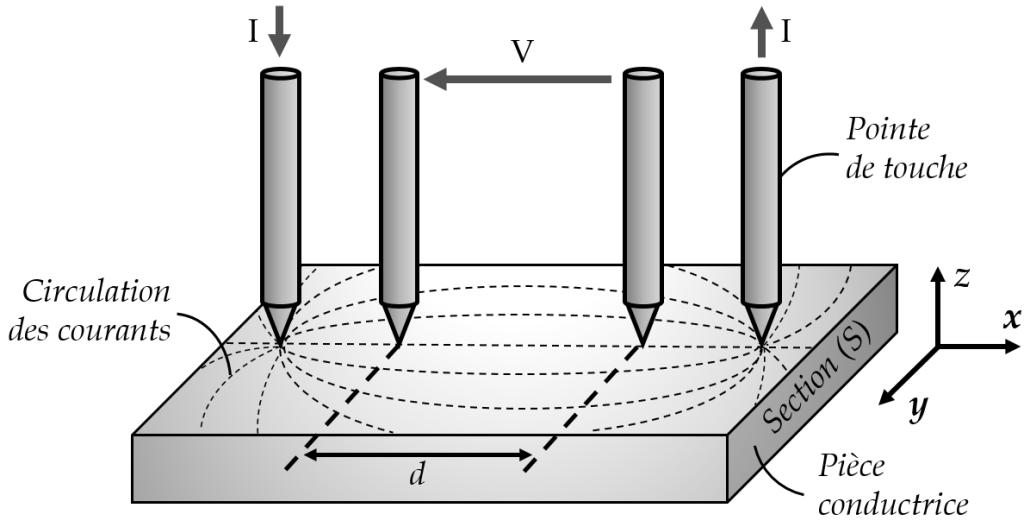


Figure 2.1 : Méthode dite à quatre pointes

Les dimensions latérales de la pièce, selon y , doivent être suffisamment faibles par rapport aux distances entre pointes pour assurer une distribution uniforme du courant entre les deux électrodes où la mesure de la tension V est réalisée [Smits_1958] [60468_1974]. Les avantages majeurs de cette méthode reposent sur la reproductibilité et la précision des mesures [Bowler_2005]. La mesure est de plus indépendante de la perméabilité magnétique du matériau. La surface de l'échantillon doit, en revanche, être exempte de traces de peinture ou de corrosion afin d'assurer un bon contact électrique entre les pointes de touche et le matériau.

2.1.2 Évaluation de la perméabilité par la méthode du perméamètre

2.1.2.1 Principe de l'hystérisigraphe

L'évaluation de μ peut être réalisée au moyen d'un banc de mesure analogue à la méthode dite du perméamètre [60404-3_2009] [A773_2001]. Cette manipulation, représentée par la figure 2.2, est mise en œuvre au GeePs dans le but de caractériser les propriétés magnétiques de matériaux ferromagnétiques sous contraintes [Dahia_2015].

Le perméamètre est un hystérisigraphe, permettant ainsi de tracer la courbe $B(H)$ de l'échantillon sous test [Fiorillo_2010]. L'échantillon est entouré par une bobine d'excitation permettant de générer le champ magnétique H . Afin de canaliser les lignes de champ, l'échantillon est introduit au centre d'un circuit magnétique. Le circuit magnétique est composé de deux culasses en Fer-Silicium en forme de U, assurant la fermeture du circuit magnétique. Le dispositif crée ainsi un champ uniforme dans la zone utile de l'échantillon où l'évaluation des paramètres électromagnétiques est opérée.

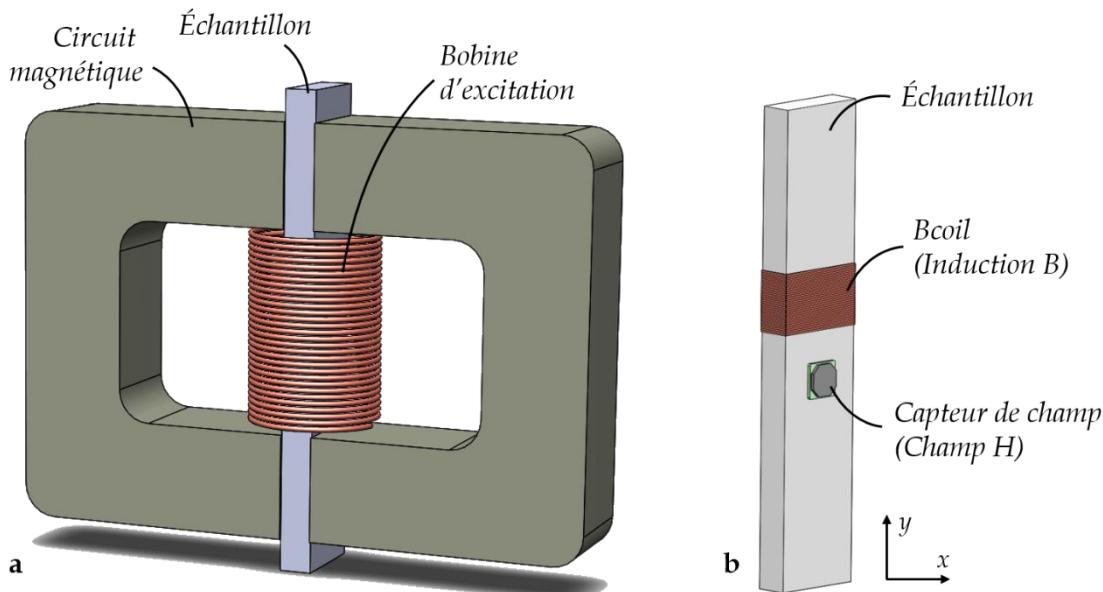
La mesure du champ H est réalisée par l'intermédiaire d'un capteur de champ. Selon l'intensité du champ H , deux technologies de capteurs sont employées : le capteur à effet Hall ou le capteur fluxgate. Le capteur à effet Hall permet de relever des champs importants (10^{-3} à 10^1 T) contrairement

au fluxgate qui est adapté à la mesure de faibles champs (10^{-9} à 10^{-3} T) [Ripka_2001]. Le capteur, dont l'axe de sensibilité est orienté selon y (cf. figure 2.2), est placé à l'intérieur de la bobine d'excitation et au plus proche de l'échantillon. Une mesure du champ dans l'air, si la distance entre le capteur et l'échantillon est suffisamment faible, permet de déterminer le champ magnétique dans l'échantillon car le champ est uniforme dans la zone utile.

La mesure de l'induction B dans l'échantillon est réalisée par une B-Coil [Karimian_2014]. La B-Coil est une bobine enroulée autour de l'échantillon composée d'un nombre de spires N_{B_COIL} dont le fil doit être de faible section ($\varnothing_{CONDUCTEUR}$ de 0,1 mm à 0,2 mm). La variation du flux magnétique traversant l'échantillon donne naissance à une tension induite e [V], ou force électromotrice, aux bornes de la B-Coil. La mesure de la tension induite permet d'évaluer la valeur de l'induction B . Dans le cas où B est homogène dans le volume du bobinage, son expression peut être obtenue à partie de e par :

$$B = \frac{1}{N_{B_COIL} S_{EC}} \int e(t) dt \quad (2.2)$$

Où S_{EC} [m^2] est la section de l'échantillon caractérisé.



La caractérisation d'un matériau est précédée d'un cycle de désaimantation ; ainsi le matériau ne présente pas d'aimantation en l'absence de champ magnétique extérieur [Wilson_2014]. L'aimantation rémanente ne permet pas en effet d'évaluer correctement l'induction B lorsque le champ H s'intensifie car le cycle d'hystérisis ne commence pas au point (0, 0) du graphe $B(H)$. Pour désaimanter le matériau, la bobine d'excitation est alimentée par un courant sinusoïdal exponentiellement décroissant de faible fréquence (par exemple 1 Hz). Ainsi, les cycles d'hystérisis, à

chaque demi-période, se rétrécissent autour du point (0, 0) du graphe $B(H)$. Lors de la réalisation de mesures CF dans cette thèse, les matériaux ferromagnétiques sont systématiquement démagnétisés afin d'éliminer l'aimantation rémanente qui peut être source de perturbations.

La figure 2.3 montre la désaimantation d'un acier faiblement allié soumis à un champ sinusoïdal d'amplitude exponentiellement décroissant. Le cycle de désaimantation, dans cet exemple, est de 50 périodes avec un courant initial de 10 A. On remarque une induction de saturation B_S de 1,8 T pour un champ H initial d'environ 6 kA/m.

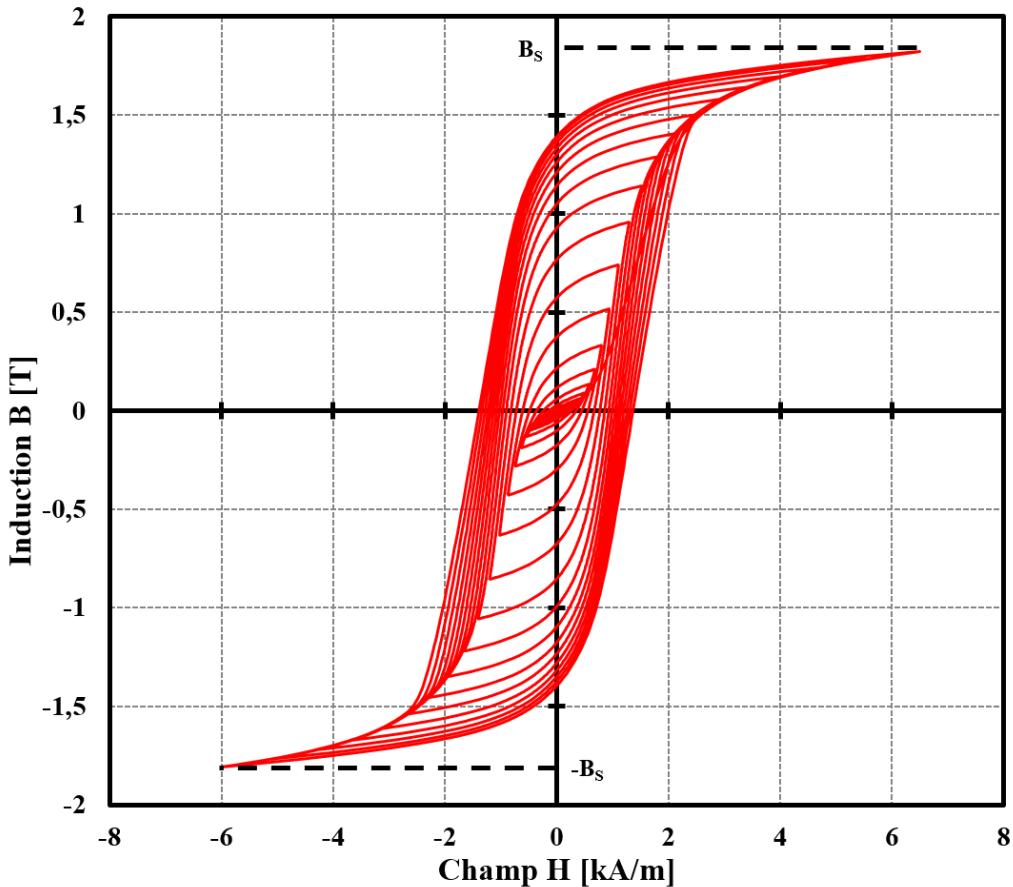


Figure 2.3 : Exemple de désaimantation d'un acier faiblement allié

2.1.2.2 Évaluation expérimentale de la perméabilité

La perméabilité magnétique relative μ_{MES}/μ_0 que l'on souhaite évaluer est définie par :

$$\frac{\mu_{MES}}{\mu_0} = \frac{\Delta B}{\Delta H \cdot \mu_0} \quad (2.3)$$

μ_{MES}/μ_0 s'apparente à la perméabilité magnétique relative superposée μ_A/μ_0 autour du point (0, 0) du graphe lorsque le matériau est désaimanté (cf. chapitre 1, sous-section 1.3.2.2). L'excitation du

matériaux est courte (deux périodes) et réalisée à très basse fréquence ($\leq 1\text{Hz}$) avec un courant de faible intensité ($< 0,2\text{A}$). L'influence de la fréquence d'excitation sur l'évaluation de la perméabilité est très importante : les explications sont détaillées en annexe A. Du fait de la haute sensibilité à faible champ du capteur fluxgate [Fiorillo_2004], ce dernier est employé pour relever le champ H .

Le moyen le plus simple pour expliquer le procédé est tout simplement d'illustrer nos propos. La figure 2.4 montre les courbes $B(H)$ obtenues pour trois matériaux magnétiques différents. Le nom du matériau, la fréquence et le champ d'excitation ΔH de ces trois échantillons sont les suivants :

- Acier 16MND5 : 1 Hz et $\pm 100\text{ A/m}$;
- Fer doux très faiblement allié : 0,1 Hz et $\pm 40\text{ A/m}$;
- Ferrite 3C94 : 1 Hz et $\pm 40\text{ A/m}$.

La pente des droites en pointillé, sur la figure 2.4, représente μ_{MES} .

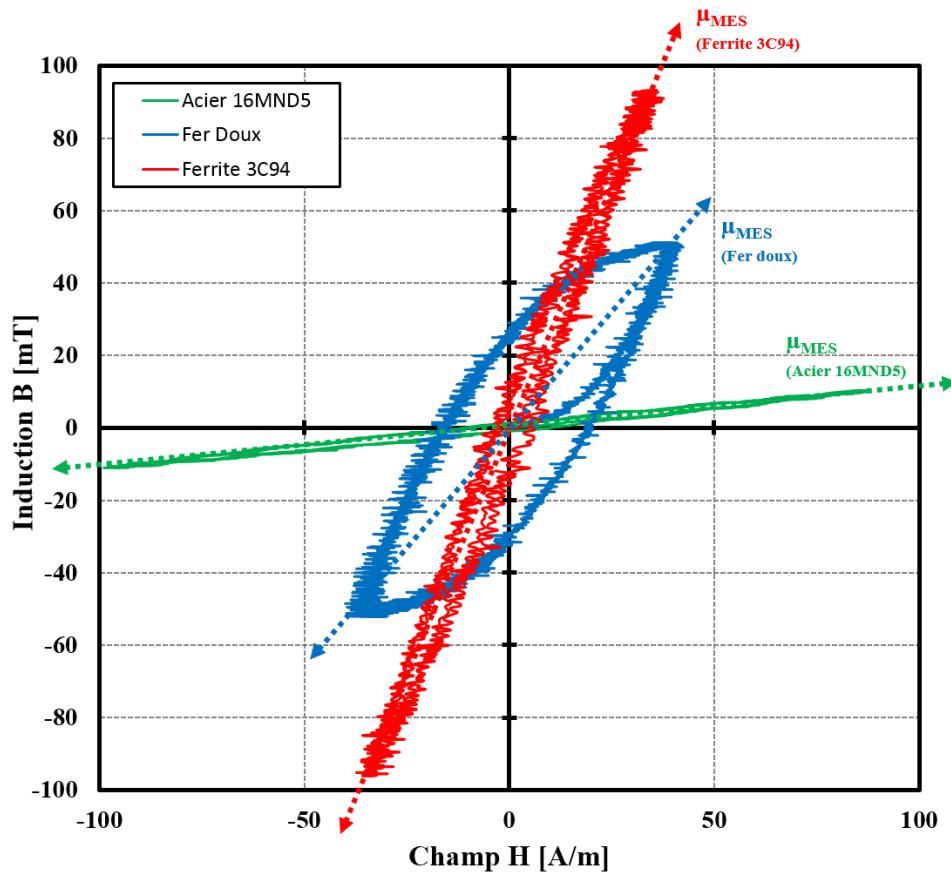


Figure 2.4 : Évaluation expérimentale de μ_{MES}

La perméabilité relative μ_{MES}/μ_0 , selon l'équation 2.3, est évaluée respectivement pour l'acier 16MND5, le fer doux très faiblement allié et le ferrite 3C94 à 90, 1000 et 2200. Lorsque le cycle de désaimantation du matériau est correctement effectué, la reproductibilité des mesures est satisfaisante, même après un démontage et remontage du circuit magnétique.

2.1.3 Caractérisation de matériaux magnétiques de référence

L'utilisation des méthodes conventionnelles citées précédemment a permis de constituer une base de matériaux magnétiques dans le but d'évaluer les capteurs CF conçus dans la suite du travail de thèse (cf. sous-chapitres 2.2 et 2.3). Les paramètres géométriques ainsi que les paramètres électromagnétiques des matériaux magnétiques étudiés sont listés dans le tableau 2.1. La perméabilité relative μ_{MES}/μ_0 est évaluée pour un champ d'excitation ΔH de l'ordre de 40 A/m. Cet ordre de grandeur a été évalué par simulation en se basant sur des capteurs CF disponibles au laboratoire.

Tableau 2.1 : Échantillons magnétiques évalués

Matériaux	Section [mm ²]	Longueur [mm]	Champ B de saturation [T]	σ [MS/m]	μ_{MES}/μ_0
Inox 15-5-PH	30 x 10	120	0,8	1,3	40
Acier 16NCD13	30 x 8	120	1,7	3,4	110
Acier 32CDV13	30 x 10	120	1,6	3,4	80
Acier 16MND5	29 x 10	170	1,7	4,2	90
Acier 0,35%C	11 x 5	150	1,8	4,8	80
Acier allié	32 x 8	160	0,55	2,3	30
Fer doux	35 x 20	220	1,85	8,9	1 000
Ferrite 3C94	25 x 25	100	0,45	~0	2 200

2.2 CONCEPTION D'UN CAPTEUR CF POUR L'ÉVALUATION DE LA CONDUCTIVITÉ DES MATÉRIAUX NON MAGNÉTIQUES

Ce sous-chapitre porte sur la conception d'un capteur CF afin d'évaluer σ dans le cas des matériaux non magnétiques. Le capteur est tout d'abord testé sur cales étalons purement conductrices puis en présence d'échantillons purement conducteurs présentant des défauts surfaciques, le but étant alors, dans une mesure CF, d'extraire l'information concernant la signature du défaut à la conductivité électrique.

L'évaluation expérimentale du capteur a ensuite été étendue aux matériaux magnétiques afin de connaître le comportement du capteur vis-à-vis de ce type de matériau. Cette étude permet d'effectuer la transition entre ce sous-chapitre et le sous-chapitre 2.3.

2.2.1 Évaluation de la conductivité électrique de matériaux non magnétiques par capteur courants de Foucault double fonction

Le CND par CF est couramment utilisé pour l'évaluation de la conductivité électrique de matériaux non ferromagnétiques aussi bien en laboratoire qu'en milieu industriel [Fischer_2002]. En pratique, deux modes d'excitation sont généralement utilisés : l'excitation pulsée, lorsque la bobine est alimentée par une source de type impulsion [Tai_1996] [Chen_2015], et l'excitation harmonique. Nous nous intéresserons dans cette partie à l'excitation harmonique du type mono-fréquence d'un capteur à double fonction qui est majoritairement employée pour l'évaluation de σ [E1004_2009]. Classiquement, c'est l'impédance Z aux bornes du capteur qui est mesurée [Zergoug_2000] [Dziczkowski_2013]. L'évaluation de σ dans le cas des matériaux non magnétiques, par rapport aux matériaux magnétiques, est grandement simplifiée étant donné que μ est fixée ($\mu = \mu_0$). En effet, l'impédance de la bobine dépend de plusieurs paramètres dont, entre autre, le couple (σ, μ) du matériau étudié (cf. chapitre 1, section 1.2.1).

L'évaluation de σ peut faire appel à une normalisation de l'impédance Z ; c'est-à-dire qu'une division de l'impédance de la bobine par sa réactance dans l'air est effectuée (cf. équation 1.6). Afin d'illustrer l'impédance normalisée, la simulation d'un capteur double fonction excité à 200 kHz est étudiée. Le tableau 2.2 décrit les paramètres géométriques d'un capteur, disponible dans le laboratoire, ainsi que les caractéristiques physiques du matériau simulé. La figure 2.5 montre le capteur simulé.

Tableau 2.2 : Caractéristiques géométriques et physiques de la bobine et du matériau

Bobine	Matériau		
Diamètre interne	2 mm	Épaisseur	20 mm
Diamètre externe	3,5 mm	σ	[0,6... 60] MS/m
Hauteur	2 mm		
Nombre de spires	328		
Entrefer	10 μ m		

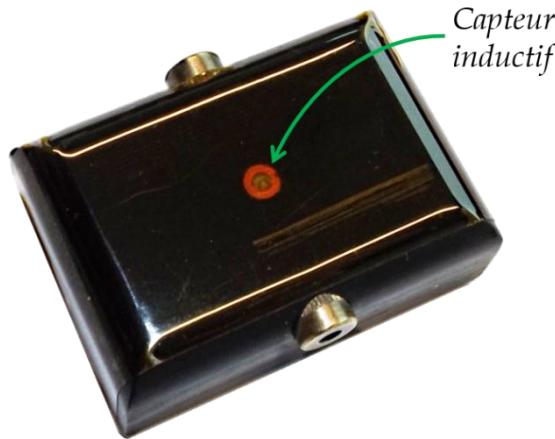


Figure 2.5 : Capteur simulé

La figure 2.6 montre, dans le plan complexe normalisé, la simulation de la réponse de la bobine lorsque σ évolue de 0,6 MS/m à 60 MS/m à 200 kHz. La courbe évoque un croissant de lune que l’on retrouve couramment en CND par CF [Le Bihan_2003], mais dont l’exploitation des résultats reste difficile.

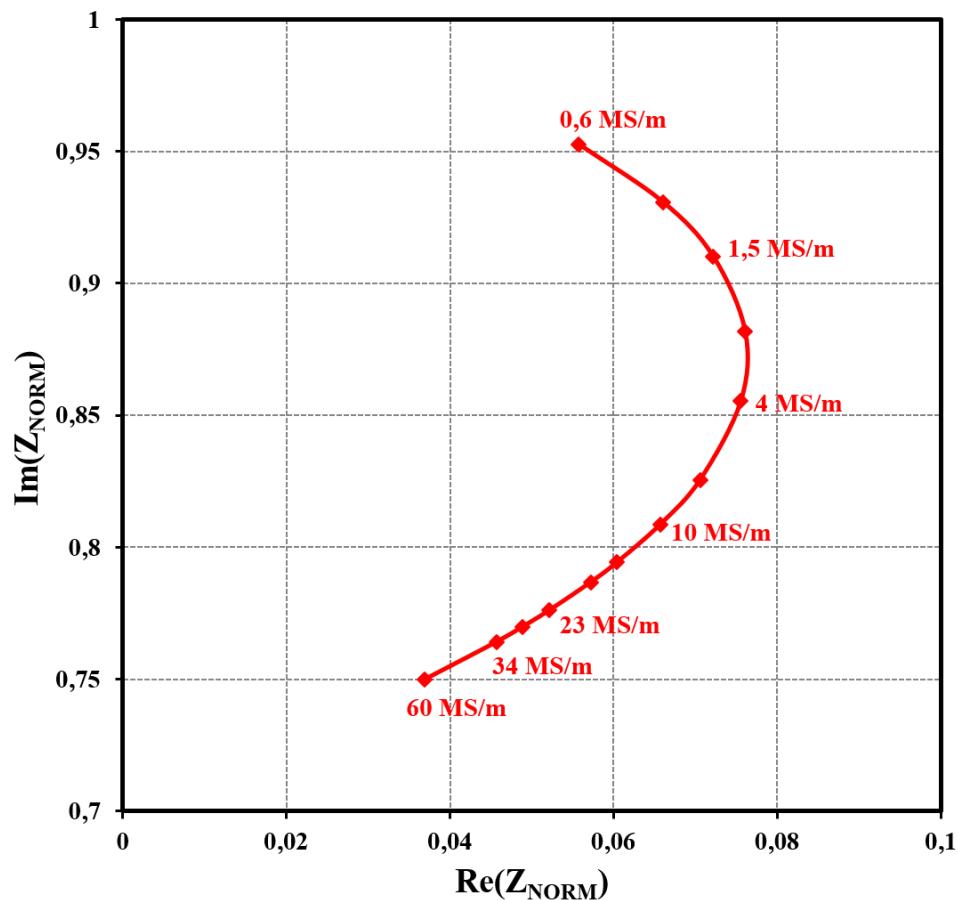


Figure 2.6 : Simulation de l’impédance normalisée d’une bobine lorsque la conductivité d’un matériau évolue (fréquence d’excitation de 200 kHz)

Dans le cas de la figure 2.6, à la fois la partie réelle et la partie imaginaire de la réponse du capteur sont modifiées lors d'une variation de σ . Une valeur de la partie réelle peut correspondre à plusieurs valeurs de conductivité. De plus, concernant la partie imaginaire, la variation de la réactance normalisée est faible aux extrémités de la courbe : la sensibilité par rapport à σ est alors réduite. Au vu de ces résultats, il a été décidé d'optimiser un capteur dans le but d'obtenir une réponse rectiligne dans ce même plan. Effectivement, sous réserve d'appliquer une rotation à cette réponse rectiligne, seule la partie réelle (ou imaginaire) de la réponse du capteur est affectée par σ . Du fait de l'évolution monotone de l'un des deux paramètres, l'évaluation de σ est simplifiée.

Compte tenu de ces éléments, on souhaite que le capteur CF optimisé permette d'évaluer une conductivité σ comprise entre 0,6 MS/m et 60 MS/m. Cette large gamme de conductivité correspond à la quasi-totalité des matériaux métalliques purement conducteurs couramment employés dans l'industrie ; c'est-à-dire des alliages de titane faiblement conducteurs au cuivre fortement conducteur. Les appareils CF commerciaux permettant de mesurer σ proposent, pour la plupart, des sondes travaillant de 20 kHz à 1000 kHz [Fischer_2009] [ETher_2013]. Dans la suite de ce sous-chapitre, la fréquence d'excitation pour effectuer l'optimisation du capteur par simulation est définie à 200 kHz, valeur située globalement au centre de la plage de fréquences.

2.2.2 Optimisation d'un motif sensible à la conductivité

Les bobines, dont le fil conducteur est enroulé autour d'un noyau, sont majoritairement utilisées. Un grand nombre de spires est possible, néanmoins ces bobines sont rigides et volumineuses. Dans notre étude, afin d'obtenir un capteur flexible, les bobines de cuivre sont gravées sur film Kapton. L'épaisseur des bobines est typiquement de quelques dizaines de micromètres. En raison de la flexibilité du film Kapton (film de polyimide), les pièces de forme géométrique complexe peuvent être inspectées [Marchand_2012].

2.2.2.1 Étude de l'effet d'entrefer

La densité du flux magnétique créée dans l'échantillon diminue lorsque la distance entre le capteur et l'échantillon à inspecter, autrement dit l'entrefer, augmente [Hellier_2001]. Il en résulte que l'entrefer a un impact significatif sur l'amplitude du signal du capteur puisque l'intensité des CF dépend directement de l'entrefer.

Il a été observé que la configuration émission/réception séparées, ou capteur à fonctions séparées, a l'avantage de réduire l'effet de l'entrefer par rapport à un capteur double fonction [Obrutsky_1997]. Dans le cas d'un capteur à double fonction, il est possible de compenser l'effet d'entrefer mais la méthode est difficile à mettre en œuvre et conduit à une perte de précision [Snyder_1995] [Dziczkowski_2013]. Il est nécessaire de connaître parfaitement les paramètres géométriques et électriques de la bobine afin d'assurer une bonne cohérence entre les données expérimentales et simulées [Fan_2015].

Dans le but d'illustrer l'effet de l'entrefer, les simulations d'un capteur à double fonction et d'un capteur à fonctions séparées sont réalisées. Deux exemples de capteurs à fonctions séparées sont proposés. Le tableau 2.3 montre les paramètres géométriques des bobines ainsi que les caractéristiques physiques du matériau.

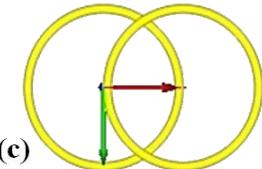
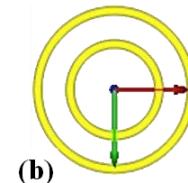
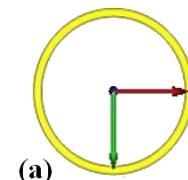
Tableau 2.3 : Caractéristiques géométriques et physiques des capteurs et du matériau

		Capteur double fonction (a)	
Matériau		Diamètre interne	9 mm
Épaisseur		Diamètre externe	10 mm
σ		Hauteur	10 μm
		Nombre de spires	10
		Entrefer	[10 ; 110] μm

Capteur coaxial à fonctions séparées (b)	
Émetteur	Récepteur
Diamètre interne	9 mm
Diamètre externe	10 mm
Hauteur	10 μm
Nombre de spires	10
Entrefer	[10 ; 110] μm
Distance entre les axes des bobines	
0 mm	

Capteur à fonctions séparées (c)	
Émetteur	Récepteur
Diamètre interne	9 mm
Diamètre externe	10 mm
Hauteur	10 μm
Nombre de spires	10
Entrefer	[10 ; 110] μm
Distance entre les axes des bobines	
6 mm	

Capteur double fonction (a)	
Diamètre interne	9 mm
Diamètre externe	10 mm
Hauteur	10 μm
Nombre de spires	10
Entrefer	[10 ; 110] μm



Lorsqu'une comparaison entre un capteur à double fonction et un capteur à fonctions séparées est réalisée (cas de la figure 2.7), la réponse normalisée du capteur est notée S_{NORM} . Les quantités Z_{NORM} et U_{NORM} peuvent effectivement être comparés dans un même plan complexe (cf. chapitre 1, sous-section 1.2.6.2). La figure 2.7 montre la simulation de la réponse des capteurs lorsque σ évolue de 0,6 MS/m à 60 MS/m avec un entrefer minimal de 10 μm et avec un ajout d'entrefer supplémentaire de 0,1 mm. Les réponses des capteurs pour l'entrefer de 10 μm sont représentées par les courbes en trait plein. L'effet de l'ajout d'un entrefer de 0,1 mm est quant à lui représenté par les courbes en pointillé pour chaque point de calcul. La fréquence d'excitation des capteurs est de 200 kHz.

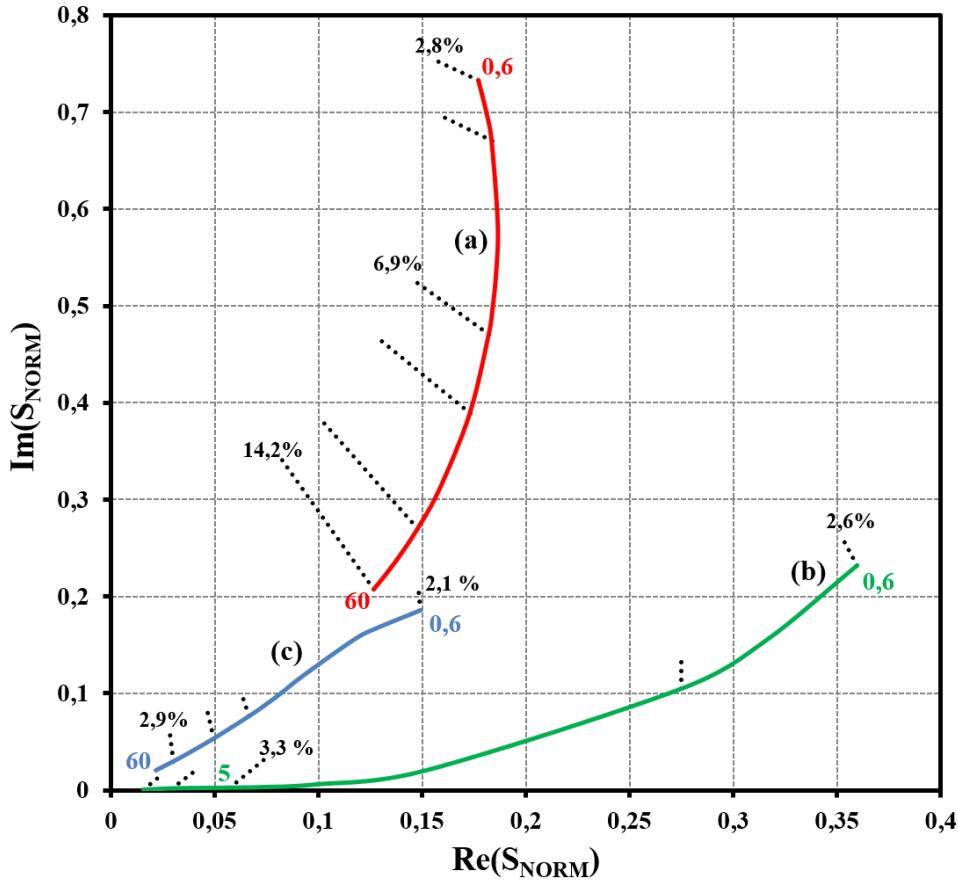


Figure 2.7 : Réponse des capteurs lorsque σ évolue (trait plein) et effet de l'entrefer (pointillé) dans le cas d'un capteur double fonction (a) et de capteurs à fonctions séparées (b) et (c) (fréquence d'excitation de 200 kHz)

La mesure de l'effet de l'entrefer [%] est réalisée en mesurant l'écart de réponse du capteur, pour une conductivité donnée, avec et sans l'ajout supplémentaire d'un entrefer de 0,1 mm. Cette valeur est ensuite comparée à la distance entre les points (0, 0) et (1, 0) du plan complexe pour obtenir un résultat en pourcentage. Pour (b) et (c), l'effet d'entrefer maximum est d'environ 3,3 % alors que dans le cas de (a) il est de 14,2 %. Lors de l'utilisation d'un capteur à fonctions séparées, l'effet d'entrefer peut être négligeable par rapport à un capteur à double fonction. C'est la raison pour laquelle un capteur à fonctions séparées a été étudié.

2.2.2.2 Détermination de la configuration des bobines

Le capteur employé est de type fonctions séparées. La détermination de la configuration des bobines est réalisée grâce à la plateforme de simulation CIVA. De nombreuses configurations ont été évaluées avant d'obtenir le motif adéquat.

Pour parvenir au capteur désiré, les paramètres suivants sont déterminés en fonction de la rectitude de la courbe de mesure CF dans le plan normalisé : les diamètres internes \varnothing_{INT} et externes \varnothing_{EXT} des

bobines ainsi que la distance entre les deux bobines d . Les entrefers e_1 et e_2 , entre les bobines et le matériau à inspecter, dépendent de l'épaisseur du film Kapton utilisé pour la réalisation du capteur. La figure 2.8 représente le schéma de la configuration obtenue [Delabre_2014] et le tableau 2.4 les paramètres géométriques du capteur composé de deux bobines identiques.

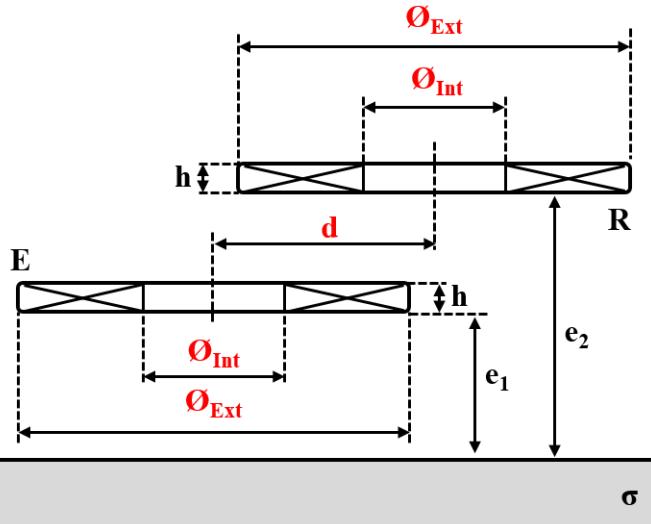


Figure 2.8 : Description des paramètres déterminés (en rouge) du capteur à fonctions séparées

Tableau 2.4 : Caractéristiques du capteur

Bobines	
Diamètre interne \varnothing_{INT}	9 mm
Diamètre externe \varnothing_{EXT}	10 mm
Hauteur h	35 μ m
Nombre de spires	4
Distance d	5 mm
Entrefer e_1	0,01 mm
Entrefer e_2	0,06 mm

Pour comparer les réponses obtenues pour les différentes configurations de capteurs, une mesure de la rectitude de la courbe dans le plan complexe est effectuée. Cette mesure consiste à calculer la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (ou REQM) entre la courbe obtenue et sa régression linéaire, au sens des moindres carrés, lorsque σ évolue. L'erreur quadratique moyenne est définie par :

$$\text{REQM} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i)^2 \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

Où E_i est la distance entre la courbe obtenue et sa régression linéaire pour chacun des points (i.e. chaque valeur de σ). Par exemple, REQM est égale à 0 lorsque la réponse du capteur est parfaitement rectiligne.

Afin d'illustrer la réponse de la sonde optimisée, une comparaison entre différentes conceptions de capteurs est effectuée. La figure 2.9 illustre ces configurations et le motif (d) représente le capteur qui a été optimisé. Les caractéristiques géométriques des configurations (a), (b) et (c) sont présentées dans le tableau 2.5. La configuration (a) est comparable, par sa conception, à un capteur à double fonction car les deux bobines sont superposées et proches.

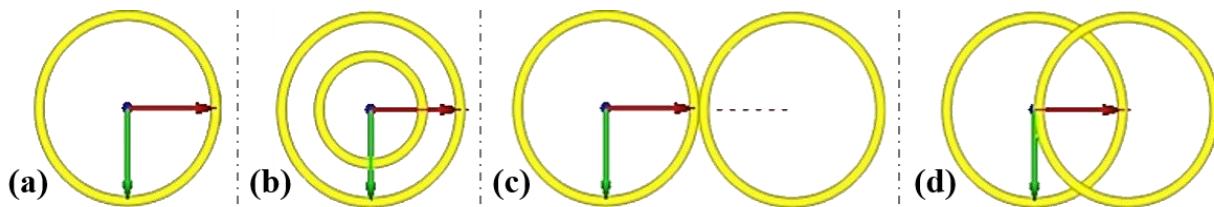


Figure 2.9 : Description des diverses configurations de bobines

Tableau 2.5 : Caractéristiques géométriques et physiques des capteurs (a), (b) et (c)

Capteur coaxial à fonctions séparées (a)			
Émetteur		Récepteur	
Diamètre interne	9 mm	Diamètre interne	9 mm
Diamètre externe	10 mm	Diamètre externe	10 mm
Hauteur	35 µm	Hauteur	35 µm
Nombre de spires	10	Nombre de spires	10
Entrefer	[10 ; 110] µm	Entrefer	[60 ; 160] µm
Distance entre les axes des bobines			0 mm
Capteur coaxial à fonctions séparées (b)			
Émetteur		Récepteur	
Diamètre interne	9 mm	Diamètre interne	4 mm
Diamètre externe	10 mm	Diamètre externe	5 mm
Hauteur	35 µm	Hauteur	35 µm
Nombre de spires	10	Nombre de spires	10
Entrefer	[10 ; 110] µm	Entrefer	[60 ; 160] µm
Distance entre les axes des bobines			0 mm
Capteur à fonctions séparées (c)			
Émetteur		Récepteur	
Diamètre interne	9 mm	Diamètre interne	9 mm
Diamètre externe	10 mm	Diamètre externe	10 mm
Hauteur	35 µm	Hauteur	35 µm
Nombre de spires	10	Nombre de spires	10
Entrefer	[10 ; 110] µm	Entrefer	[60 ; 160] µm
Distance entre les axes des bobines			10 mm

Les réponses obtenues par simulation pour les configurations (a), (b), (c) et (d) sont représentées par la figure 2.10. La simulation des réponses est réalisée à 200 kHz avec σ évoluant entre 0,6 MS/m et 60 MS/m. L’optimisation du capteur a été effectuée à une fréquence d’excitation de 200 kHz mais une étude du comportement du capteur en fonction de la fréquence d’excitation, réalisée par simulation via la plateforme CIVA, est présentée dans la sous-section 2.2.2.4.

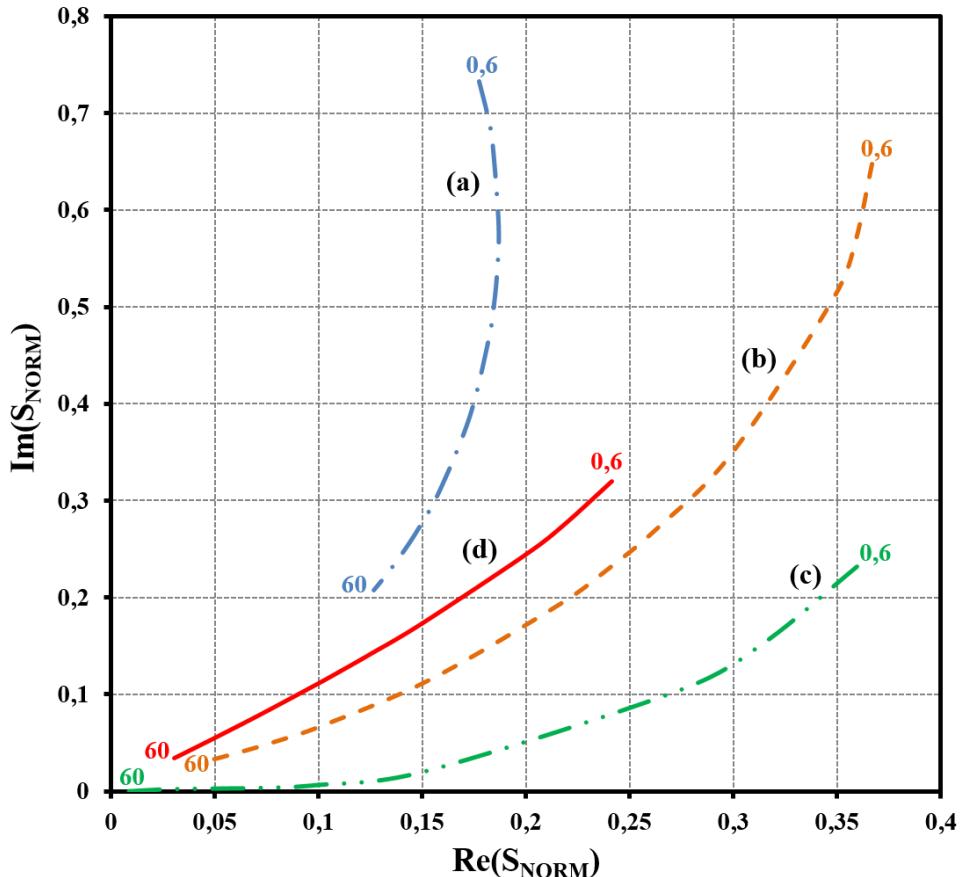


Figure 2.10 : Comparaison des réponses obtenues pour quatre configurations de capteurs (fréquence d’excitation de 200 kHz)

Graphiquement, la configuration (d) du capteur optimisé se distingue des autres configurations par sa courbe quasi rectiligne. De plus, les REQM évaluées pour les cas (a), (b), (c) et (d) sont respectivement de 0,1, 0,18, 0,05 et 0,03, confirmant ainsi le choix du motif (d) pour réaliser le capteur CF.

2.2.2.3 Réalisation du motif sur film Kapton

Les caractéristiques du motif données dans le tableau 2.4 correspondent aux valeurs obtenues après réalisation du motif sur film Kapton [Delabre_2014]. La figure 2.11(a) représente le capteur CF et la figure 2.11(b) est un zoom sur le motif optimisé qui est gravé sur film Kapton.

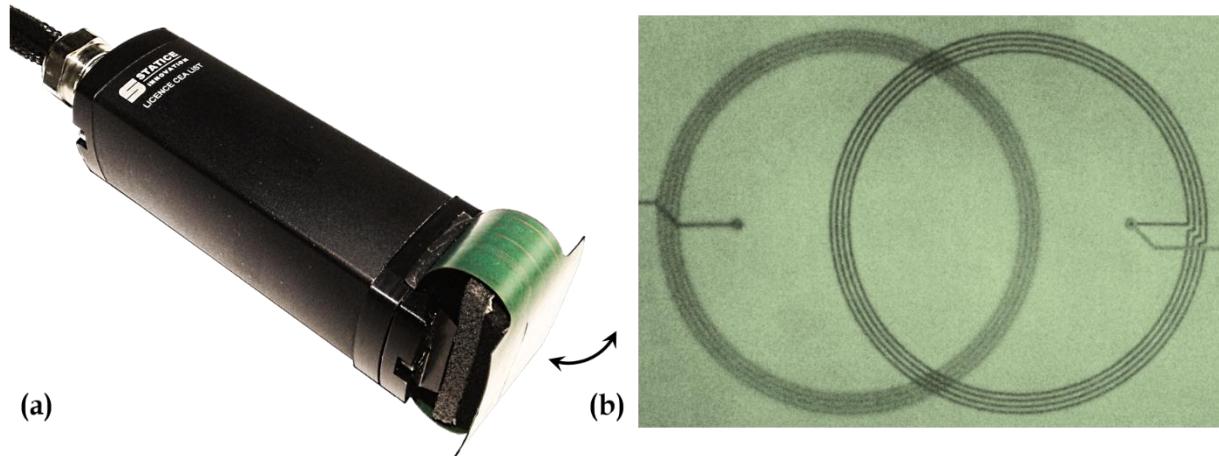


Figure 2.11 : (a) Capteur CF. (b) Zoom sur le motif optimisé pour l'évaluation de σ

2.2.2.4 Simulation du comportement en fréquence du capteur

Dans le but d'étudier la plage de fonctionnement du capteur, une comparaison entre la courbe représentant la variation de σ et sa régression linéaire est menée. Cette comparaison est exprimée par la REQM. La figure 2.12 montre les résultats obtenus à quatre fréquences d'excitation différentes : 100, 200, 600 et 1000 kHz. Les résultats simulés sont représentés par les courbes en trait plein et les régressions linéaires par les courbes en pointillé. Les REQM à 100, 200, 600 et 1000 kHz sont respectivement de 0,04, 0,026, 0,013 et 0,009.

La plage de fonctionnement du capteur, définie par simulation, est d'environ [100 ; 1000] kHz. À basse fréquence, la REQM est trop élevée et la sensibilité du capteur est trop faible. À plus haute fréquence, la fréquence de résonance des bobines peut être un facteur limitant et la diminution de l'épaisseur de peau δ peut entraîner une importante sensibilité du capteur CF à l'état de surface du matériau. Dans le cas du capteur optimisé, la fréquence de résonance des bobines est supérieure à 15 MHz (limite de la gamme de fréquences de l'analyseur d'impédance HP4194A). La plage de fonctionnement du capteur est en tout point compatible à une mesure de conductivité [Ahmad_2012].

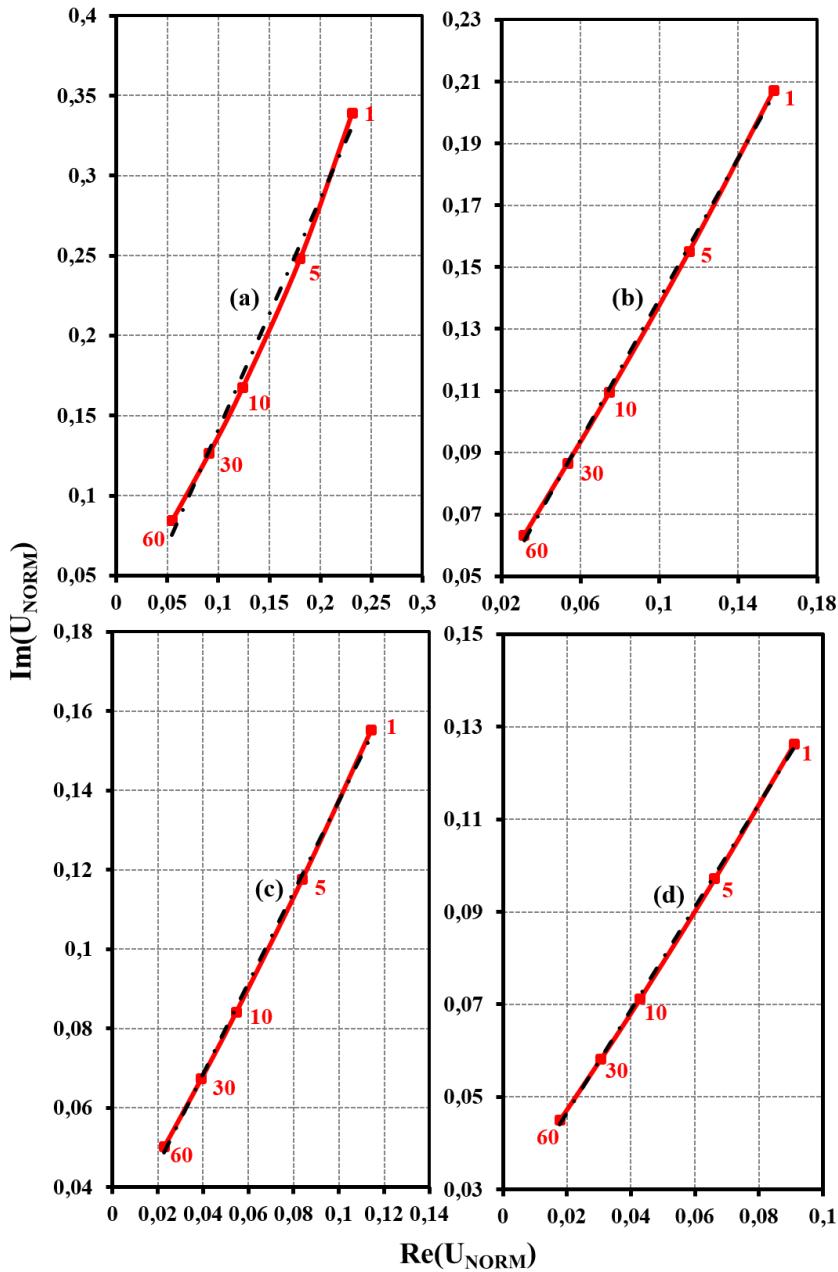


Figure 2.12 : Évolution de la réponse du capteur lorsque σ évolue à une fréquence de 100 (a), 200 (b), 600 (c) et 1000 kHz (d)

2.2.3 Résultats expérimentaux pour l'estimation de la conductivité

Le capteur est évalué d'abord sur cales étalons puis évalué sur des matériaux non magnétiques présentant des défauts surfaciques. Une fréquence d'excitation de 1 MHz est retenue afin d'obtenir un signal de forte amplitude en raison du faible nombre de spires des bobines d'émission et de réception. D'autre part, cette fréquence est tout à fait compatible avec les défauts inspectés, décrits dans la sous-section 2.2.3.2, en raison de la faible profondeur de pénétration effective δ . En effet, pour une conductivité de 10 MS/m, δ est d'environ 0,16 mm à 1 MHz.

2.2.3.1 Évaluation de la conductivité sur cales étalons

L'étalonnage du capteur nécessite des cales étalons, ou autrement dit des matériaux de référence. Ces échantillons, de forme cylindrique, ont un diamètre de 40 mm et une épaisseur de 15 mm. Les étalons purement conducteurs sont listés dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Étalons conducteurs utilisés

Matériaux	σ [MS/m]
a Titane LT31	0,61
b Inconel 600	0,97
c Manganin	2,45
d Maillechort	3,95
e Bronze	8,7
f Nordic Gold	9,67
g Messing	14,35
h Aluminium 2024/T3511	16,93
i Aluminium 7175/T7351	22,8
j AlMgSi F32	27,71
k Aluminium 99,5	34,04
l Cuivre	57,72
m Cuivre	58,8

La figure 2.13 illustre la bonne adéquation, à 1 MHz, entre les données expérimentales et les données simulées par CIVA lorsqu'une variation de σ est appliquée. Les mesures correspondent à la courbe en pointillé et les simulations à la courbe pleine. Le plan complexe normalisé est utilisé afin de représenter ces courbes. Lors de l'acquisition des mesures, la distance entre la sonde et le matériau doit être aussi faible que possible afin d'éviter un effet d'entrefer, même dans le cas d'une configuration à fonctions séparées. La réponse du capteur est conforme aux spécifications annoncées précédemment, à savoir l'obtention d'une courbe rectiligne dans le plan complexe normalisé. À 1 MHz, le capteur est plus sensible lorsque σ est inférieur à 10 MS/m (point (f) sur le graphe 2.13).

La figure 2.14 représente la courbe d'étalonnage du capteur optimisé obtenue avec un courant efficace injecté dans l'émetteur de 20 mA et normalisée par la tension obtenue pour l'échantillon de cuivre ($\sigma = 58,8$ MS/m) à 1 MHz. À travers ce graphique, il est possible d'évaluer σ d'un matériau inconnu purement conducteur à partir du module de la tension du récepteur à une intensité donnée ($U_{PIÈCE}$, cf. chapitre 1, sous-section 1.2.6.2). Une évaluation de σ est envisageable car le capteur est calibré. Ces résultats intéressants ont permis de poursuivre l'étude dans de nouveaux cas d'applications. La partie suivante est consacrée à l'évaluation de σ dans le cas de matériaux présentant des défauts surfaciques.

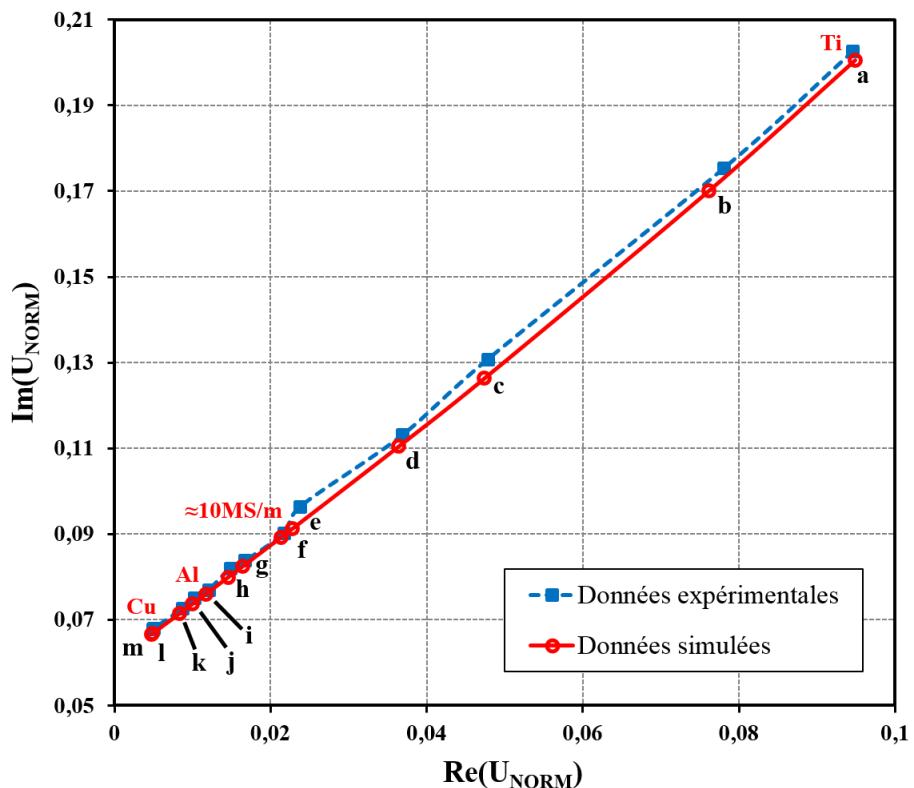


Figure 2.13 : Comparaison entre les données expérimentales et données simulées avec CIVA lorsque la conductivité électrique de l'échantillon évolue (fréquence d'excitation de 1 MHz)

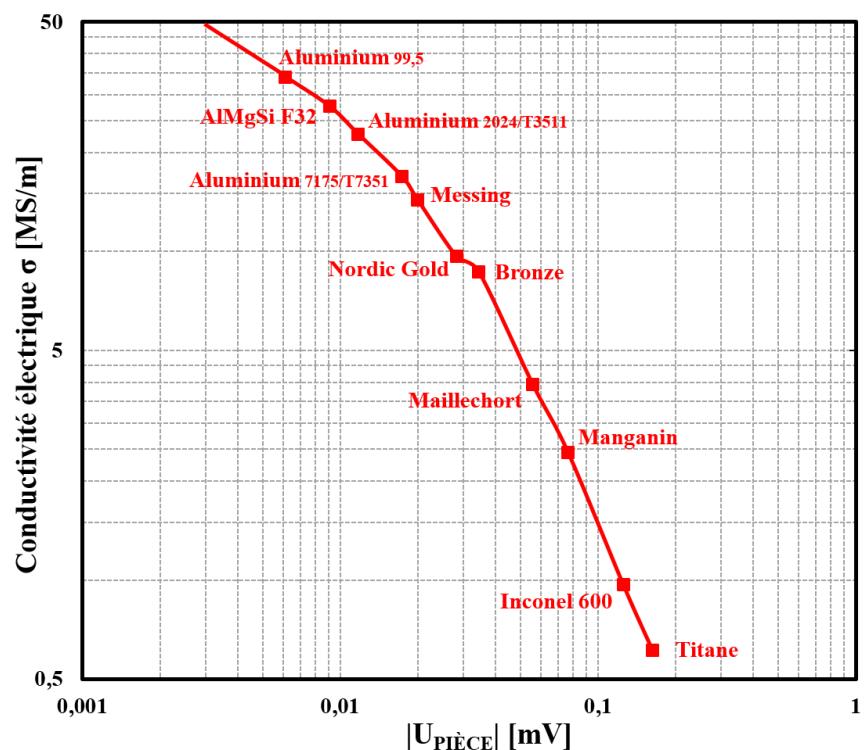


Figure 2.14 : Courbe d'étalonnage expérimentale du capteur à 20 mA efficace (fréquence d'excitation de 1 MHz)

2.2.3.2 Test du capteur optimisé en présence de défauts

La différenciation, illustrée schématiquement par la figure 2.15, d'une évolution de conductivité d'un matériau à une signature de défaut exige que la réponse du capteur en présence d'un défaut ne suive pas la même direction dans le plan complexe que la ligne droite représentant l'effet de σ . Par exemple, dans le cas d'une soudure inhomogène, lors de l'inspection de défauts on souhaite différencier la présence du défaut du changement de conductivité des matériaux composant cette soudure.

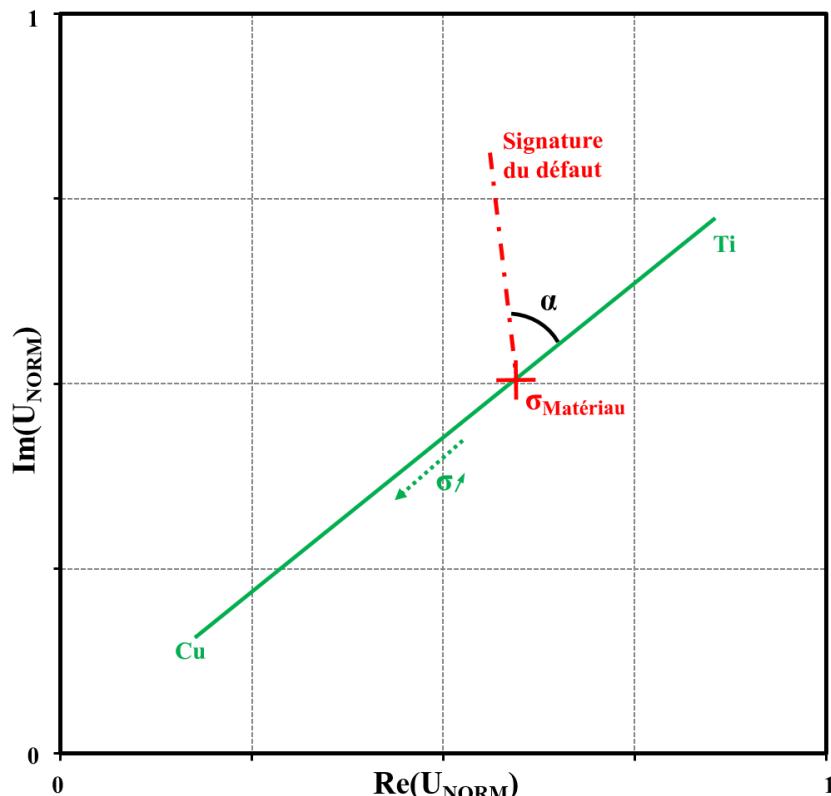


Figure 2.15 : Représentation schématique de la réponse du capteur en présence d'un défaut

Le segment vert représente la réponse du capteur lorsque σ évolue de 0,6 MS/m à 60 MS/m. La courbe en pointillé, quant à elle, représente la signature du défaut pour une valeur de σ correspondant à un matériau donné (croix rouge). Idéalement, il est souhaitable que l'angle α soit égal à 90° pour bien distinguer l'évolution de σ du matériau de la présence d'un défaut.

L'évaluation du capteur optimisé a été menée expérimentalement sur les trois matériaux conducteurs suivants, présentant des défauts de type entaille :

- Aluminium 2024T3 avec un défaut de $30 \times 0,05 \times 0,5$ mm³,
- Inox 304L avec un défaut de $20 \times 0,1 \times 0,5$ mm³,
- Titane TA6V avec un défaut de $30 \times 0,05 \times 0,5$ mm³.

Où les dimensions des défauts sont données comme longueur x largeur x profondeur.

Dans la figure 2.16, la variation de σ est représentée par la courbe verte en trait pointillé. Les courbes en trait plein montrent la réponse expérimentale à 1 MHz du capteur en présence de défauts pour les cas énoncés ci-dessus.

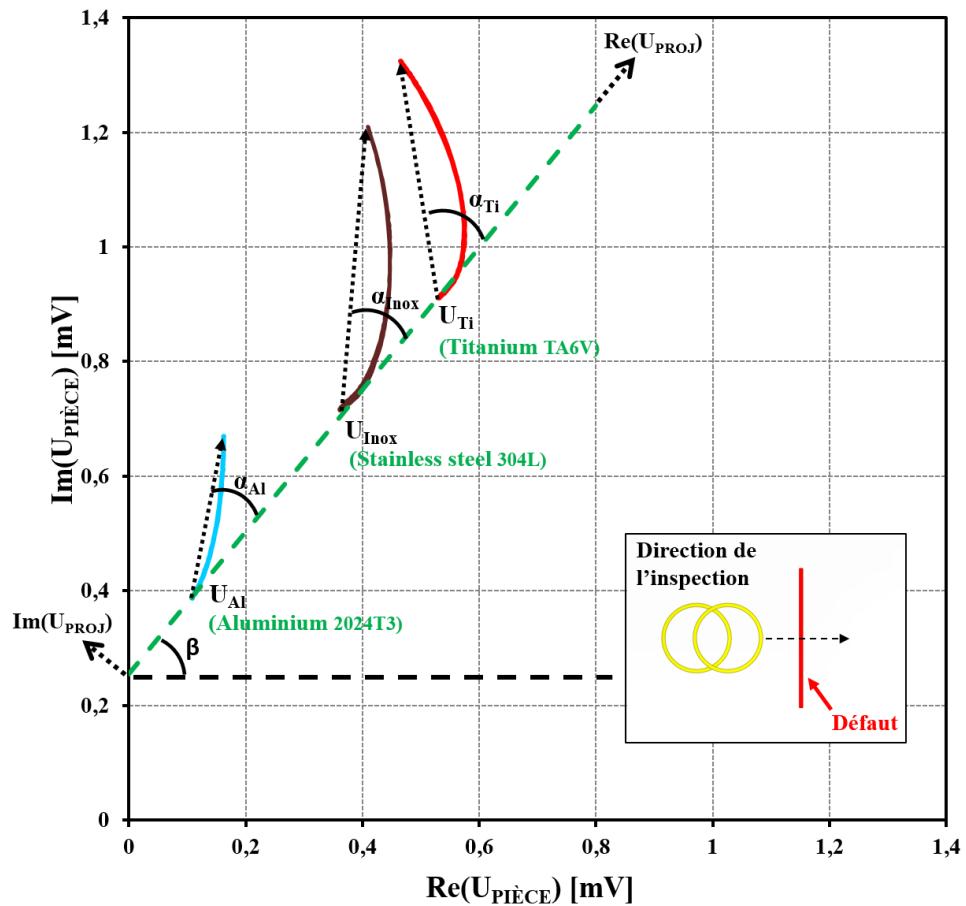


Figure 2.16 : Inspection de défauts surfaciques dans le cas de matériaux purement conducteurs (fréquence d'excitation de 1 MHz)

La conductivité de l'aluminium 2024T3, de l'inox 304L et du titane TA6V, aux points U_{Al} , U_{Inox} et U_{Ti} , a été expérimentalement évaluée à 16,2, 1,5, et 0,63 MS/m en utilisant le capteur CF et l'abaque (cf. figure 2.14). Les valeurs théoriques de ces matériaux sont respectivement de 16,9, 1,4 et 0,59 MS/m [Moosbrugger_2000] [Aubert_2010]. Les écarts de conductivité pour chaque matériau sont donc d'environ 4,1, 7,1 et 6,8 %. Les concordances entre les valeurs théoriques et expérimentales de σ sont correctes.

Il convient de souligner sur la figure 2.16 que les signatures des défauts ne sont pas confondues avec l'axe représentant l'évolution de σ . L'angle α , entre la signature du défaut et la courbe rectiligne, dépend de la conductivité du matériau. Dans l'exemple du titane, lorsque σ est faible, l'angle α_{Ti} est égal à 50° et, dans l'exemple de l'aluminium, l'angle α_{Al} est d'environ 30°.

Si la courbe représentant l'effet de l'évolution de σ est projetée de façon à devenir horizontale dans le plan complexe, alors la partie réelle du signal U_{PROJ} correspond essentiellement à l'effet de σ ainsi qu'à la signature du défaut. La partie imaginaire est, quant à elle, uniquement liée à la réponse du capteur en présence d'un défaut. La figure 2.17 montre la représentation de la partie réelle et imaginaire de la tension U_{PROJ} après une rotation β de -50° , dans le plan complexe à 1 MHz, avec pour centre de rotation, dans cet exemple, l'intersection de l'axe représentant l'effet de l'évolution de σ et l'axe des ordonnées. L'angle de rotation β est déterminé par :

$$\beta = \tan^{-1} \frac{|\text{Im}(U_{Ti} - U_{Al})|}{|\text{Re}(U_{Ti} - U_{Al})|} \sim -50^\circ \quad (2.5)$$

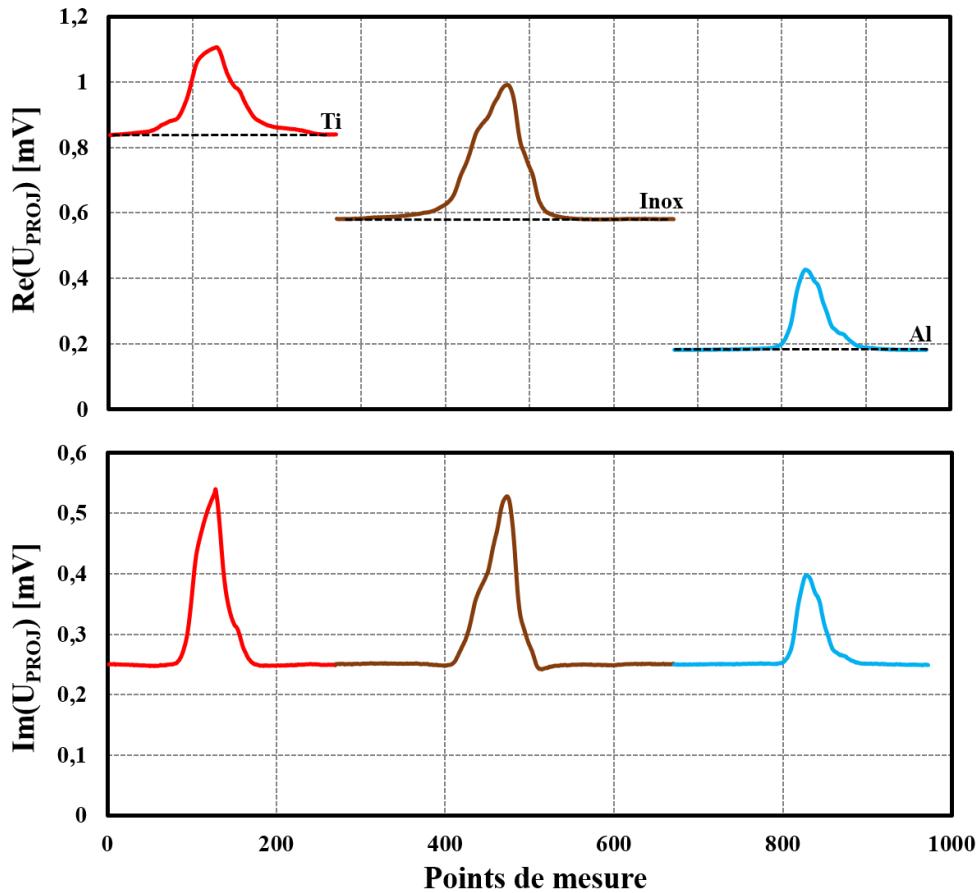


Figure 2.17: Représentation de la partie réelle et imaginaire du signal après modification de la phase (fréquence d'excitation de 1 MHz)

Du fait que les angles α_{Ti} , α_{Inox} et α_{Al} ne soient pas égaux à 90° , la signature des défauts est également visible sur les parties réelle et imaginaire de la réponse du capteur en figure 2.17. En revanche, la représentation de la partie réelle de U_{PROJ} peut permettre l'évaluation de σ en dehors d'une zone de défaut. Les traits en pointillé caractérisent respectivement la conductivité du titane TA6V, de l'inox 304L et de l'aluminium 2024T3. Par ailleurs, la partie imaginaire de U_{PROJ} ne contient que la réponse du capteur en présence d'un défaut. La variation de σ ne modifie pas la partie imaginaire de la réponse du capteur en l'absence de défauts.

2.2.4 Mise en œuvre du capteur sur matériaux magnétiques

Les mesures du capteur optimisé sont étendues aux matériaux magnétiques. Le capteur est évalué sur cales ferromagnétiques qui, dans un premier temps, ne comportent pas de défaut et qui, dans un second temps, présentent des défauts surfaciques. Enfin, une application est investiguée : la détection d'une zone brûlée.

2.2.4.1 Résultats expérimentaux sur différents matériaux ferromagnétiques

L'étude du capteur dans le cas de matériaux magnétiques se porte dans un premier temps vers l'évaluation d'échantillons en acier de structure ferritique, listés dans le tableau 2.7 et caractérisés par un taux de ferrite [%]. Ces échantillons, de forme cylindrique de diamètre 30 mm et d'épaisseur 3 mm, sont constitués de plusieurs couches d'un alliage de fer collées les unes aux autres. La perméabilité relative μ_{MES}/μ_0 ainsi que σ de ces échantillons sont indéterminées du fait de leur géométrie qui est incompatible avec la méthode du perméamètre et la méthode à quatre pointes.

Tableau 2.7 : Étalons ferritiques utilisés

Matériaux	Taux de ferrite [%]
a	0,45
b	0,51
c	2
d	3,1
e	10,2
f	10,4
g	31,2
h	31,5
i	33
j	82,2

La figure 2.18 représente les mesures à 1 MHz du capteur en présence de matériaux purement conducteurs (cf. figure 2.13) et d'acières ferritiques. La courbe bleue, représentant les aciers ferritiques, évolue de façon à former une extension à la courbe rouge illustrant l'effet de la variation de σ pour les matériaux purement conducteurs précédemment étudiés. La courbe en pointillé est la régression linéaire des mesures sur cales conductrices.

Le recouvrement des deux courbes s'explique par le fait que μ_{MES}/μ_0 des échantillons présentant un faible taux de ferrite est proche de 1. En effet, la perméabilité magnétique est liée au taux de ferrite des échantillons ; c'est-à-dire que μ_{MES}/μ_0 tend vers 1 lorsque le taux de ferrite tend vers 0 %.

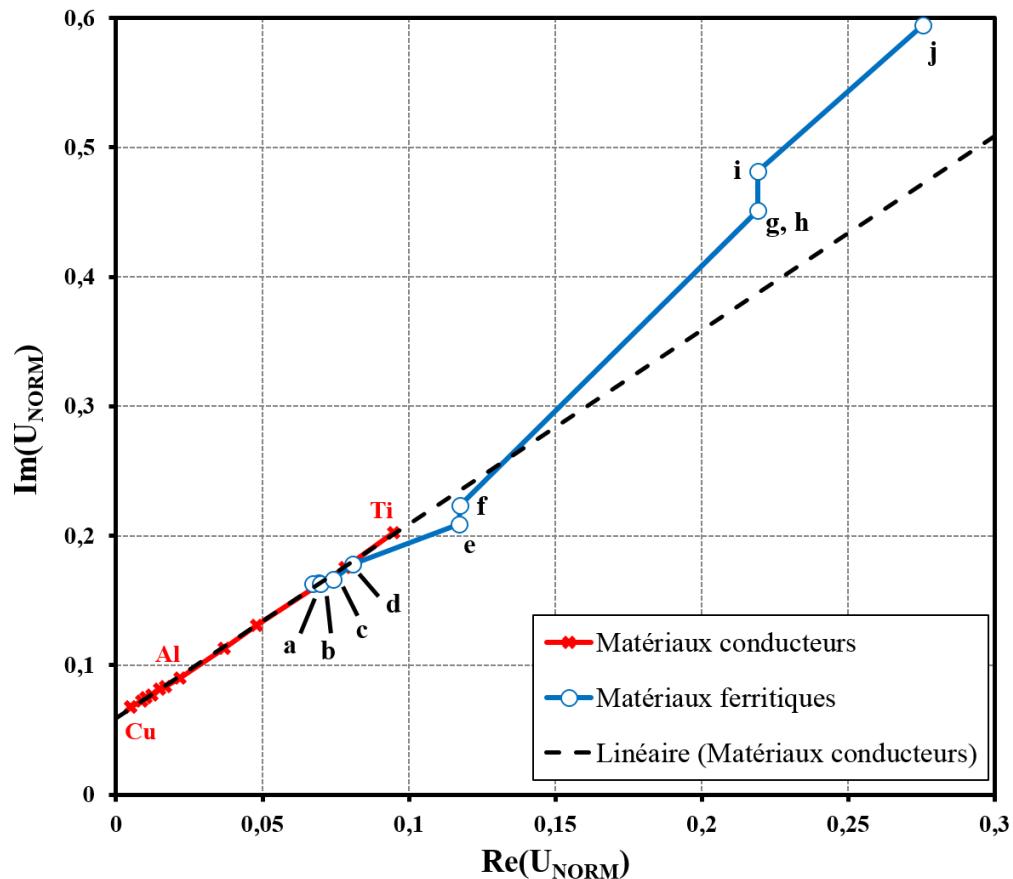


Figure 2.18 : Comparaison des mesures effectuées sur matériaux purement conducteurs et matériaux ferritiques (fréquence d'excitation de 1 MHz)

Dans un second temps, le capteur optimisé est testé sur matériaux ferromagnétiques dont les paramètres électromagnétiques, indiqués dans le tableau 2.1, ont été préalablement évalués par les méthodes conventionnelles (cf. sous-chapitre 2.1). Un résumé des valeurs estimées est rappelé dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Échantillons ferromagnétiques étudiés

Matériaux	σ [MS/m]	μ_{MES}/μ_0
Inox 15-5-PH	1,3	40
Acier 16NCD13	3,4	110
Acier 32CDV13	3,4	80
Acier 16MND5	4,2	90
Acier 0,35%C	4,8	80
Acier allié	2,3	30
Fer doux	8,9	1 000

La figure 2.19 représente les mesures à 1 MHz du capteur optimisé en présence de matériaux purement conducteurs et de matériaux ferromagnétiques. La réponse du capteur dans le cas des échantillons ferromagnétiques est définie par les croix bleues. La courbe en pointillé est la régression linéaire des points de mesure sur cales conductrices et on peut constater que les croix bleues forment, de façon identique à la figure 2.18, une extension de la courbe rouge illustrant la variation de la conductivité électrique.

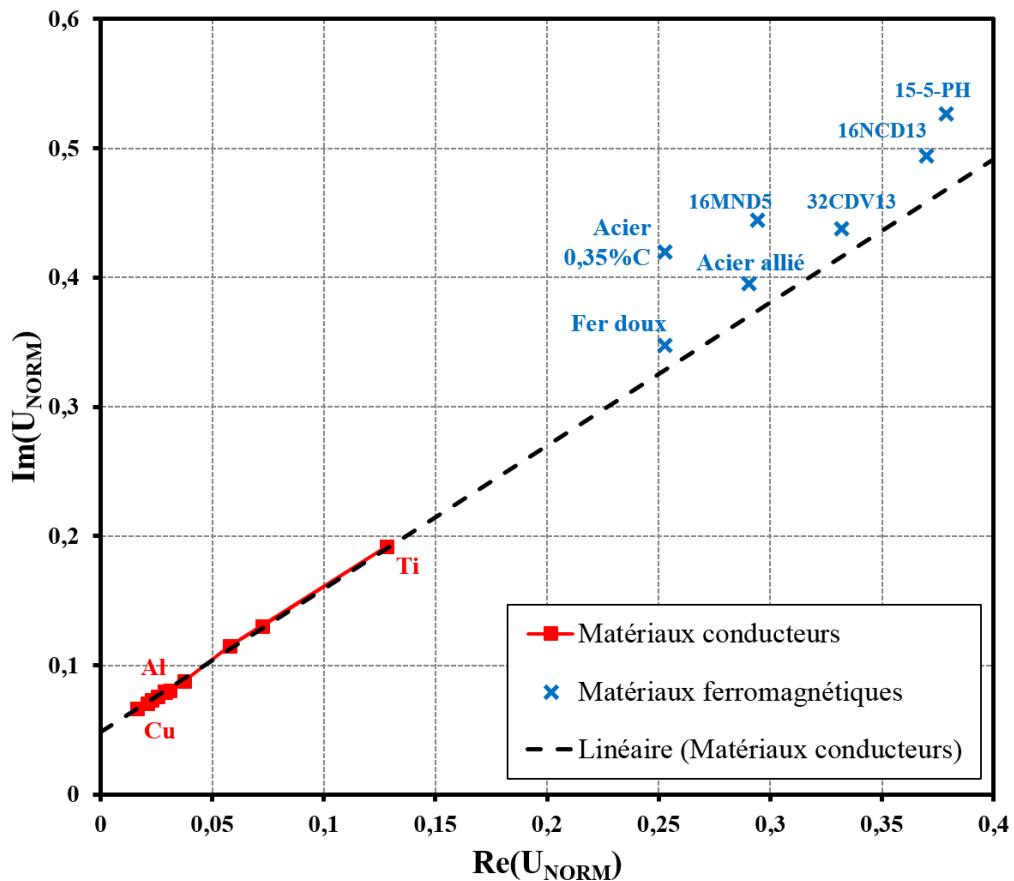


Figure 2.19 : Comparaison des mesures effectuées sur matériaux purement conducteurs et matériaux ferromagnétiques (fréquence d'excitation de 1 MHz)

La régression linéaire s'apparente, à une fréquence donnée, à la variation des paramètres électromagnétiques σ et μ des matériaux purement conducteurs et des matériaux magnétiques. À une telle fréquence, il s'avère que l'on ne peut donc pas différencier indépendamment les paramètres électromagnétiques car la variation du couple (σ, μ) n'ont pas d'effets séparés selon l'axe pointillé noir.

Comme dans le cas des matériaux purement conducteurs, le capteur optimisé est évalué sur des matériaux ferromagnétiques présentant des défauts de type entaille de longueur 30 mm, de largeur 0,05 mm et de profondeur 0,8 mm. Les échantillons ferromagnétiques étudiés sont les suivants : l'acier 32CDV13, l'acier 16NCD13 et l'inox 15-5-PH. Leurs paramètres électromagnétiques sont donnés dans le tableau 2.8.

Dans la figure 2.20, la variation du couple (σ, μ) est représentée par la courbe verte en pointillé. Les autres courbes représentent la réponse à 1 MHz du capteur en présence de défauts dans le cas de matériaux purement conducteurs (cf. figure 2.16) et de matériaux ferromagnétiques.

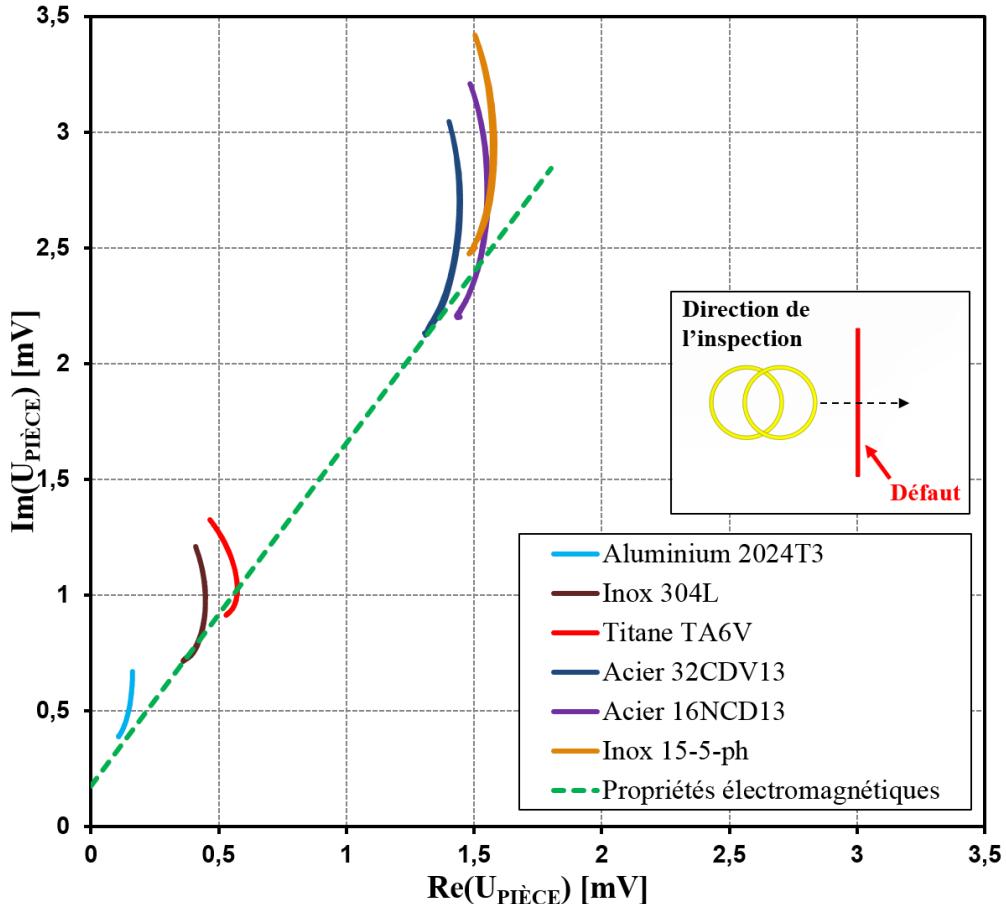


Figure 2.20 : Inspection de défauts surfaciques dans le cas de matériaux purement conducteurs et de matériaux ferromagnétiques (fréquence d'excitation de 1 MHz)

On constate que l'angle α , entre les signatures du défaut et la courbe verte, est pour les trois matériaux ferromagnétiques d'environ 30° et donc semblable à l'angle α_{Al} de l'aluminium. Afin d'illustrer le capteur optimisé dans un cas concret, une application est proposée : la détection d'une zone brûlée à la surface d'un matériau.

2.2.4.2 Application à la détection d'une zone brûlée

Les pièces inspectées ont été élaborées et étudiées par le CEntre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) dans le cadre d'un projet Magnus financé par le programme Carnot – Fraunhofer (PICF) de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Le CETIM a exprimé l'intérêt d'évaluer la détection de brûlures par la méthode CF car la mise en œuvre d'un capteur CF est relativement simple. De plus, la flexibilité des capteurs CF gravés sur film Kapton présentent un avantage certain lors de la détection d'une brûlure dans le cas de pièces complexes, par exemple dans le cas d'un engrenage [Zhang_2014a].

Les échantillons mis à disposition présentent des brûlures réalisées par rectification de la pièce à la meule et sont classés selon cinq niveaux de sévérité : sans brûlure (a), brûlure légère (b), moyenne (c), forte (d) et très forte (e). Ces états de sévérités décrivent un excès de chaleur entre la meule et le matériau rectifié. Ces brûlures simulent de mauvaises conditions d'usinage comme par exemple un manque de lubrification ou bien une passe trop forte. Le degré de gravité de la brûlure augmente généralement avec la température atteinte [Zhang_2014b] :

- à une faible température (< 200 °C) correspond une faible brûlure ;
- à une température comprise entre 200 et 720 °C correspond une brûlure de « revenu » (échantillons (b), (c) et (d));
- à une température plus élevée correspond une brûlure de « retrempe » (échantillon (e)).

Cinq échantillons d'acier ferromagnétique 18NiCr 5-4, de dimensions 100 x 100 x 20 mm présentent une zone rectifiée par meulage au milieu de chaque face de dimensions 100 x 40 x 0,1 mm. L'inspection de zones brûlées a donc été effectuée avec le capteur précédemment optimisé, gravé sur film Kapton (cf. figure 2.11). La figure 2.21 montre le capteur en position sur la zone à inspecter de l'échantillon en acier 18NiCr 5-4.

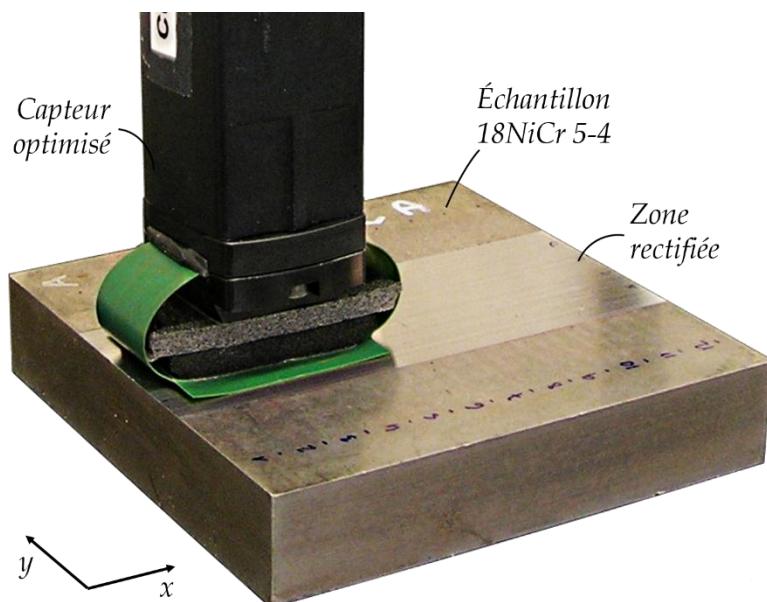


Figure 2.21 : Capteur en présence d'un échantillon d'acier 18NiCr 5-4

Pour cartographier les échantillons avec le capteur CF, un banc motorisé a été utilisé. Le capteur se déplace selon l'axe x sur une distance de 80 mm, avec un pas de 0,1 mm, et selon l'axe y sur une distance de 20 mm, avec un incrément de 0,5 mm. La vitesse de déplacement du capteur est de 20 mm/s et sa fréquence d'excitation est de 1 MHz. Les cartographies obtenues, pour chacun des échantillons, sont montrées par la figure 2.22. L'amplitude, ou module, de la tension aux bornes du récepteur est représentée. Les maquettes présentant différents degrés de brûlure sont inspectées : sans brûlure (a), brûlure légère (b), moyenne (c), forte (d) et très forte (e). Pour comparer les échantillons entre eux, une coupe horizontale, centrée sur la région inspectée, est effectuée. La

coupe horizontale est représentée par l'axe noir en pointillé (cf. figure 2.22). Les figures 2.23 et 2.24 représentent respectivement la partie réelle et imaginaire du signal $U_{PIÈCE}$ en sortie du capteur et le signal $U_{PIÈCE}$ dans un plan complexe selon l'axe noir. Les ondulations que l'on constate en figure 2.23 sont probablement dues à une inhomogénéité de la température au moment de la rectification des pièces par meulage.

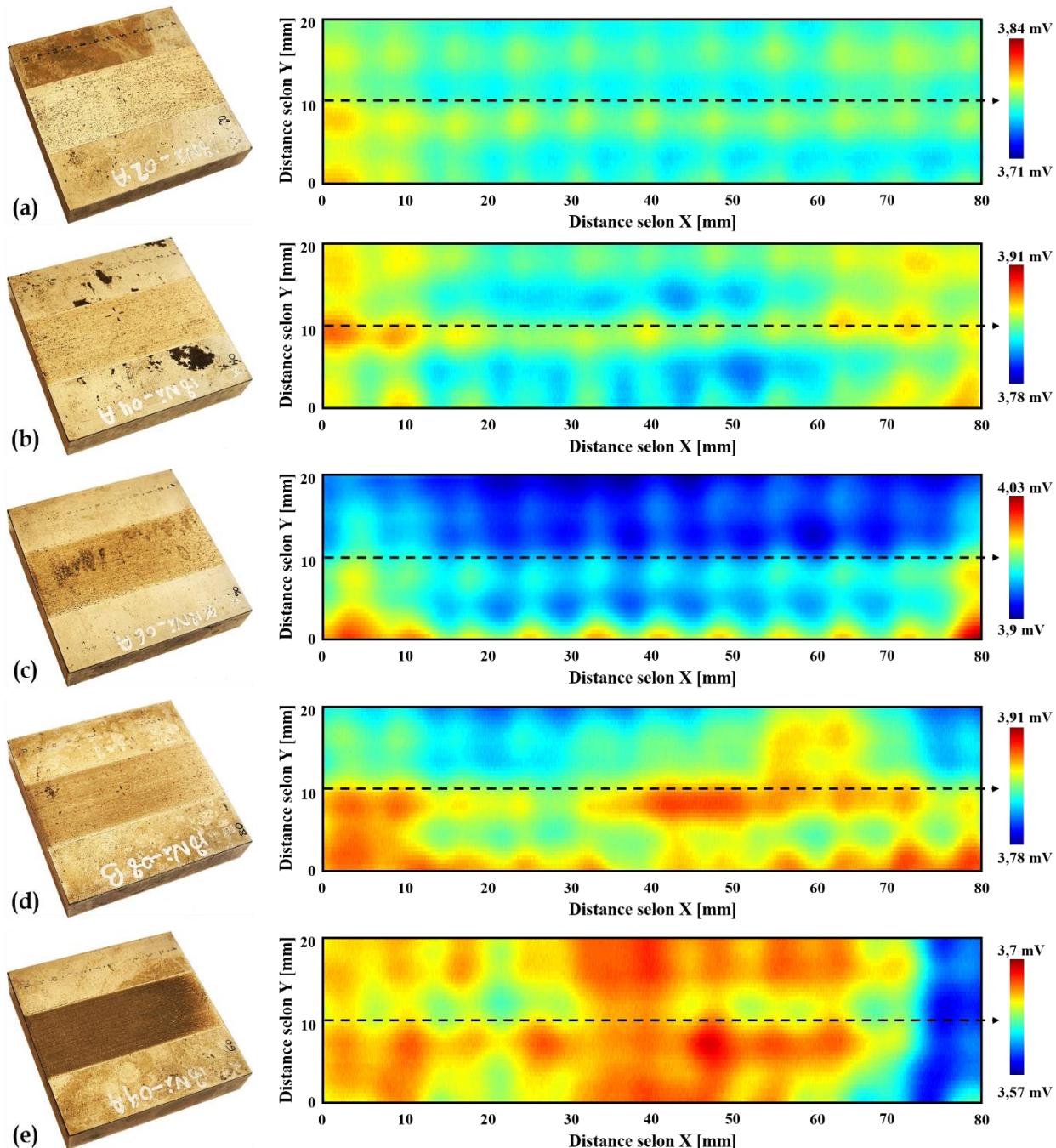


Figure 2.22 : Amplitude des cartographies obtenues à 1 MHz pour les échantillons en 18NiCr 5-4 présentant une absence de brûlure (a), brûlure légère (b), brûlure moyenne (c), brûlure forte (d) et brûlure très forte (e)

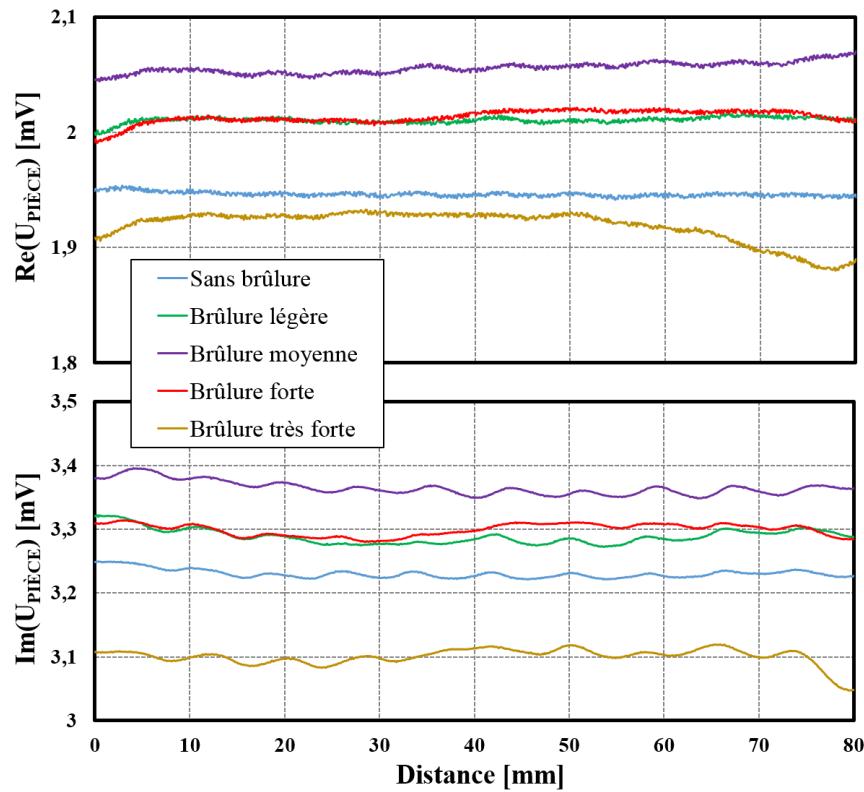


Figure 2.23 : Parties réelle et imaginaire des coupes horizontales à 1 MHz

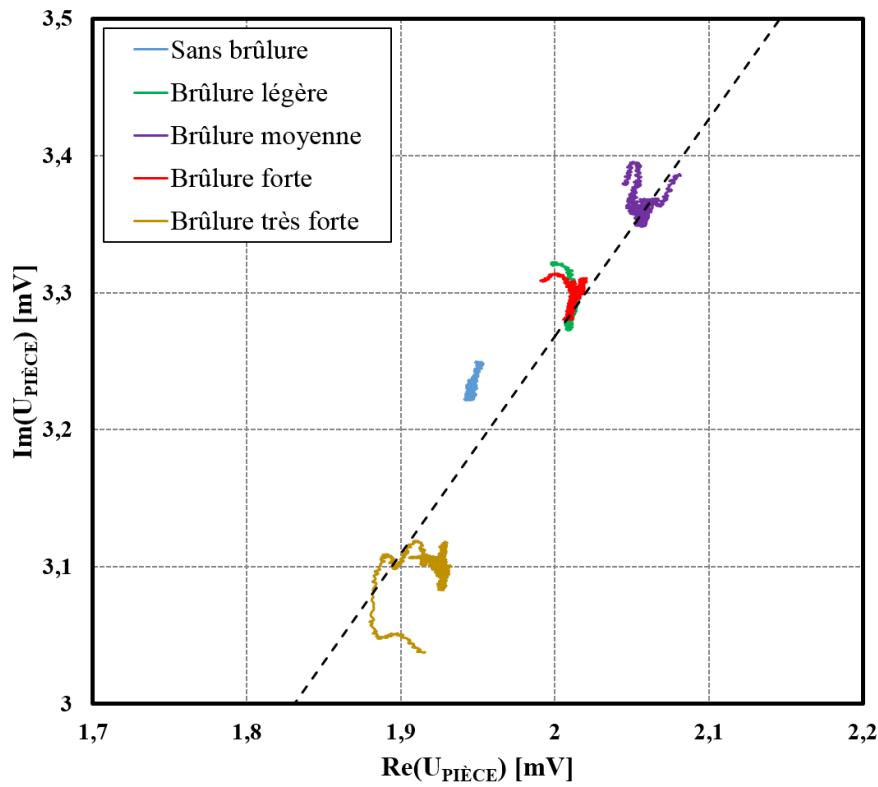


Figure 2.24 : Représentation dans le plan complexe des coupes horizontales à 1 MHz

Lorsque l'on compare les figure 2.23 et 2.24, on remarque que les parties réelle et imaginaire n'apportent pas d'informations complémentaires par rapport au module. On constate sur la figure 2.24 que les points se situent aux abords d'une seule et même droite comme c'est le cas lors de l'évaluation de σ (cf. section 2.2.2). En revanche, l'amplitude du signal n'est pas monotone selon la droite en pointillé, lorsque le degré de brûlure augmente.

Des mesures de dureté HV5 ont été réalisées par le CETIM. La figure 2.25 compare les mesures CF selon les duretés HV5 évaluées. Pour chaque état de brûlure, le point représente la valeur moyenne de la dureté HV5, les segments horizontaux représentent la dispersion (différence entre les valeurs maximales et minimales) des mesures de dureté réalisées à différents endroits sur la zone rectifiée et les segments verticaux celles des mesures CF suivant l'axe noir en pointillé (cf. figure 2.22).

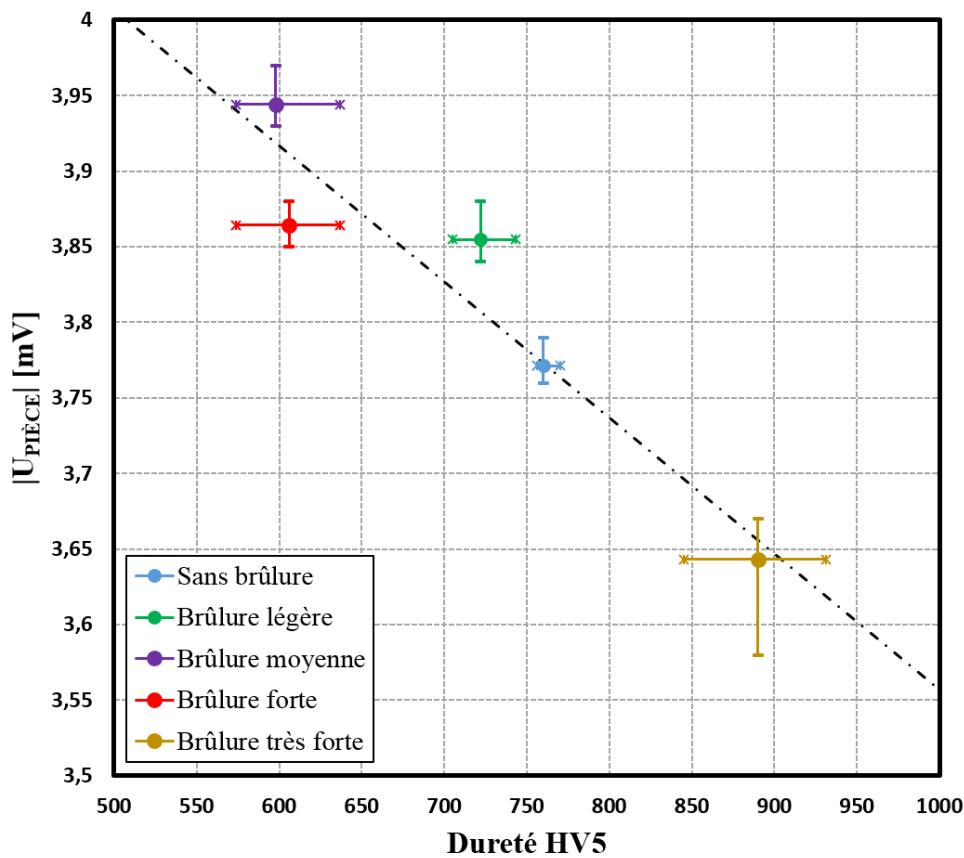


Figure 2.25 : Comparaison entre mesures CF et mesures de dureté HV5

Pour un échantillon donné, la brûlure n'est pas homogène sur l'ensemble de la zone inspectée au regard de la dispersion des mesures sauf dans le cas de la pièce sans brûlure. On remarque une bonne corrélation pour les trois premiers échantillons (sans brûlure, brûlure légère et moyenne) entre les mesures CF et les duretés HV5 ce qui laisse entrevoir une possibilité d'un contrôle CF pour l'inspection de ce type de pièce. Le positionnement de l'échantillon très fortement brûlé s'explique par la nature dite de retrempe de la brûlure qui présente une dureté HV5 plus importante. La position intermédiaire de l'échantillon fortement brûlé peut se traduire soit par un début de retrempe, soit par une variation particulière d'un des paramètres σ ou μ du matériau à partir d'un certain degré de brûlure.

2.3 ÉVOLUTION DU CAPTEUR CF POUR ÉVALUER LA CONDUCTIVITÉ ET LA PERMÉABILITÉ D'UN MATERIAU FERROMAGNÉTIQUE

2.3.1 Introduction

Ce sous-chapitre se consacre à la problématique suivante : différenciation des paramètres électromagnétiques σ et μ lors d'une mesure CF. C'est effectivement un problème compliqué car, comme le montre la figure 2.19, les paramètres σ et μ peuvent influer de manière identique sur la mesure CF.

L'évaluation individuelle de σ et μ des matériaux magnétiques a tout d'abord été envisagée aux échantillons de type barreau où la bobine est placée autour de l'échantillon [Feickert_1996] [Ma_2006] [Yin_2012] (cf. « capteurs encerclant », chapitre 1, section 1.2.7). Ces méthodes sont limitées par la forme géométrique des échantillons que l'on souhaite étudier.

De récentes études sont consacrées à l'évaluation de σ dans le cas de matériaux plans ferromagnétiques par l'intermédiaire de CF pulsés lorsque μ est connue [Chen_2015]. Si l'on souhaite évaluer σ et μ , il est nécessaire de séparer l'influence de ces deux paramètres dans une mesure CF [Adewale_2013]. En régime pulsé, la perméabilité magnétique est calculée au moment où le champ B atteint son point maximal et s'apparente à la perméabilité magnétique relative μ_R [Li_2015] [Desjardins_2016]. La mesure est effectuée avec un important champ magnétique dans la zone de non linéarité du matériau. Contrairement aux CF pulsés, la perméabilité magnétique recherchée lors de l'induction des CF en régime harmonique correspond à la perméabilité magnétique μ_{MES} .

En parallèle, l'évolution des modèles a permis d'étudier la réponse des capteurs CF à double fonction en présence de matériaux purement conducteurs puis en présence de matériaux ferromagnétiques plans [Dodd_1968] [Ditchburn_2003] [Gilles-Pascaud_2006]. La modélisation des capteurs CF à fonctions séparées, dans le cas des matériaux conducteurs et magnétiques, est apparue plus récemment [Chew_1990] [Burke_2008] [Theodoulidis_2008].

Dans ce sous-chapitre, un capteur à fonctions séparées est investigué. Afin d'obtenir un capteur adéquat, une étude fréquentielle par simulation du précédent capteur (cf. figure 2.12) est menée dans le cas des matériaux non magnétiques et magnétiques.

2.3.2 Influence de la fréquence sur la mesure courants de Foucault

2.3.2.1 Cas des matériaux non magnétiques

Une étude fréquentielle par simulation du capteur optimisé a été réalisée en partie dans la sous-section 2.2.2.4 : à une fréquence comprise entre 100 kHz et 1 MHz, la réponse du capteur est sensiblement rectiligne. L'objet de ce chapitre est d'évaluer la réponse du capteur à plus basses fréquences. La figure 2.26 montre la simulation réalisée par CIVA de la réponse du capteur, en rouge, lorsque σ varie du titane Ti au cuivre Cu (0,6 MS/m à 60 MS/m) à une fréquence d'excitation de 10 Hz, 10 kHz et 1 MHz. La courbe noire en pointillé représente le comportement du capteur lorsque la fréquence d'excitation diminue. Par exemple, à une fréquence de l'ordre de 10 kHz, la réponse du capteur n'est plus rectiligne. Si l'on souhaite conserver l'effet rectiligne de la réponse du capteur, le choix de la fréquence d'excitation est important. Par contre, à basses fréquences, la sensibilité du capteur par rapport à σ est réduite.

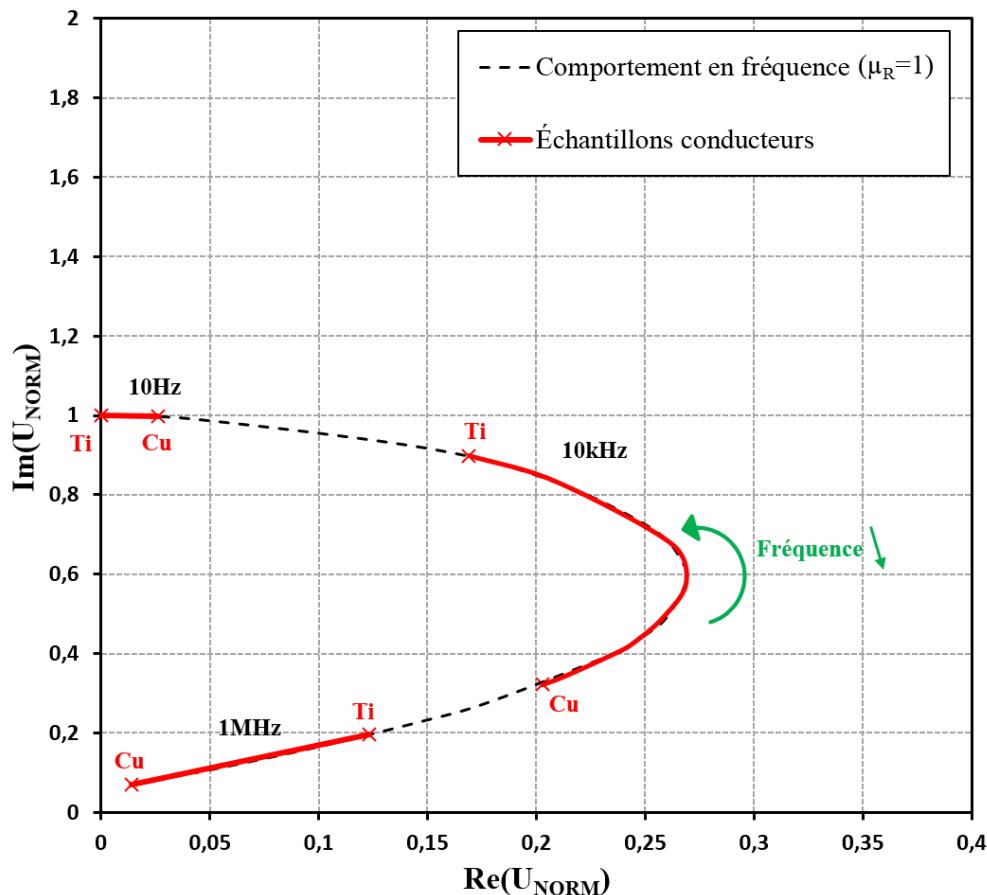


Figure 2.26 : Simulation du comportement en fréquence du capteur optimisé dans le cas d'échantillons purement conducteurs

2.3.2.2 Cas des matériaux magnétiques

Dans les simulations CIVA, le matériau est isotrope, homogène, linéaire et de perméabilité μ_R . Dans cette étude, σ est imposée à 3 MS/m et μ_R évolue entre 1 et 100. Cette conductivité est représentative des aciers employés dans l’industrie comme c’est le cas, par exemple, pour le 16NCD13 et le 32CDV13. La figure 2.27 complète la figure 2.26 et montre la réponse simulée en bleu du capteur lorsque μ_R évolue entre 1 et 100 à une fréquence d’excitation de 10 Hz et 1 MHz.

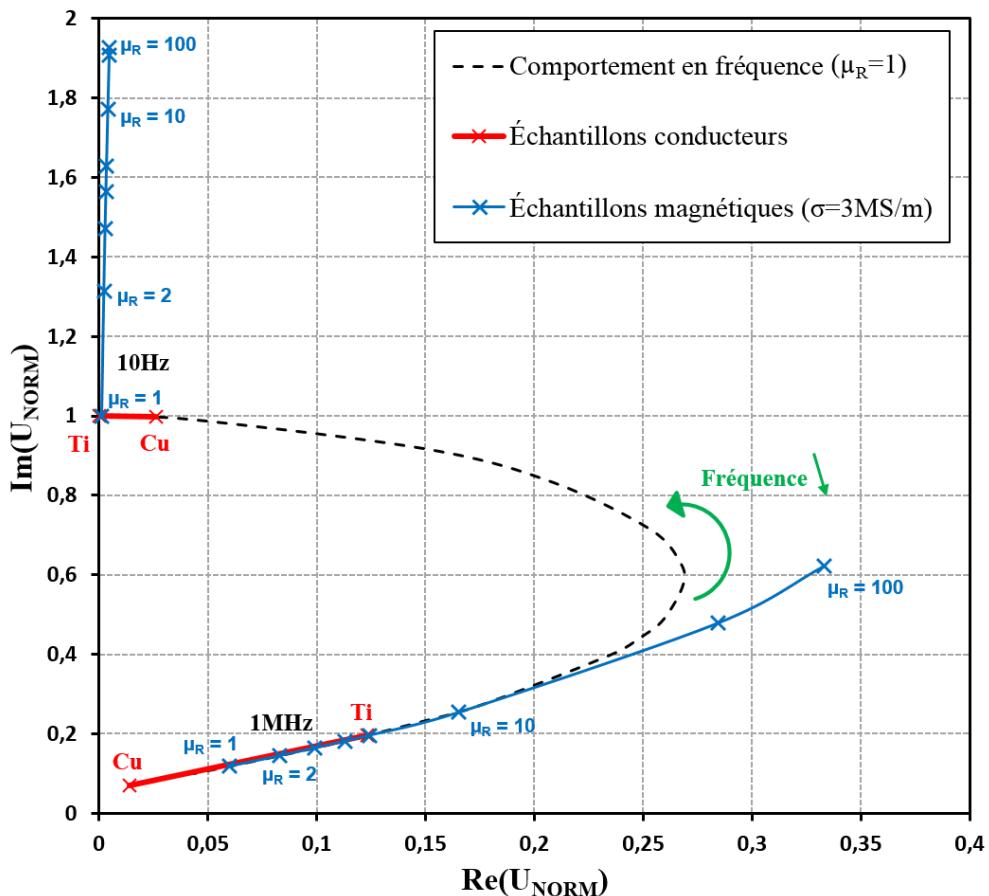


Figure 2.27 : Simulation du comportement en fréquence du capteur optimisé dans le cas d’échantillons conducteurs et d’échantillons magnétiques

À 1 MHz, on constate que les courbes rouges et bleues se superposent contrairement aux mesures effectuées à 10 Hz qui présentent un angle d’environ 90° entre ces deux courbes. En se fiant à ces résultats, il apparaît qu’une diminution de la fréquence d’excitation permettrait, théoriquement, une discrimination entre σ et μ . Cependant, la mesure CF à basses fréquences est quasiment insensible à σ : elle devra être évaluée alors en hautes fréquences après détermination au préalable de μ .

L’optimisation d’un second capteur a donc été envisagée. Effectivement, l’emploi du capteur précédent n’est pas approprié pour fonctionner à une fréquence d’excitation avoisinant le Hz car la partie réceptrice du capteur est constituée de bobines composées de seulement 4 spires (cf. figure 2.11). La sensibilité d’une bobine en réception est proportionnelle à la fréquence et au nombre de spires [Mook_2006] [Hesse_2005].

2.3.3 Proposition et évaluation expérimentale d'un récepteur bobiné

Suite aux résultats obtenus précédemment, une méthode permettant d'évaluer individuellement σ et μ est proposée. Cette méthode repose sur :

- l'évaluation de μ à basses fréquences (proche du courant continu) ;
- et l'évaluation de σ , connaissant μ , à hautes fréquences.

Pour évaluer σ , le capteur optimisé présentant un recouvrement entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice gravées sur film Kapton est employé. En revanche, pour évaluer μ , un second récepteur est nécessaire. Comme énoncé plus tôt, la bobine réceptrice gravée ne peut être employée à si basses fréquences. Une étude a porté, dans un premier temps, sur un récepteur bobiné présentant un nombre important de spires. Pour réaliser cette étude, les caractéristiques de l'émetteur restent inchangées (cf. tableau 2.9) et seul le récepteur est évalué.

Tableau 2.9 : Caractéristiques géométriques de la bobine d'émission

Bobines	
Diamètre interne	9 mm
Diamètre externe	10 mm
Hauteur	35 μ m
Nombre de spires	4
Entrefer	0,01 mm

2.3.3.1 Simulation de récepteurs inductifs

La simulation de trois motifs, représentés par la figure 2.28, est effectuée avec comme bobine réceptrice : une bobine gravée identique à l'émetteur (a), une bobine gravée quasi ponctuelle (b) et une bobine bobinée de grande hauteur (c). Les paramètres géométriques des bobines simulées sont indiqués dans le tableau 2.10 et l'entrefer des bobines de réception est de 0,1 mm. Dans les cas (a) et (c), la bobine d'émission et celle de réception sont représentées de telle façon que les bobines soient coaxiales et dans le cas (b), les bobines sont décalées selon la distance d . Entre le cas (a) et (c) seule la hauteur diffère : la bobine gravée présente une hauteur de 35 μ m et le récepteur bobiné une hauteur de 3 mm (du fait de l'empilement des spires).

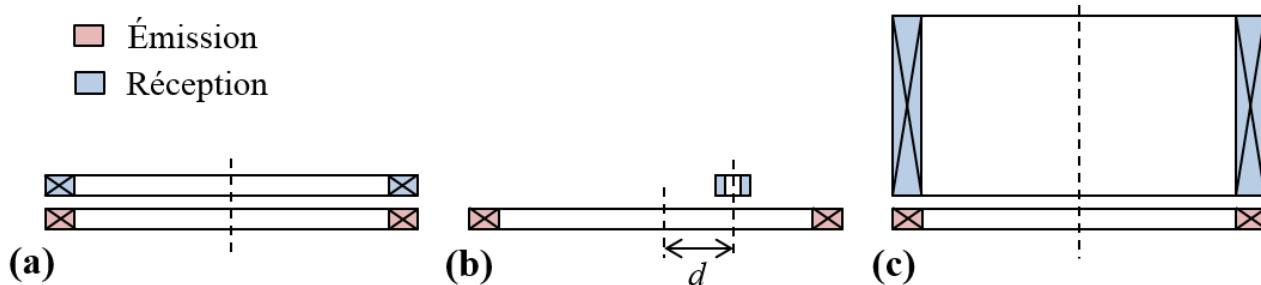


Tableau 2.10 : Caractéristiques géométriques des bobines réceptrices simulées

Paramètres	Bobine (a)	Bobine (b)	Bobine (c)
Diamètre interne	9 mm	0,099 mm	9 mm
Diamètre externe	10 mm	0,101 mm	10 mm
Hauteur	35 μ m	35 μ m	3 mm

La représentation des signaux dans un plan complexe normalisé permet de s’affranchir du nombre de spires de la bobine réceptrice. La réponse normalisée théorique d’un capteur est effectivement indépendante du nombre de spires. En revanche, le nombre de spires intervient expérimentalement dans la sensibilité du capteur.

Dans le cas de la configuration (b), une étude de la distance optimale entre les axes des bobines émettrice et réceptrice a été réalisée par simulation à 10 Hz pour des distances d comprises entre 0 et 5 mm. La figure 2.29 montre la simulation des signaux CF dans un plan complexe normalisé, pour des distances de 0, 2, 4 et 5 mm entre les axes des bobines émettrice et réceptrice lorsque μ_R évolue entre 1 et 100 pour une conductivité de 3 MS/m. La courbe en pointillés représente la réponse du capteur en présence d’échantillons purement conducteurs.

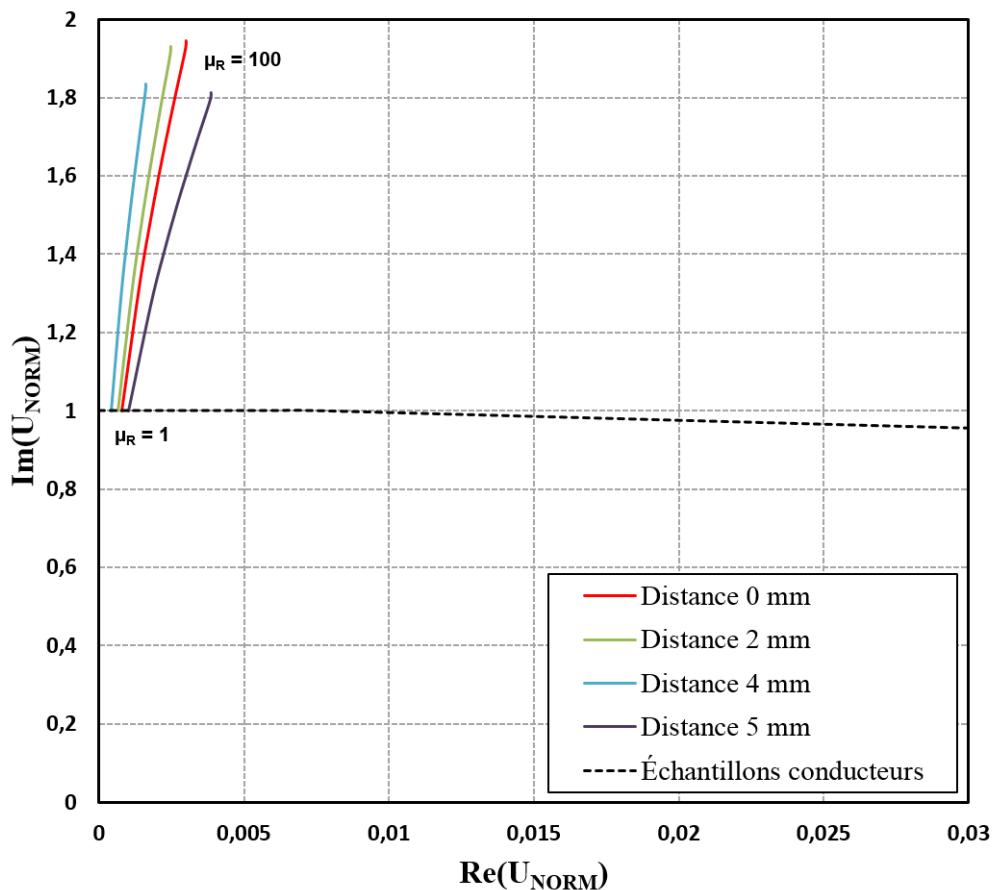


Figure 2.29 : Simulation de différentes distances entre les axes des bobines émettrice et réceptrice à 10 Hz

Pour comparer les résultats, l'amplitude de la variation de la réponse du capteur pour μ_R compris entre 1 et 100 à une conductivité de 3 MS/m est calculée. Cette grandeur est ensuite comparée à la distance entre les points (0, 0) et (1, 0) du plan complexe normalisé pour obtenir un résultat en pourcentage. À 0 mm, donc lorsque les bobines sont coaxiales, la variation est la plus importante (94 %). Cette valeur décroît ensuite jusqu'à 80 %, à une distance de 4,5 mm, puis remonte jusqu'à 90 % à 5 mm avant de décroître lentement ensuite. En définitive, la distance définie entre les axes des bobines est de 0 mm.

La figure 2.30 montre les simulations à 10 Hz obtenues pour les configurations (a), (b) et (c) lorsque μ_R évolue entre 1 et 100 à une conductivité de 3 MS/m. La courbe en pointillé représente la réponse en présence d'échantillons purement conducteurs qui est identique pour les trois capteurs (a), (b) et (c) dans le plan complexe normalisé à 10 Hz.

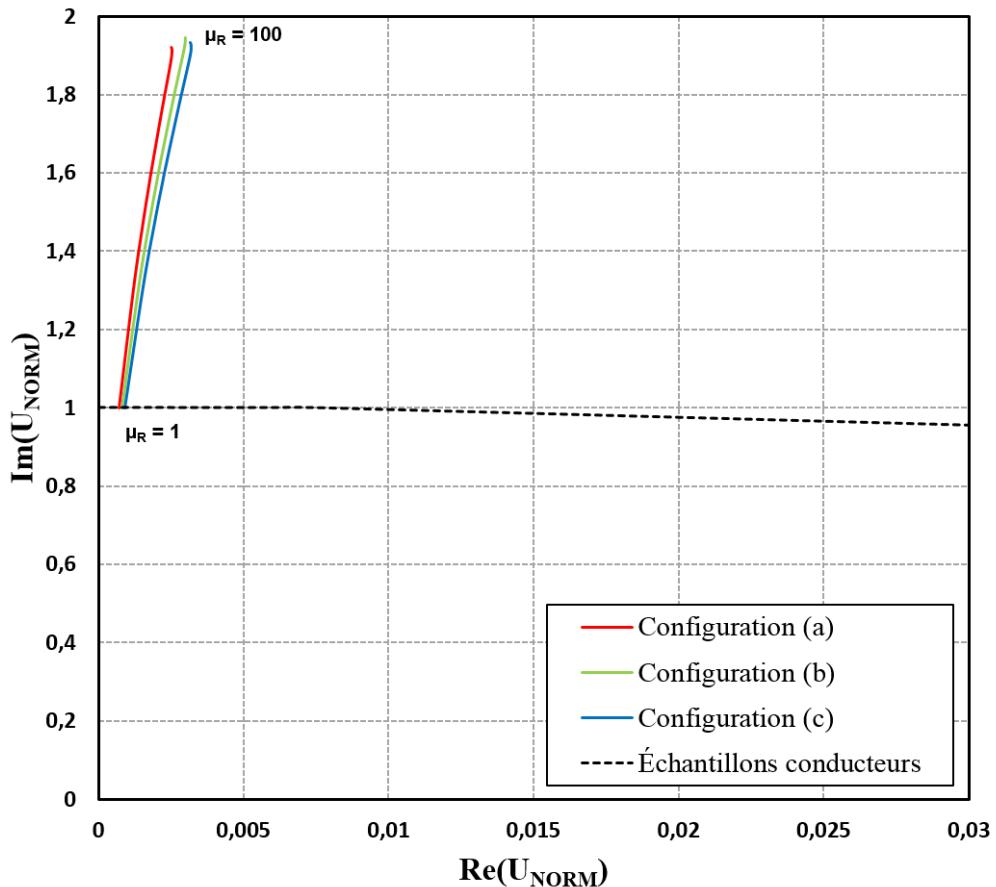


Figure 2.30 : Comparaison des configurations (a), (b) et (c) à 10 Hz

On constate que dans les trois cas, le comportement en fonction de la perméabilité magnétique est quasi identique dans le plan complexe normalisé : les paramètres géométriques du récepteur ont un effet négligeable. En revanche, les paramètres géométriques des bobines interviennent au niveau de la sensibilité des capteurs lorsque l'on souhaite réaliser des essais expérimentaux. Le tableau 2.11 donne les simulations des tensions obtenues (sachant que l'on considère que chaque bobine est constituée d'une spire) à 10 Hz des configurations (a), (b) et (c) avec un μ_R de 1 et 100 à une

conductivité de 3 MS/m . Le courant d'excitation est de 1 mA . Dans le cas (b), la distance d entre les bobines d'émission et de réception est de 0 mm .

Tableau 2.11 : Simulation de la tension aux bornes des bobines à un courant de 1 mA (10Hz)

μ_R ($\sigma = 3 \text{ MS/m}$)	Bobine (a) [mV]	Bobine (b) [mV]	Bobine (c) [mV]
1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
100	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$

Les tensions sont très faibles du fait que la fréquence d'excitation est basse et que l'on considère une seule spire. On note que la tension dans le cas (c) est plus faible que dans le cas (a) du fait de la hauteur de la bobine. Par contre, le nombre de spires peut être beaucoup plus important que dans le cas de la bobine gravée. Dans le cas (b), les dimensions de la bobine font que la réponse du capteur est très faible. En utilisant un fil de cuivre de diamètre $40 \mu\text{m}$, les configurations (a), (b) et (c) peuvent contenir, avec un remplissage régulier, environ 10, 1 et 1000 spires.

Tableau 2.12 : Simulation de la tension aux bornes des bobines pour le nombre de spires donné à un courant de 1 mA (10 Hz)

μ_R ($\sigma = 3 \text{ MS/m}$)	Bobine (a) [mV]	Bobine (b) [mV]	Bobine (c) [mV]
1	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
100	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

On constate que le signal est plus favorable dans le cas (c). Afin de réaliser des mesures, un motif constitué d'une bobine d'émission gravée et d'une bobine réceptrice bobinée, constituée d'un nombre important de spires, est proposé.

2.3.3.2 Mesures avec un récepteur bobiné

Le choix du récepteur s'est basé sur un bobinage disponible au laboratoire dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.13. La figure 2.31 illustre le capteur évalué qui complète le capteur optimisé (cf. figure 2.8). Étant donné l'étude précédente (cf. figure 2.29), les bobines sont placées de manière à être coaxiales.

Tableau 2.13 : Caractéristiques du capteur

Bobine d'émission (E)		Bobine de réception (R)	
Diamètre interne \varnothing_{INT1}	9 mm	Diamètre interne \varnothing_{INT2}	6,7 mm
Diamètre externe \varnothing_{EXT1}	10 mm	Diamètre externe \varnothing_{EXT2}	12,8 mm
Hauteur h_1	$35 \mu\text{m}$	Hauteur h_2	$2,9 \text{ mm}$
Nombre de spires	4	Nombre de spires	1 000
Entrefer e_1	0,01 mm	Entrefer e_2	0,1 mm
		Fréquence de résonance	124 kHz

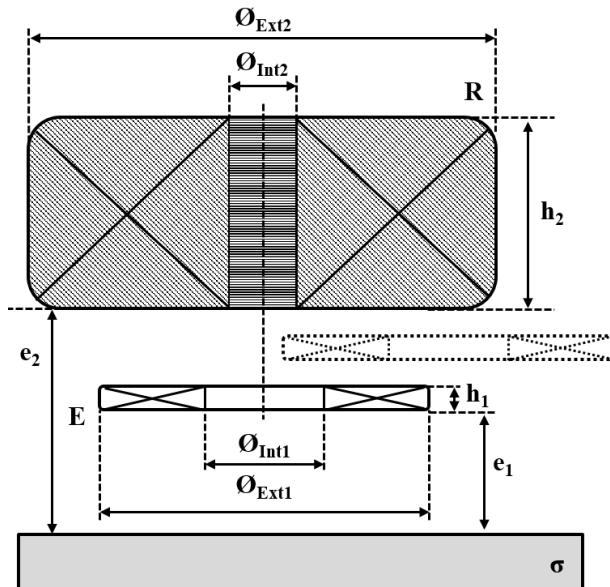


Figure 2.31 : Illustration du capteur évalué expérimentalement (vue en coupe)

Comme énoncé précédemment dans la sous-section 2.1.2.2, et détaillé dans l'annexe A, les pertes fer augmentent en fonction de la fréquence d'excitation et compromettent l'évaluation de μ_{MES}/μ_0 . Afin de réduire considérablement ces pertes, une fréquence d'excitation de 0,5 Hz est employée pour évaluer le capteur.

Le capteur est évalué dans le cas de matériaux purement conducteurs et de matériaux magnétiques, composés en partie d'aciéries ferritiques caractérisés par différents taux de ferrite. Ces matériaux sont présentés dans le tableau 2.14. La figure 2.32 montre la réponse du capteur à 0,5 Hz dans le cas de matériaux purement conducteurs et de matériaux magnétiques.

Tableau 2.14 : Description des échantillons étudiés

Matériaux conducteurs	σ [MS/m]	Matériaux magnétiques	μ_{MES}/μ_0	Matériaux ferritiques (Taux de ferrite [%])
Titane LT31	0,61	Acier allié	30	0,45
Cuivre	58,8	Inox 15-5-PH	40	2
		Acier 32CDV13	80	3,1
		Acier 16MND5	90	10,2
		Acier 16NCD13	110	33
		Fer doux	1 000	82,2
		Ferrite 3C94	2 200	

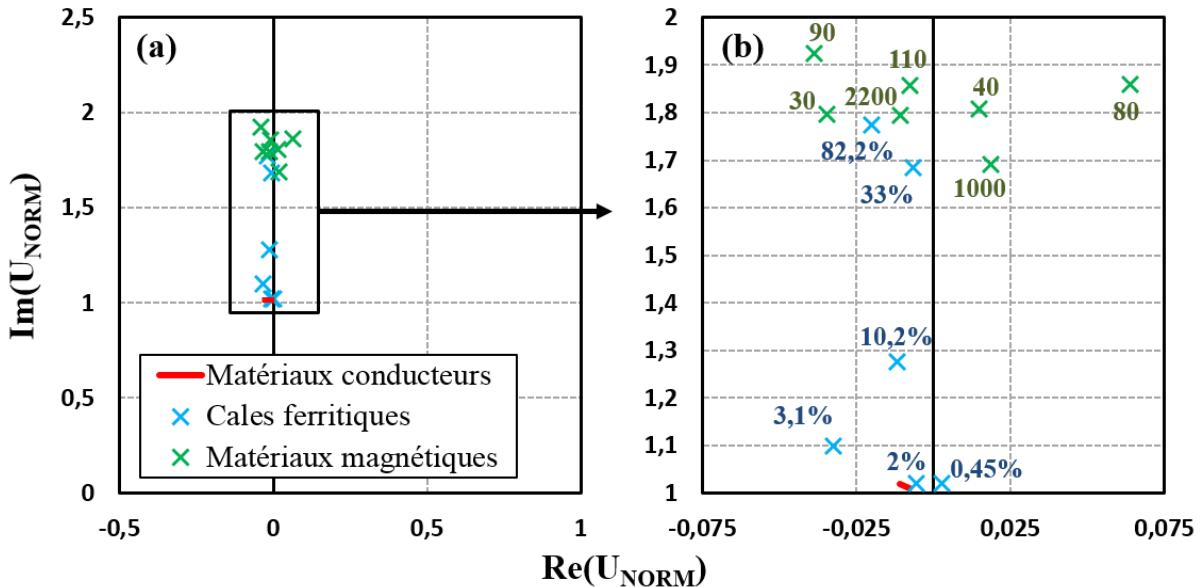


Figure 2.32 : (a) Évaluation du capteur avec récepteur bobiné sur matériaux purement conducteurs et matériaux magnétiques à une fréquence de 0,5 Hz. (b) Zoom au niveau des points de mesures

On remarque qu'à 0,5 Hz, les croix représentant les matériaux magnétiques évoluent principalement sur l'axe des ordonnées (cf. figure 2.32(a)). Les réponses du capteur en présence de matériaux purement conducteurs sont quasi ponctuelles dans le plan complexe normalisé. Une réduction de la fréquence d'excitation se traduit par une diminution de la partie réelle de la tension normalisée de la bobine réceptrice. L'élévation de la perméabilité magnétique, quant à elle, accroît le flux à travers la bobine réceptrice d'où une augmentation de la partie imaginaire de la tension normalisée [Perdrix_1990]. La figure 2.33 montre la distribution de la partie imaginaire de la tension normalisée du récepteur bobiné en fonction de μ_{MES}/μ_0 (cf. figure 2.33(a)) et du taux de ferrite des aciers ferritiques (cf. figure 2.33(b)).

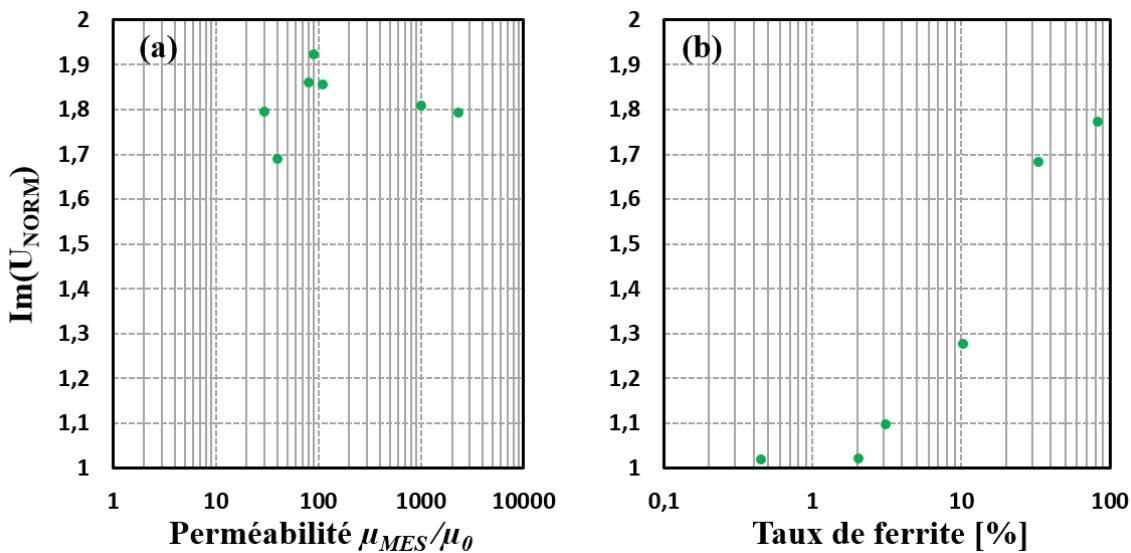


Figure 2.33 : Partie imaginaire de la tension normalisée en fonction de μ_{MES}/μ_0 et du taux de ferrite à 0,5 Hz

En se basant sur les figures 2.32(b) et 2.33(a), on constate que la partie imaginaire de la tension normalisée du capteur n'est pas monotone lorsque μ_{MES}/μ_0 augmente. En revanche, dans le cas de la figure 2.33(b), la partie imaginaire de la tension normalisée croît en fonction du taux de ferrite. Par ailleurs, sur la figure 2.32(b), on constate du bruit sur la partie réelle, se traduisant notamment par des valeurs négatives, et sur la partie imaginaire, les points de mesure sont très dispersés et ne s'ordonnent pas en fonction de μ_{MES}/μ_0 . La tension en sortie du récepteur est effectivement bruitée du fait que la tension à mesurer est très faible (de l'ordre du μ V).

Une étude a été menée dans le but d'observer si le récepteur bobiné ne perturbe pas les mesures réalisées à 1 MHz avec la bobine réceptrice gravée lorsque l'on souhaite évaluer σ . Comme présenté en figure 2.31, le récepteur gravé est positionné entre la bobine gravée émettrice et le récepteur bobiné est en circuit ouvert. La figure 2.34 montre les résultats du capteur optimisé à 1 MHz sur cales conductrices lorsque le capteur est en présence, ou non, du récepteur bobiné.

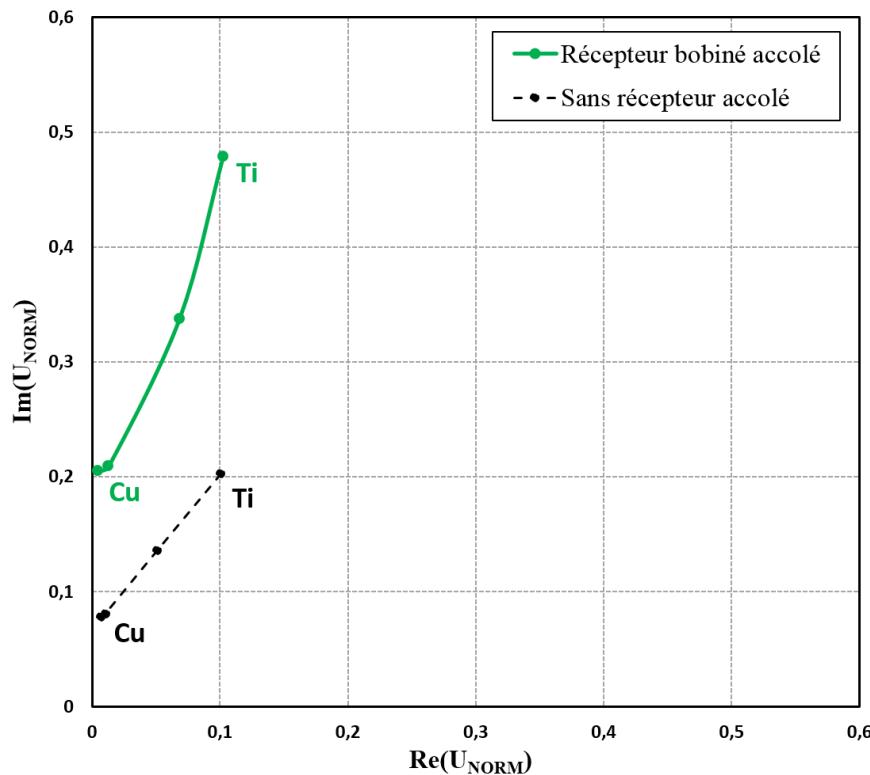


Figure 2.34 : Mesures réalisées avec le capteur optimisé à 1 MHz sur cales conductrices lorsque le capteur est en présence du récepteur bobiné

On constate que le récepteur bobiné modifie fortement les mesures réalisées à 1 MHz. Le grand nombre de spires du récepteur bobiné fait qu'il y a un effet capacitif important entre ses spires. La fréquence de résonance de 124 kHz est bien inférieure à la fréquence de travail de 1 MHz. L'utilisation d'une bobine n'est donc pas envisageable au regard, d'une part, de la faible sensibilité de mesure et, d'autre part, des perturbations dues à la bobine réceptrice volumique lors de la mesure en haute fréquence. Un capteur magnétique de type GMR est étudié dans la section suivante avec pour objectif d'évaluer la perméabilité magnétique d'un matériau magnétique.

2.3.4 Proposition et évaluation expérimentale d'un capteur magnétique

La partie réceptrice du capteur est remplacée par un capteur directement sensible au champ magnétique de type GMR. Les GMR ont l'avantage de présenter une sensibilité constante d'une fréquence continue à une fréquence de l'ordre du MHz [Fermon_2010] [Ramos_2014]. Des mesures sont réalisées avec une GMR NVE, de référence AAH004-00, qui a une sensibilité de 240 V/T lorsqu'elle est alimentée en ± 5 V. La GMR est disposée coaxialement à la bobine émettrice et présente un entrefer e_2 de 0,1 mm (cf. figure 2.35). La composante normale du champ magnétique est, dans cette configuration, mesurée par la GMR.

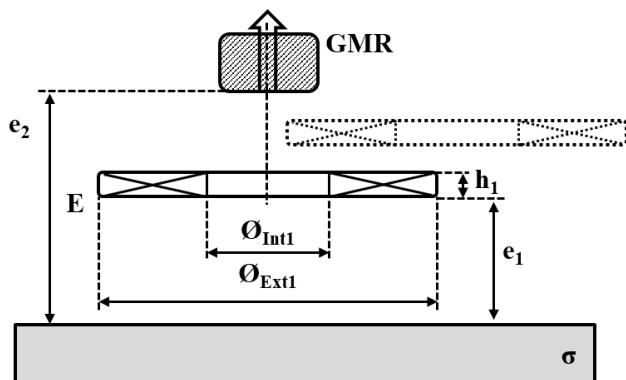


Figure 2.35 : Représentation de la configuration avec la bobine émettrice et le récepteur GMR

La figure 2.36 montre la réponse de la GMR à 0,5 Hz dans le cas de matériaux purement conducteurs et de matériaux magnétiques (cf. tableau 2.14). Les axes du plan complexe sont inversés car la GMR mesure directement le champ magnétique B et non la dérivée du champ magnétique $d\phi/dt$ comme la bobine.

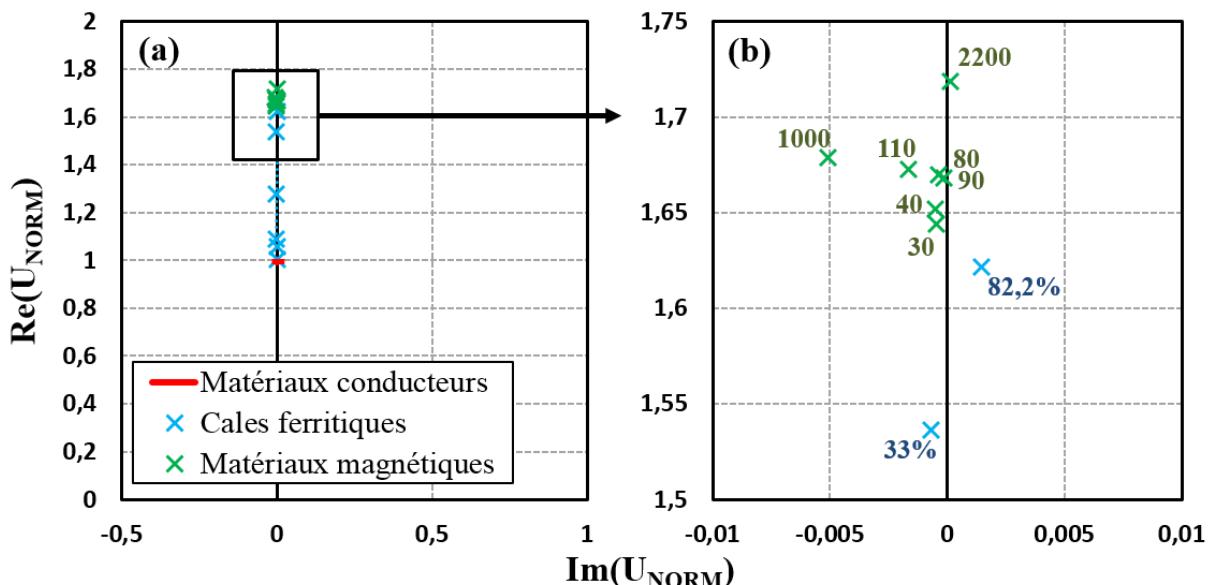


Figure 2.36 : (a) Évaluation du capteur à base de GMR sur matériaux purement conducteurs et matériaux magnétiques à une fréquence de 0,5 Hz. (b) Zoom au niveau des points de mesures

La réponse de la GMR en présence de matériaux purement conducteurs, se situant au point $(0, 1)$ du plan complexe, est quasi indépendante de σ . On remarque que les croix représentant les matériaux magnétiques continuent à évoluer selon l'axe des ordonnées (cf. figure 2.36(a)). La figure 2.37 montre la distribution des réponses du capteur à base de GMR et du récepteur bobiné. Les parties réelle et imaginaire de la tension normalisée sont représentées, respectivement dans le cas du capteur à base de GMR et du récepteur bobiné, en fonction de μ_{MES}/μ_0 (cf. figure 2.37(a)) et du taux de ferrite des aciers ferritiques (cf. figure 2.37(b)).

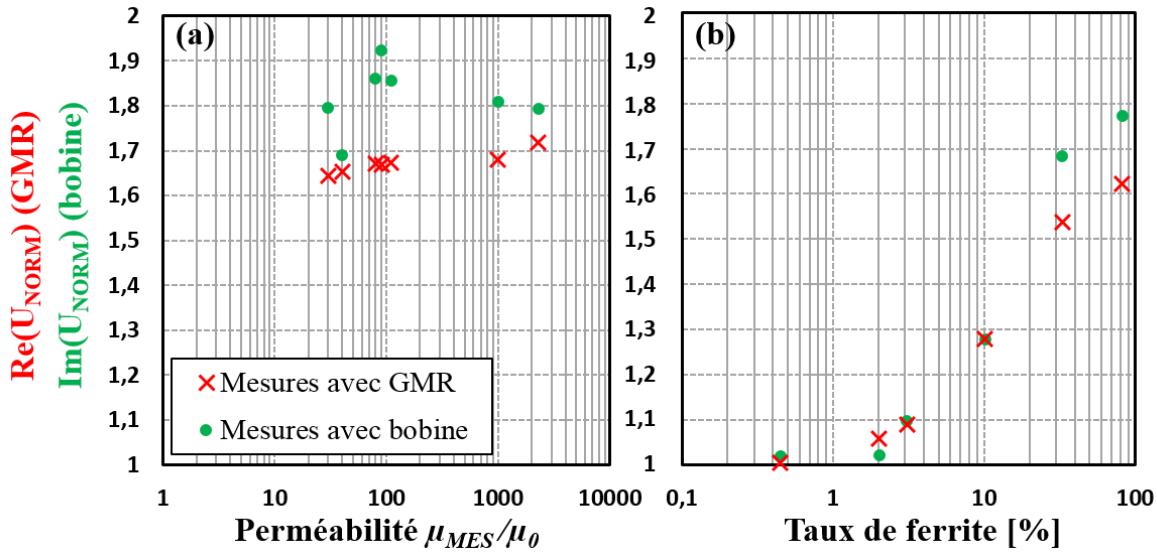


Figure 2.37 : Réponses du capteur à base de GMR et de la bobine en fonction de μ_{MES}/μ_0 et du taux de ferrite à 0,5 Hz

En se basant sur les figure 2.36(b) et 2.37(a), on constate que la partie réelle normalisée du signal du capteur à base de GMR évolue de manière lisse et monotone lorsque μ_{MES}/μ_0 augmente contrairement au récepteur bobiné. En comparant les figures 2.32 et 2.36, on observe que les points de mesure dans le cas de la GMR se situent quasiment sur l'axe des ordonnées et ne sont pas autant dispersés que dans le cas du récepteur bobiné. De plus, la sensibilité de mesure en V/T dans le cas de la bobine et du capteur à base de GMR est respectivement de 1,2 et de 240 à 0,5 Hz : la GMR présente donc une sensibilité 200 fois plus importante que la bobine. On retrouve la propriété intéressante de la GMR à posséder une sensibilité constante même en basses fréquences contrairement à la bobine.

Afin de conforter le choix d'une GMR par rapport à un récepteur inductif, une étude est menée afin de s'assurer que le récepteur choisi pour évaluer μ ne perturbe pas les mesures réalisées à 1 MHz avec la bobine réceptrice gravée lorsque l'on souhaite évaluer σ . La présence de concentrateurs de flux intégrés à la GMR peut effectivement être source de perturbations. La figure 2.38 montre les résultats du capteur optimisé à 1 MHz sur cales conductrices lorsque le capteur est en présence, ou non, du récepteur bobiné ou bien du récepteur à base de GMR qui est non alimenté.

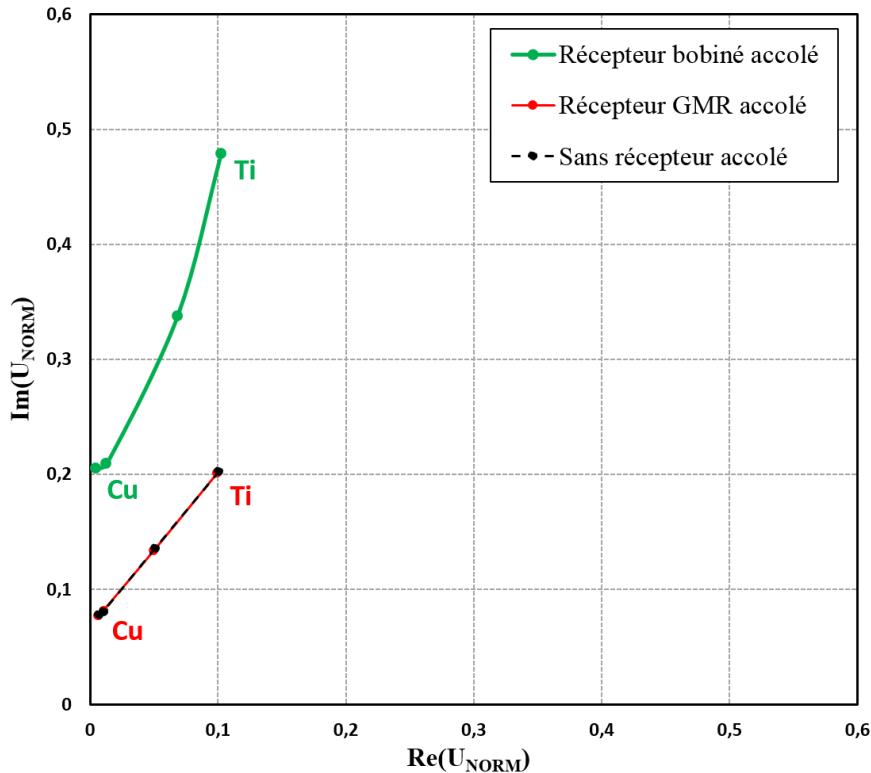


Figure 2.38 : Mesures réalisées avec le capteur optimisé à 1 MHz sur cales conductrices lorsque le capteur est en présence d’un récepteur bobiné et du capteur à base de GMR

On constate que le capteur à base de GMR ne modifie pas les mesures réalisées à 1 MHz avec la bobine gravée contrairement au récepteur bobiné. L’utilisation d’une GMR est donc possible au regard de ses performances en termes de sensibilité et du caractère monotone et moins bruité de sa réponse lorsque μ_{MES}/μ_0 augmente.

L’estimation de μ et σ semble à première vue possible lorsque l’on regarde les résultats expérimentaux obtenus avec la GMR. Une mesure dans un premier temps à très basses fréquences, c’est-à-dire proche du courant continu, a pour but d’estimer seulement μ . Dans un second temps, à hautes fréquences (≈ 1 MHz), connaissant μ on pourrait estimer σ . Les outils de simulations ainsi que l’utilisation de cales étalons peuvent apporter une aide précieuse pour mener à bien l’évaluation des paramètres électromagnétiques d’un matériau.

2.4 CONCLUSION

Différentes méthodes de caractérisation de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique ont été abordées dans ce chapitre. Tout d'abord des méthodes conventionnelles ont permis de constituer un lot d'échantillons ferromagnétiques afin d'évaluer les capteurs CF conçus.

Dans un second temps, un capteur CF, réalisé sur film Kapton, a été optimisé afin que sa réponse soit rectiligne dans le plan complexe dans le but d'évaluer σ . Sous réserve d'appliquer une rotation à cette réponse rectiligne, seule la partie réelle (ou imaginaire) du signal est affectée : l'évaluation de σ est ainsi simplifiée. Le capteur a été évalué sur matériaux purement conducteurs, dont les conductivités varient de 0,61 MS/m à 58,8 MS/m, et le caractère rectiligne de la réponse du capteur a bien été relevé. L'évaluation expérimentale du capteur a ensuite été étendue aux configurations suivantes :

- matériaux purement conducteurs présentant des défauts surfaciques ;
- aciers de structure ferritique et caractérisés par un taux de ferrite compris entre 0,45 et 82,2 % ;
- matériaux ferromagnétiques dont les conductivités sont comprises entre 1,3 et 8,9 MS/m et la perméabilité magnétique μ_{MES}/μ_0 entre 40 et 1000 ;
- matériaux ferromagnétiques présentant des défauts surfaciques ;
- acier 18NiCr 5-4 présentant des brûlures dites de rectification.

On a constaté que la réponse du capteur est rectiligne lorsque les matériaux changent de propriétés électromagnétiques. C'est par exemple le cas pour l'acier 18NiCr 5-4 qui présente différents degrés de brûlure. De plus, lorsque le matériau présente un défaut, la signature de défaut ne suit pas la même direction que la réponse rectiligne du capteur représentant l'effet du couple (σ, μ). Il est alors possible de différencier la présence du défaut du changement de conductivité (ou de perméabilité) de la pièce. Cette propriété est très intéressante si l'on souhaite inspecter la présence de défauts dans une soudure inhomogène, conduisant à un changement des paramètres électromagnétiques au passage de la soudure.

Pour finir, une étude a été menée afin de développer un capteur CF pouvant permettre d'identifier à la fois σ et μ . Il a été remarqué qu'une diminution de la fréquence d'excitation permettrait une discrimination entre σ et μ . Des mesures ont été entreprises et deux technologies de récepteurs ont été évaluées : un récepteur bobiné composé d'un nombre important de spires et un capteur magnétique de type GMR. Dans les deux cas, les réponses des récepteurs pour les échantillons magnétiques sont situées sur l'axe des ordonnées du plan complexe. La GMR, contrairement à la bobine, présente une réponse moins bruitée et plus lisse lorsque la perméabilité μ_{MES}/μ_0 augmente. Avec des outils de simulation et des matériaux étalons, il semble probable qu'une évaluation indépendante des paramètres σ et μ soit réalisable. Malheureusement, au vu du manque de matériaux étalons, cette étude n'a pas pu être menée jusqu'à son terme.

CHAPITRE 3 – DÉVELOPPEMENT D'UN IMAGEUR CF STATIQUE

3.1	PROBLÉMATIQUE DE L'IMAGERIE COURANTS DE FOUCAULT	87
3.2	TEST D'UN PREMIER PROTOTYPE.....	94
3.2.1	DESCRIPTION DE L'IMAGEUR	94
3.2.2	MISE EN ŒUVRE DU PROTOTYPE.....	97
3.3	OPTIMISATION DU MOTIF ÉLÉMENTAIRE	100
3.3.1	CHOIX DE LA COMPOSANTE DE CHAMP MAGNETIQUE A MESURER	100
3.3.2	ÉTUDE DE L'EMETTEUR.....	102
3.3.3	ÉTUDE DU RECEPTEUR.....	103
3.3.4	SPECIFICATIONS DU CAPTEUR FLEXIBLE	108
3.3.5	RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION.....	110
3.4	RÉALISATION ET ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DE L'IMAGEUR STATIQUE	112
3.4.1	REALISATION DU CAPTEUR.....	112
3.4.2	ÉTUDE D'UN MONOELEMENT POUR CARACTERISER LA ZONE DE FAIBLE SENSIBILITÉ DU CAPTEUR	114
3.4.3	ÉTUDE DE L'IMAGEUR COMPLET	115
3.4.3.1	<i>Influence des dimensions d'un défaut.....</i>	115
3.4.3.2	<i>Influence de l'orientation d'un défaut.....</i>	117
3.4.3.3	<i>Détection d'un défaut de faible longueur</i>	119
3.4.4	APPLICATION A L'INSPECTION DE DEFAUTS AUX ABORDS D'UN TROU DE RIVET.....	119
3.5	CONCLUSION	122

Classiquement, l'inspection d'une pièce est réalisée par un capteur monoélément balayant une surface selon deux axes ou bien un capteur multiéléments balayant une surface selon un axe. Le capteur monoélément contient un seul motif élémentaire composé d'éléments d'émission et de réception. Le capteur multiéléments est généralement constitué d'un réseau de motifs tous identiques et disposés régulièrement [12718_2008]. Dans certaines conditions, le balayage du capteur sur la pièce est difficile comme, par exemple, dans le cas de géométries complexes, de très petites surfaces (en raison des effets de bord) ou encore lorsque la surface du matériau est rugueuse voire abrasive : la durée de vie du capteur est alors impactée.

La dernière partie de la thèse porte sur le développement d'un imageur CF statique ; c'est-à-dire un capteur CF multiéléments dont les récepteurs sont disposés sous forme matricielle dans le but d'inspecter la surface d'une pièce sans avoir à balayer le capteur par rapport à cette dernière. Le contrôle par l'imageur statique permet d'obtenir une image pixélisée de la surface sous le capteur. Chaque pixel de l'image représente la réponse d'un des éléments de réception de la matrice. La structure et la position des motifs sont très importantes pour éviter la création d'une zone aveugle où un défaut pourrait passer inaperçu.

Les problématiques rencontrées en imagerie CF, selon les types de capteurs, sont d'abord présentées dans ce chapitre. Le principe de fonctionnement et la réalisation de l'imageur développé durant cette thèse sont ensuite exposés. Pour finir, une évaluation expérimentale de l'imageur est réalisée.

3.1 PROBLÉMATIQUE DE L'IMAGERIE COURANTS DE FOUCault

L'imagerie CF peut de fait être obtenue de trois différentes manières, présentées ci-après : l'imagerie monoélément, multiéléments et multiéléments statique. L'imagerie par CF a suscité un fort intérêt au début des années 1980 sous la forme, dans un premier temps, de capteurs monoéléments bobinés [McCary_1985][Hildebrand_1985] puis multiéléments [Collins_1985][Gramz_1994].

- L'imagerie CF monoélément :

De par sa simplicité de réalisation et de mise en oeuvre, le capteur monoélément est le motif le plus couramment employé en imagerie CF. Cependant, l'obtention d'une cartographie est en général très longue. En effet, un balayage de la surface de la pièce à inspecter selon deux axes est nécessaire avec un banc présentant une bonne précision sur les deux axes.

Un exemple de cartographie obtenue par un capteur monoélément est présenté en figure 3.1. Cette cartographie repose sur la mesure d'impédance à 2 MHz d'une bobine de diamètre 1,8 mm lors de l'inspection d'un trou de diamètre et de profondeur 0,5 mm dans une pièce composée d'un alliage de nickel [Copley_1983]. Le déplacement mécanique permet de déplacer le capteur avec un pas très fin (limité par la précision du banc) afin d'obtenir une image de très bonne résolution. La position du capteur doit être connue à tout instant : il est nécessaire d'utiliser un codeur sur chaque axe de déplacement.

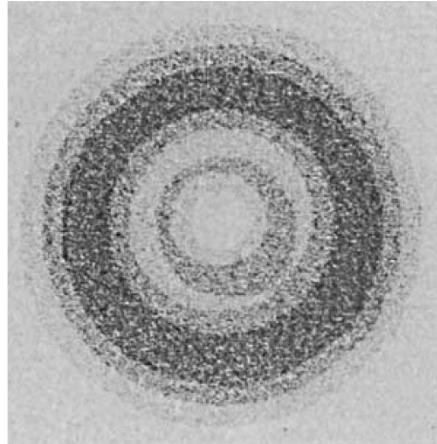


Figure 3.1 : Exemple d'une cartographie obtenue avec un capteur monoélément [Copley_1983]

- L'imagerie CF multiéléments :

Dans le but de réduire le temps d'inspection, des capteurs multiéléments, ou autrement dit capteurs en réseau dans lesquels la position relative des éléments sensibles est périodique [12718_2008], sont apparus. La répétition d'un motif élémentaire peut être réalisée soit selon une seule ligne sous forme d'une barrette linéaire (cf. figure 3.2(a)) [Collins_1985] soit en quinconce (cf. figure 3.2(b)) [Hurley_1992].

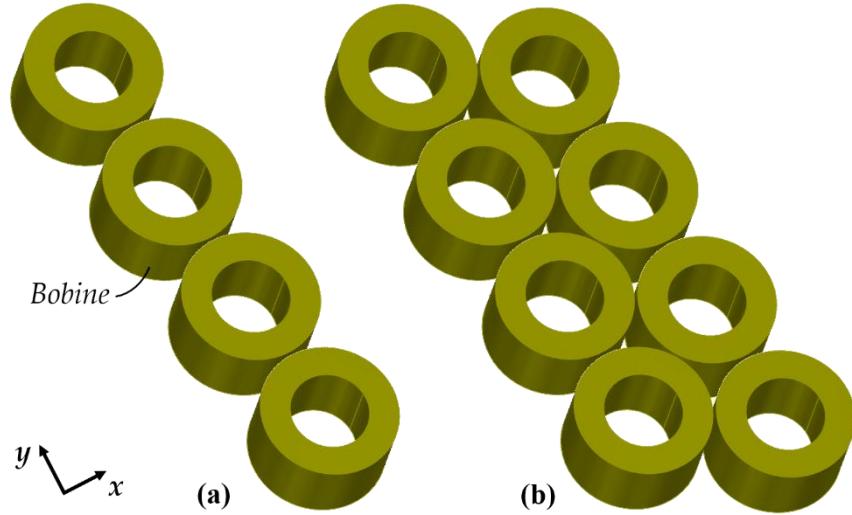


Figure 3.2 : Représentation de la disposition des motifs en barrette (a) et en quinconce (b)

La figure 3.3 montre un exemple ancien de l'imagerie multiéléments : l'inspection d'un échantillon d'aluminium corrodé (cf. photographie 3.3(a)). La cartographie, représentée par la figure 3.3(b), est obtenue par déplacement du capteur selon deux axes car le capteur matriciel est composé de seulement 2x4 bobines de diamètre 13 mm [Macecek_1991]. Plusieurs balayages sont effectués, avec un pas différent selon les deux axes de déplacement, pour acquérir les bandes constituant l'image.

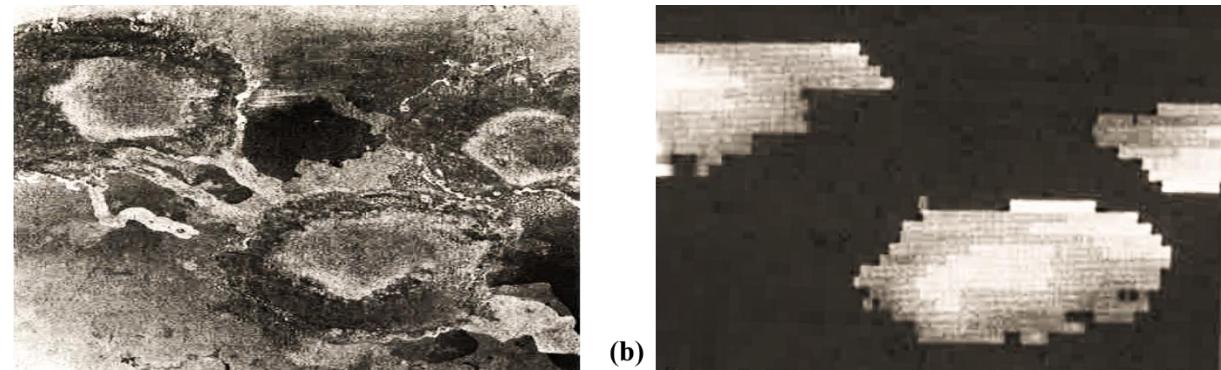


Figure 3.3 : (a) Photographie de l'échantillon d'aluminium corrodé. (b) Cartographie CF obtenue [Macecek_1991]

Par comparaison au capteur monoélément, le capteur multiéléments permet une réduction des mouvements de translation du capteur [Geithman_1993]. Cependant, la reconstruction de l'image nécessite de connaître la position du capteur (utilisation d'un codeur) lorsque les éléments de réception sont disposés en quinconce [Hedengren_1992].

- L'imagerie CF multiéléments statique :

L'imageur statique permet d'obtenir la cartographie d'une surface sans déplacement du capteur. Ce capteur est intéressant à condition qu'il ne présente pas de zone aveugle. En effet, lorsqu'un défaut se situe entre deux récepteurs, il y a un risque de perte de sensibilité qui peut conduire à la non détection du défaut lors de l'inspection (existence d'une zone aveugle). Au regard du grand nombre d'éléments pouvant composer le capteur matriciel, une commutation électronique des éléments est nécessaire [Auld_1991]. L'imageur statique présente les avantages de s'affranchir des vibrations mécaniques liées au moteur (variation d'entrefer), d'inspecter rapidement et manuellement une zone, d'inspecter des matériaux dont la surface est rugueuse voire abrasive.

Diverses applications potentielles de l'imageur statique sont relatées dans la littérature. L'imagerie statique permet en effet :

- la surveillance de santé structurelle (de l'anglais Structural Health Monitoring, SHM) qui repose sur la détection, la localisation, la quantification et la prédition d'un endommagement lorsque le capteur est installé en permanence sur une structure. L'imageur statique peut être employé pour contrôler le vieillissement d'une soudure [Nath_2002];
- le contrôle rapide après fabrication ou lors d'inspections périodiques, par exemple, de l'axe du rotor d'une turbine [Roney_2006] ou bien de zones corrodées dans le cas de pièces en aluminium [Sun_2007];
- ou l'inspection de surfaces complexes du type par exemple structures incurvées [Hedengren_1997][Lepage_2009].

La figure 3.4 illustre un système portatif d'imagerie statique constitué d'un ordinateur, d'un multiplexeur et d'un capteur matriciel composé de 6x10 bobines, de diamètre 5 mm, gravées sur film flexible [Krampfner_1988] [Duane_1987]. Dans l'article et le brevet cités, l'affichage sous forme d'une image n'est pas réalisé.

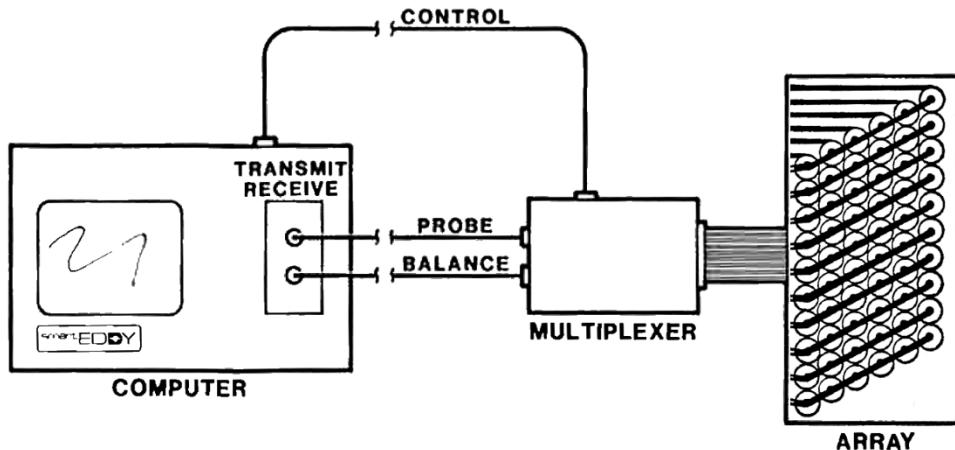


Figure 3.4 : Système CF d'acquisition constitué d'un capteur statique, d'un multiplexeur et d'un ordinateur [Krampfner_1988]

La simulation d'une acquisition statique est présentée dans [Hedengren_1992]. La figure 3.5 montre la réponse obtenue par simulation pour 6x6 bobines, connectées en double fonction, lorsque la matrice des éléments est placée à une position la moins sensible puis la plus sensible par rapport au défaut. Les dimensions géométriques des bobines ne sont pas décrites et seules les dimensions du défaut sont données : la longueur est de 0,8 mm, l'ouverture de 0,4 mm et la profondeur de 0,1 mm.

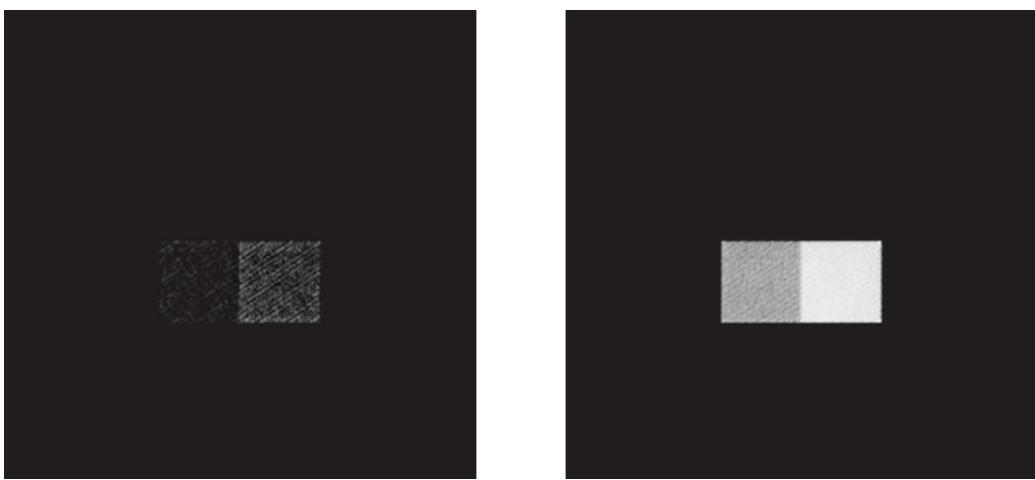


Figure 3.5 : Simulation d'une cartographie statique lorsque le défaut est placé dans le pire (a) et le meilleur (b) des cas [Hedengren_1992]

Afin d'augmenter le signal quand le défaut est placé dans la zone la moins sensible du capteur, un empilement de différentes couches d'éléments peut être utilisé [Hedengren_1997]. Il est décrit que la bobine peut être de forme rectangulaire, cylindrique ou bien hexagonale. Le brevet en question

évoque la possibilité d'assembler deux voire trois couches de bobines gravées comme représenté en figure 3.6. Les couches sont décalées les unes des autres afin de réduire les zones, généralement situées entre les éléments, où la sensibilité est la plus faible. En revanche, l'utilisation de bobines connectées en double fonction peut conduire à une sensibilité réduite pour des éléments situés sur les couches supérieures, du fait d'un entrefer plus important, comme énoncé dans le chapitre 2 (cf. sous-section 2.2.2.1). L'évaluation expérimentale de cet imageur n'est pas exposée dans le brevet.

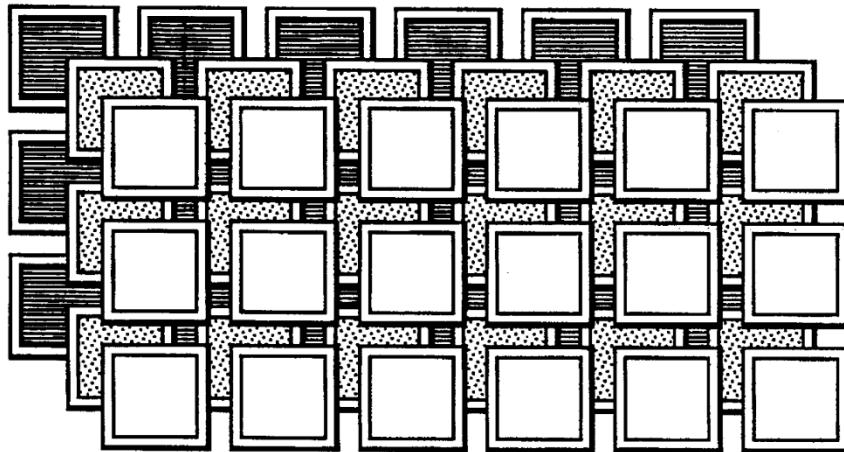


Figure 3.6 : Imageur statique composé de trois couches d'éléments [Hedengren_1997]

Plus récemment, un capteur matriciel de grande dimension a été proposé dans le but de détecter la présence d'objets métalliques [Hu_2009]. Il est composé de deux couches superposées de 12×12 bobines rectangulaires pour une superficie totale d'environ $24 \times 24 \text{ cm}^2$. La couche supérieure et la couche inférieure correspondent respectivement à la couche d'émission et de réception. La figure 3.7 montre deux mesures réalisées à 10 kHz.

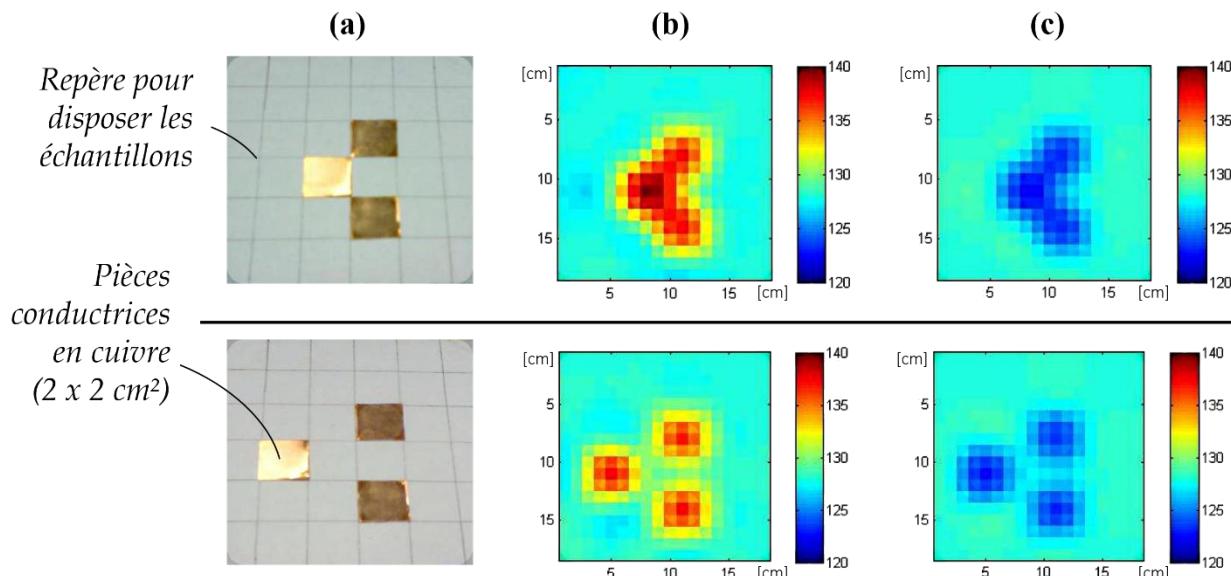


Figure 3.7 : (a) Disposition des échantillons sur un repère quadrillé et images CF de la partie réelle (b) et de la partie imaginaire (c) du signal [Hu_2009]

Un second capteur matriciel composé de bobines rectangulaires gravées sur film flexible est présenté dans [Ouyang_2009]. Cette fois-ci, c'est une mesure absolue qui est effectuée entre les éléments composants le capteur matriciel placés sur l'échantillon à inspecter, et un élément de référence placé sur un échantillon de même nature mais qui ne présente pas de défaut (cf. chapitre 1, section 1.2.4).

Deux configurations sont proposées : une première matrice composée de 4x24 bobines couvrant une superficie de $19 \times 110 \text{ mm}^2$ [Sun_2006] et une seconde composée de 3x10 éléments couvrant une superficie de $16 \times 51 \text{ mm}^2$ [Sun_2007]. La figure 3.8 montre la cartographie expérimentale obtenue dans le cas de la seconde configuration sur une plaque d'épaisseur 6,3 mm présentant cinq défauts de type entaille, traversant toute l'épaisseur de la pièce, et de dimensions : $2,5 \times 1,3 \text{ mm}^2$ (a), $1,5 \times 0,8 \text{ mm}^2$ (b), $0,8 \times 0,4 \text{ mm}^2$ (c), $0,5 \times 0,25 \text{ mm}^2$ (d) et $0,25 \times 0,13 \text{ mm}^2$ (e).

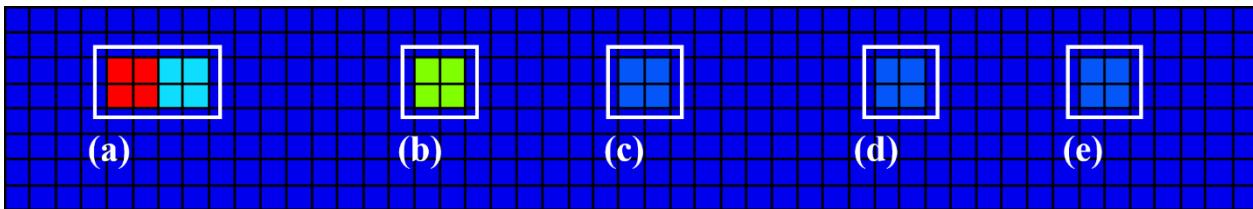


Figure 3.8 : Cartographie obtenue avec le capteur matriciel composé de 3x10 éléments sur une plaque en titane présentant cinq défauts de type entaille : $2,5 \times 1,3 \text{ mm}^2$ (a), $1,5 \times 0,8 \text{ mm}^2$ (b), $0,8 \times 0,4 \text{ mm}^2$ (c), $0,5 \times 0,25 \text{ mm}^2$ (d) et $0,25 \times 0,13 \text{ mm}^2$ (e) [IMTT_2007]

Un élément de réception est formé, semble-t-il, de quatre pixels (non précisé par l'auteur). La réponse du capteur est, pour les défauts (a) à (e), de 2, 1, 0,14, 0,12 et 0,08 V. En absence de défaut, la tension est nulle. Pour les défauts (b) à (e), seulement un élément perçoit le défaut contrairement au défaut (a) où deux éléments sont activés.

Un dispositif de bobines cylindriques gravées, du type fonctions séparées, visant à améliorer l'inspection d'un défaut selon son emplacement vis-à-vis des éléments est présenté dans le brevet [Lepage_2009]. La figure 3.9(a) illustre la couverture idéalisée du motif lors de l'emploi de deux éléments et la figure 3.9(b) pour quatre éléments. Dans le second cas, la zone de faible sensibilité située au centre des quatre bobines, est *a priori* couverte par le capteur. L'évaluation expérimentale de cet imageur n'est pas réalisée et le principe de fonctionnement n'est pas entièrement décrit.

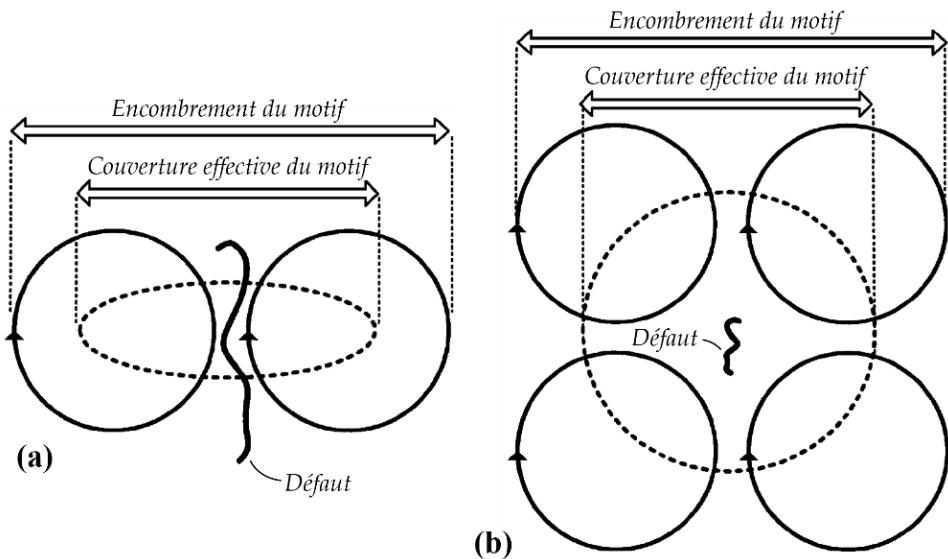


Figure 3.9 : Principe de la couverture effective du motif comportant deux éléments (a) et quatre éléments (b) [Lepage_2009]

Afin d'évaluer le gain de l'imagerie statique, une comparaison entre trois configurations de capteurs CF est présentée sur la figure 3.10. La bobine utilisée, commune aux trois configurations, présente un diamètre externe de 10 mm. La zone à inspecter est de $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Le capteur multiéléments, figure 3.10(b) est composé d'une barrette de 5 bobines et l'imageur statique d'une matrice de 5×5 bobines (cf. figure 3.10(c)). Pour cartographier la surface, un banc mécanique, dont la vitesse linéaire de déplacement est de 20 mm/s, est employé. Le banc permet aux capteurs monoélément et multiéléments de cartographier l'intégralité de la surface de la pièce.

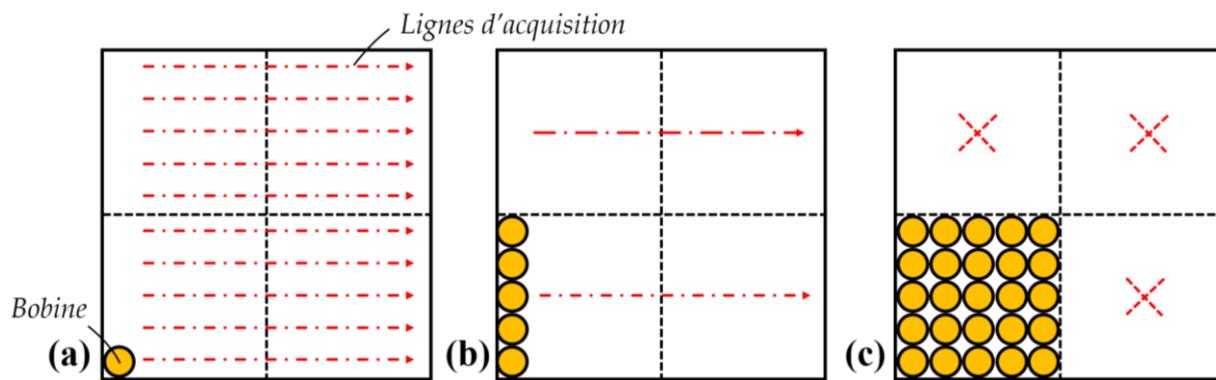


Figure 3.10 : Imagerie CF monoélément (a), multiéléments (b) et multiéléments statique (c)

Dans le cas du capteur monoélément, 1 minute et 40 secondes sont nécessaires pour effectuer les dix lignes permettant de cartographier la surface totale. Dans le cas du capteur multiéléments de type barrette, 20 secondes suffisent pour couvrir la surface. L'imageur multiéléments statique, quant à lui, réalise les quatre images nécessaires pour cartographier manuellement la surface en seulement quelques secondes. À noter que l'acquisition d'une image dépend du temps nécessaire pour faire la mesure sur l'ensemble des éléments composants la matrice.

3.2 TEST D'UN PREMIER PROTOTYPE

Un premier prototype a précédemment été réalisé au Laboratoire d'Instrumentation et Capteurs du CEA - LIST [[Decitre_2013](#)]. Ses caractéristiques et son principe de fonctionnement, à la base même de l'imageur développé dans le sous-chapitre [3.3](#), sont décrits. Une évaluation expérimentale du capteur est réalisée.

3.2.1 Description de l'imageur

Un premier imageur a été conçu [[Decitre_2013](#)]. La figure [3.11](#) montre la représentation d'un motif élémentaire composé d'une nappe émettrice dirigée selon y et d'un récepteur rectangulaire, du type bobine, mesurant la composante du champ magnétique selon x . Lorsque la nappe est alimentée, une acquisition de la tension aux bornes du récepteur est réalisée. L'axe préférentiel de détection de défaut est l'axe x qui correspond à une plus grande déviation des CF orientés selon y . Si le défaut est orienté selon l'axe y , alors la sensibilité du récepteur est très réduite.

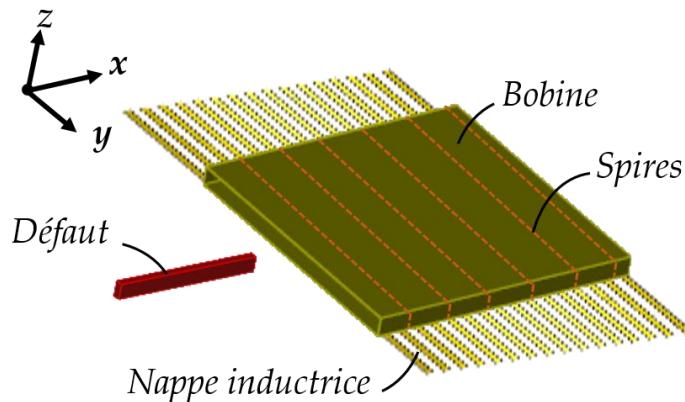


Figure 3.11 : Représentation du motif élémentaire

L'imageur a été réalisé sur un film Kapton constitué de deux couches de gravure. La réalisation des bobines réceptrices est peu commune : les spires sont bobinées, grâce à des via, entre les couches inférieure et supérieure du Kapton, autrement dit dans l'épaisseur du Kapton (cf. figure [3.12\(a\)](#)). Les via permettent de relier les pistes, situées sur différentes couches, entre elles. Les pistes de la nappe émettrice sont imbriquées entre les spires de la bobine réceptrice.

La disposition des éléments de réception et d'émission ainsi que la mise en série des bobines réceptrices sont décrites par la figure [3.12\(b\)](#). Les récepteurs sont reliés en série deux à deux horizontalement pour diminuer le nombre de fils d'alimentation, autrement dit de lignes de réception. Une ligne de réception est composée de deux éléments et la mise en série se fait avec un pas de deux éléments, soit 6,82 mm, suivant x (cf. figure [3.12\(b\)](#)) afin d'éviter qu'un récepteur soit couplé à plusieurs nappes émettrices. Le principe de fonctionnement du capteur est d'alimenter, l'une après l'autre, les nappes émettrices (E1 à E4 puis E1' à E4') et d'acquérir la réponse des quatre éléments de réception situés sur la nappe alimentée.

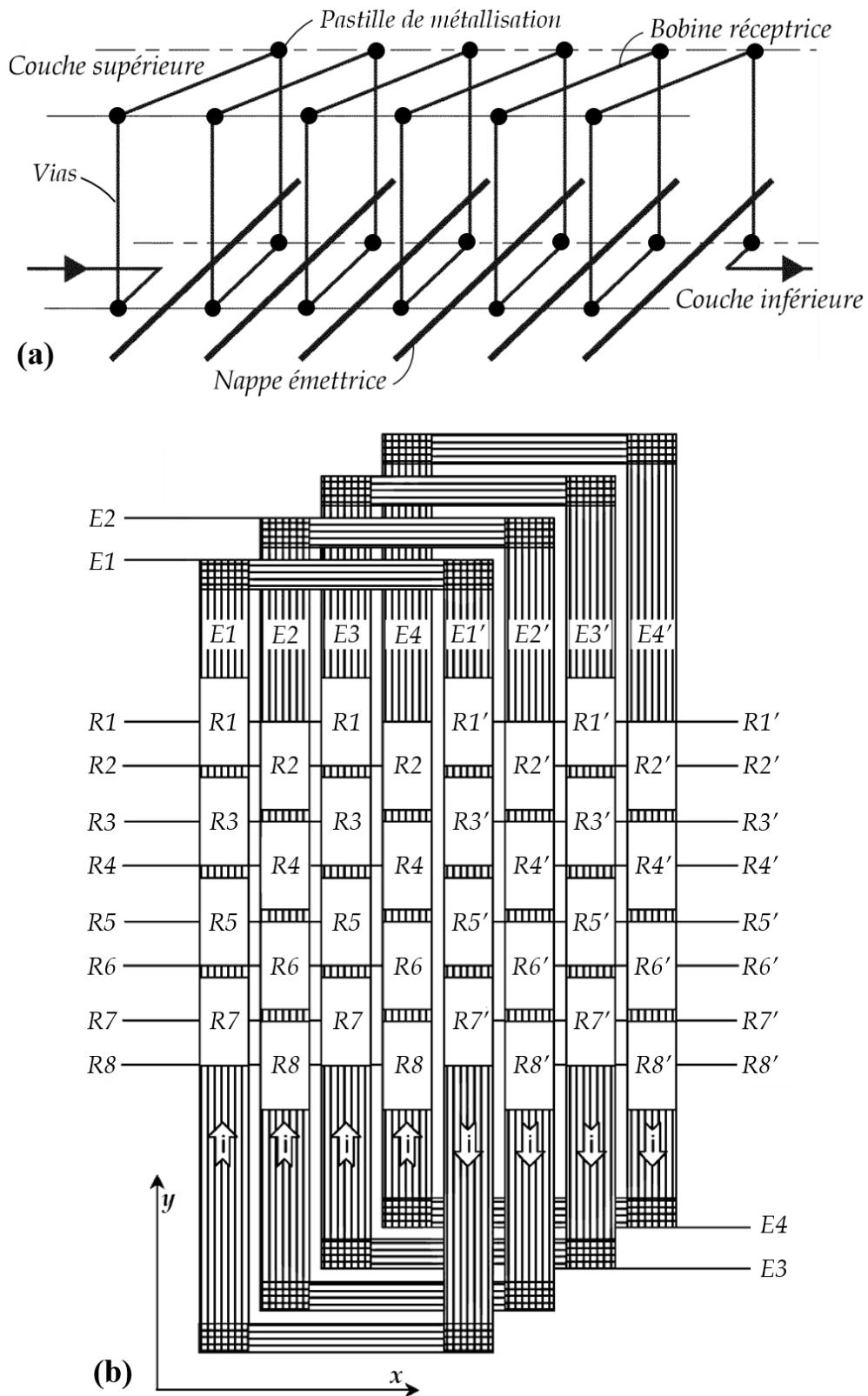


Figure 3.12 : (a) Bobinage des spires entre la couche inférieure et supérieure du Kapton.
 (b) Disposition des éléments [Decitre_2013]

La configuration matricielle des éléments, présentée en figure 3.12(b), est basée sur l'utilisation :

- de 8 nappes émettrices, composées chacune de 6 pistes selon y , dont les nappes sont parallèles entre elles, équidistantes et disposées proches les unes des autres;
- d'une matrice de 8×4 bobines réceptrices orientées selon l'axe x . Les bobines réceptrices sont composées de 6 spires. La surface occupée par un élément de réception, dans le plan xy , est de $2,6 \times 3,3 \text{ mm}^2$ et la surface totale de la partie active du capteur est de $13,2 \times 28,1 \text{ mm}^2$. L'épaisseur des bobines réceptrices correspond à l'épaisseur totale du film Kapton soit $150 \mu\text{m}$.

La figure 3.13(a) montre le prototype réalisé sur film Kapton ainsi que le zoom de la partie active du capteur (cf. figure 3.13(b)). La largeur des pistes et l'isolement inter pistes est de $80 \mu\text{m}$, le diamètre des pastilles utilisées au niveau des vias est de $270 \mu\text{m}$.

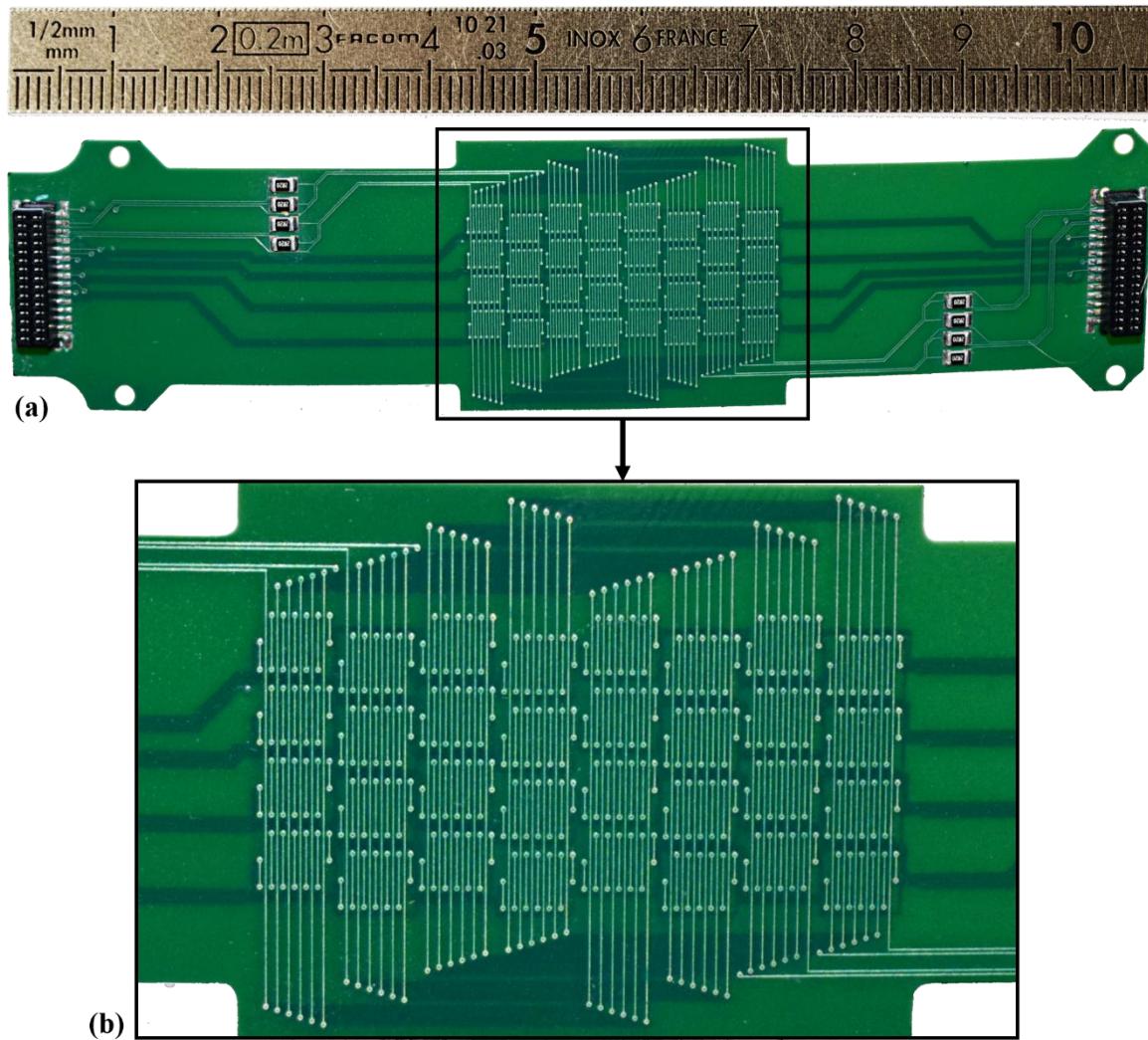


Figure 3.13 : (a) Prototype réalisé sur film Kapton. (b) Zoom de la partie active du capteur

3.2.2 Mise en œuvre du prototype

Pour évaluer le capteur, une maquette en aluminium comprenant deux défauts de type entaille est utilisée. Les défauts ont une longueur de 3 et 5 mm, une ouverture de 0,1 mm et une profondeur respectivement de 0,8 et 0,2 mm. La conductivité électrique du matériau est estimée à 14 MS/m et les mesures sont effectuées à 1 MHz. Pour les cartographies présentées, seulement 16 éléments sont utilisés sur les 32 qui composent le capteur matriciel. Les figures 3.14(a) et 3.14(b) montrent les cartographies expérimentales respectives des défauts de 5 mm et de 3 mm de long dans des cas favorables ; c'est-à-dire que le défaut est placé au niveau du centre d'un élément de réception. Les figures 3.14(c) et 3.14(d), quant à elles, montrent les cartographies des défauts de 5 mm et de 3 mm de long dans des cas défavorables ; c'est-à-dire que le défaut est situé au milieu de deux éléments de réception. Les résultats sont donnés en pourcentage par rapport à l'amplitude maximale obtenue lors de l'acquisition de la cartographie du défaut de 5 mm dans le cas favorable (cf. figure 3.14(a)). Les défauts sont orientés selon l'axe x.

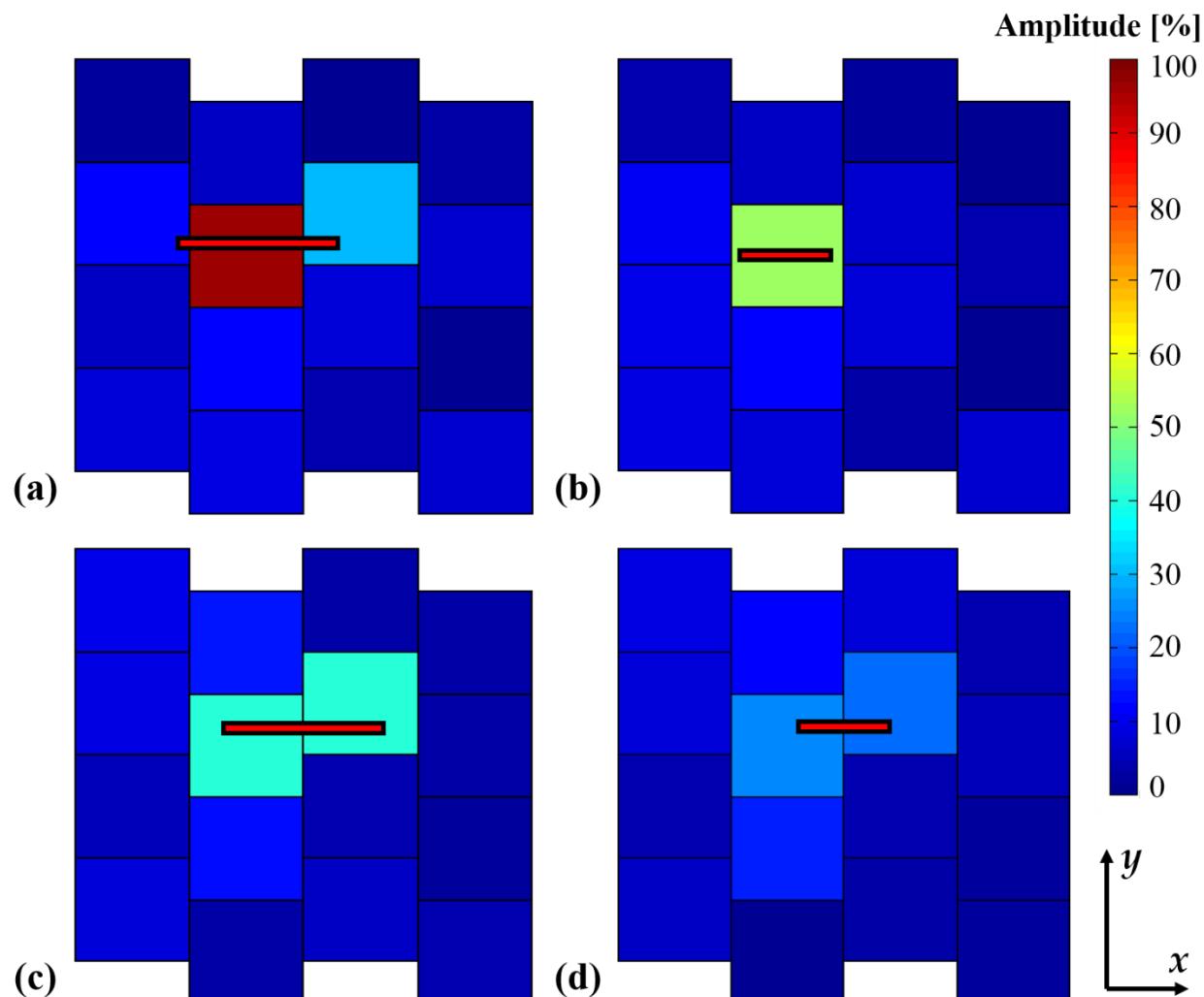


Figure 3.14 : Cartographies à 1 MHz d'une entaille de 5 mm (cas favorable (a) et défavorable (c)) et de 3 mm de long (cas favorable (b) et défavorable (d)) (maquette en aluminium)

Les cartographies présentées en figure 3.14(c et d), c'est-à-dire dans les cas défavorables, donnent au mieux une amplitude de 42 % et de 25 % des éléments de réception pour les défauts de 5 et 2 mm. Dans le second exemple, la probabilité de détection du défaut est très faible du fait du placement du défaut et de sa taille.

Une seconde série de tests est réalisée sur maquette en acier inoxydable 304L constituée de deux défauts de type entaille. Les défauts ont une longueur de 2 et 4 mm, une ouverture de 0,2 mm et une profondeur de 1 mm. La conductivité électrique est estimée à 1,4 MS/m et les mesures sont réalisées à 1 MHz. Deux éléments récepteurs accolés selon x, par exemple R1 et R2 (cf. figure 3.12(b)), se déplacent progressivement sur un défaut. Le principe est décrit par la figure 3.15(a). Les figures 3.15(b) et 3.15(c) représentent les acquisitions obtenues expérimentalement lorsque les récepteurs sont au passage des défauts de 4 mm et de 2 mm. L'intersection des deux réponses, représentée par l'abscisse de la croix rouge, correspond à la position pour laquelle le défaut est le moins bien détecté.

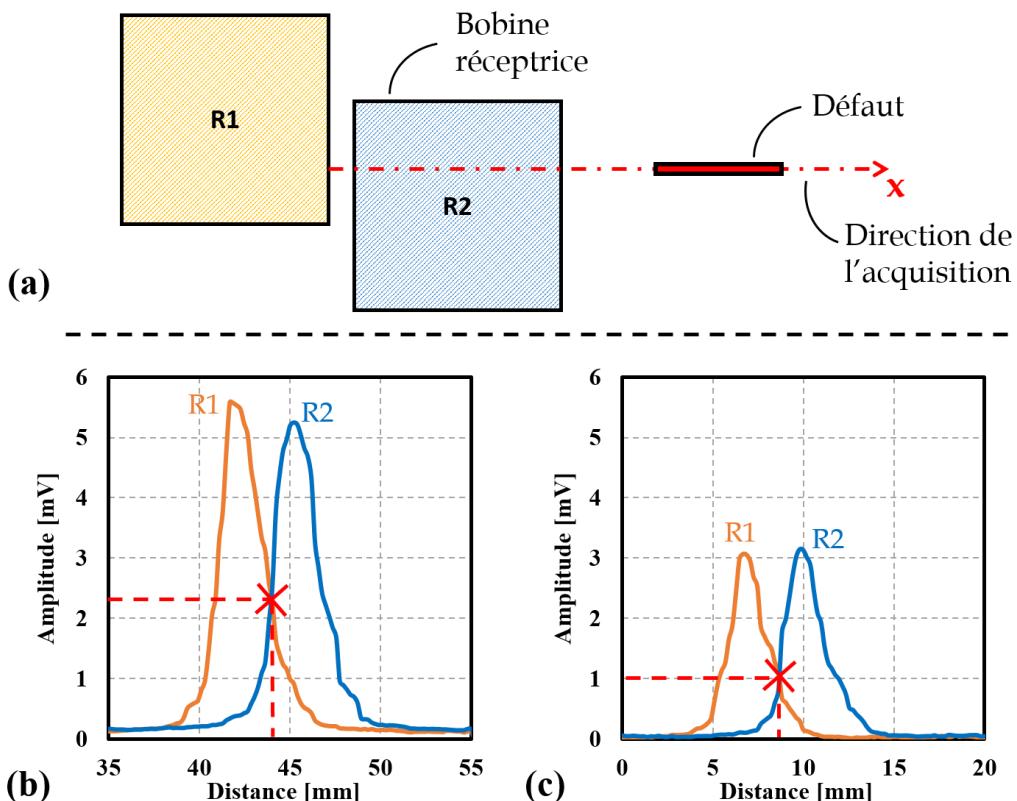


Figure 3.15 : (a) Description de l'acquisition. Mesures obtenues à 1 MHz avec deux récepteurs accolés pour une entaille de 4 mm (b) et de 2 mm (c) de long (maquette en inox 304L)

Dans le cas du défaut de 4 mm, à l'intersection des deux courbes, le signal est de 2,3 mV et de 1 mV pour le défaut de 2 mm. En comparaison de l'amplitude maximale obtenue dans le cas du défaut de 4 mm (5,5 mV) on obtient respectivement 42 % et 18 % pour les défauts de 4 mm et 2 mm dans les cas défavorables. Le rapport signal à bruit (RSB), dont le mode de calcul est détaillé en annexe B, est respectivement de 26 dB et 19 dB pour le défaut de 4 mm et de 2 mm dans le meilleur des cas.

Enfin, des simulations sont réalisées via la plateforme de simulation CIVA. Le but de ces simulations est de déterminer la longueur minimale d'un défaut, orienté selon l'axe x, détectée par l'imageur quel que soit l'emplacement du défaut vis-à-vis des bobines réceptrices. Pour cela, on cherche à obtenir un signal supérieur à 50 % de l'amplitude maximale obtenue dans le cas d'un défaut de 5 mm afin de garantir un RSB suffisamment grand. La figure 3.16 montre les simulations des cartographies réalisées à 1 MHz dans le cas d'un défaut de type entaille de 6 mm et 5 mm de long, d'ouverture 0,1 mm et de profondeur 0,2 mm. La conductivité de la pièce est prise égale à 14 MS/m.

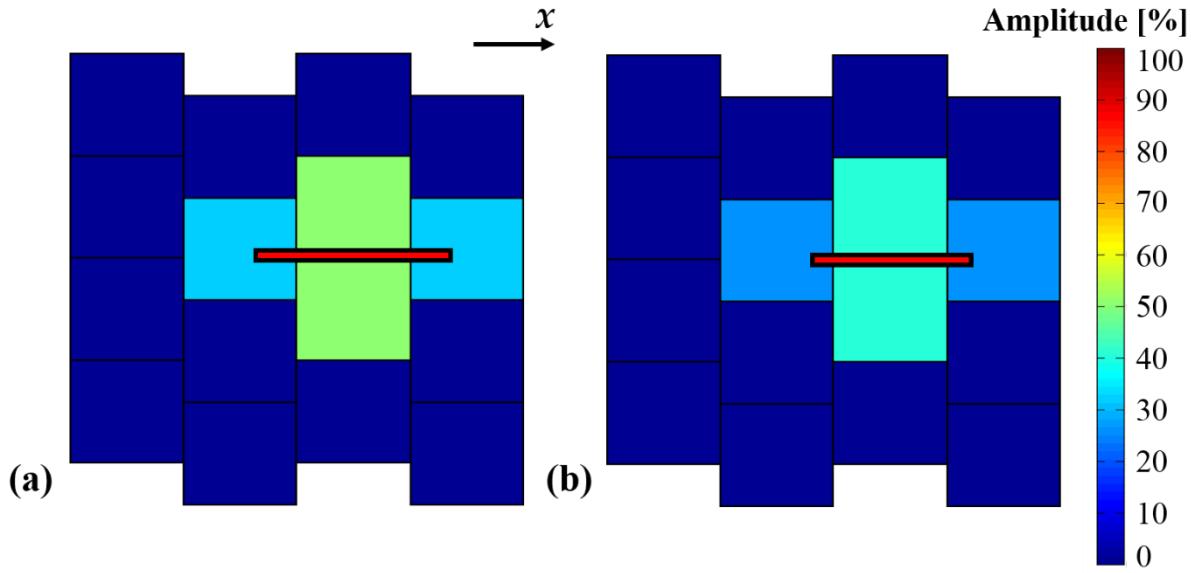


Figure 3.16 : Cartographies simulées à 1 MHz d'entailles de 6 mm (a) et 5 mm (b) de long situées entre deux éléments de réception

On constate que dans le cas défavorable du défaut de 6 mm, la réponse des bobines est de 50 % et atteint le critère fixé précédemment. Par contre, pour un défaut de 5 mm de long, l'amplitude de la réponse des bobines est plus faible (42 %). Les défauts orientés selon x qui ont une longueur inférieure à 6 mm sont probablement peu voire pas détectés par l'imageur dans le cas le plus défavorable mais peuvent être potentiellement détectés dans certaines positions.

En conclusion, ce prototype présente de bonnes performances au vu des cartographies obtenues et des RSB évalués. Ce premier imageur a permis de valider expérimentalement l'acquisition d'une image, sans déplacement du capteur, ainsi que le principe des éléments récepteurs bobinés dans l'épaisseur du Kapton.

Compte tenu de l'amplitude et de la forme des signaux obtenus, une configuration similaire au prototype décrit précédemment a été utilisée dans le cadre de la thèse pour réaliser un second imageur. Ce second capteur a pour but d'améliorer les performances du prototype afin d'inspecter des défauts de plus petites dimensions. Les études de la partie mécanique et de l'électronique, qui est par ailleurs intégrée dans le corps du capteur, ont été réalisées et sont présentées dans le sous-chapitre suivant.

3.3 OPTIMISATION DU MOTIF ÉLÉMENTAIRE

L'augmentation des performances du prototype présenté précédemment nécessite d'augmenter la densité des spires des bobines en vue d'inspecter des défauts de plus petites dimensions. Pour cela, il faut réduire aux limites technologiques actuelles, la finesse de gravure des pistes électriques et le diamètre des pastilles utilisées au niveau des vias. La largeur des pistes et l'isolement inter pistes minimale est de 15 μm , au lieu de 80 μm , avec une métallisation des vias de 75 μm de diamètre contre 270 μm dans le cas du prototype. De plus, le second imageur est réalisé sur film Kapton constitué de quatre couches de gravure au lieu de deux.

Des simulations montrent, en tenant compte de ces paramètres, un espoir de détecter des longueurs de défauts supérieures ou égales à 1 mm dans le cas où les défauts seraient orientés selon l'axe x (cf. figure 3.11). Les paramètres pris en compte pour optimiser le capteur dans la suite de l'étude sont :

- obtenir un signal de réponse maximal;
- améliorer la résolution spatiale ;
- maximiser l'amplitude du signal due au défaut par rapport au couplage émetteur/récepteur.

3.3.1 Choix de la composante de champ magnétique à mesurer

En grande majorité, les capteurs CF mesurent la composante normale du champ magnétique au plan de la surface de l'échantillon : c'est d'ailleurs le cas pour l'intégralité des capteurs présentés dans le sous-chapitre 3.1. Au regard de la composition des bobines réceptrices du prototype, un champ magnétique tangentiel à la surface du matériau est mesuré. Une étude par simulation avec CIVA de la réponse du motif élémentaire du prototype en fonction de son orientation, selon trois axes, est proposée dans cette section. On s'intéresse à savoir quelle est judicieusement choisie pour réaliser un imageur statique.

La figure 3.17 montre la position de la bobine réceptrice selon trois axes (x, y et z) et la nappe émettrice est dirigée selon un axe (y). Le champ B selon z représente la composante normale et les champs selon x et y les composantes tangentielles du champ magnétique par rapport à la surface de l'échantillon. Le défaut simulé est de 5 mm de long, d'ouverture 0,1 mm, de profondeur 0,5 mm et orienté selon l'axe x. Les simulations sont réalisées à 1 MHz avec un courant d'excitation de 100 mA. La cartographie obtenue de la partie réelle du signal, lorsque le récepteur se déplace par rapport au défaut, est présentée dans les trois cas ainsi qu'une coupe horizontale de cette dernière, représentée par une flèche rouge en pointillé. Dans cet exemple, la partie réelle correspond à l'axe où la sensibilité est la plus importante par rapport à la partie imaginaire ou bien le module du signal. De plus, c'est le signal lié au défaut qui est évalué et non le signal complet qui prend aussi en compte le couplage entre la bobine réceptrice et la nappe émettrice.

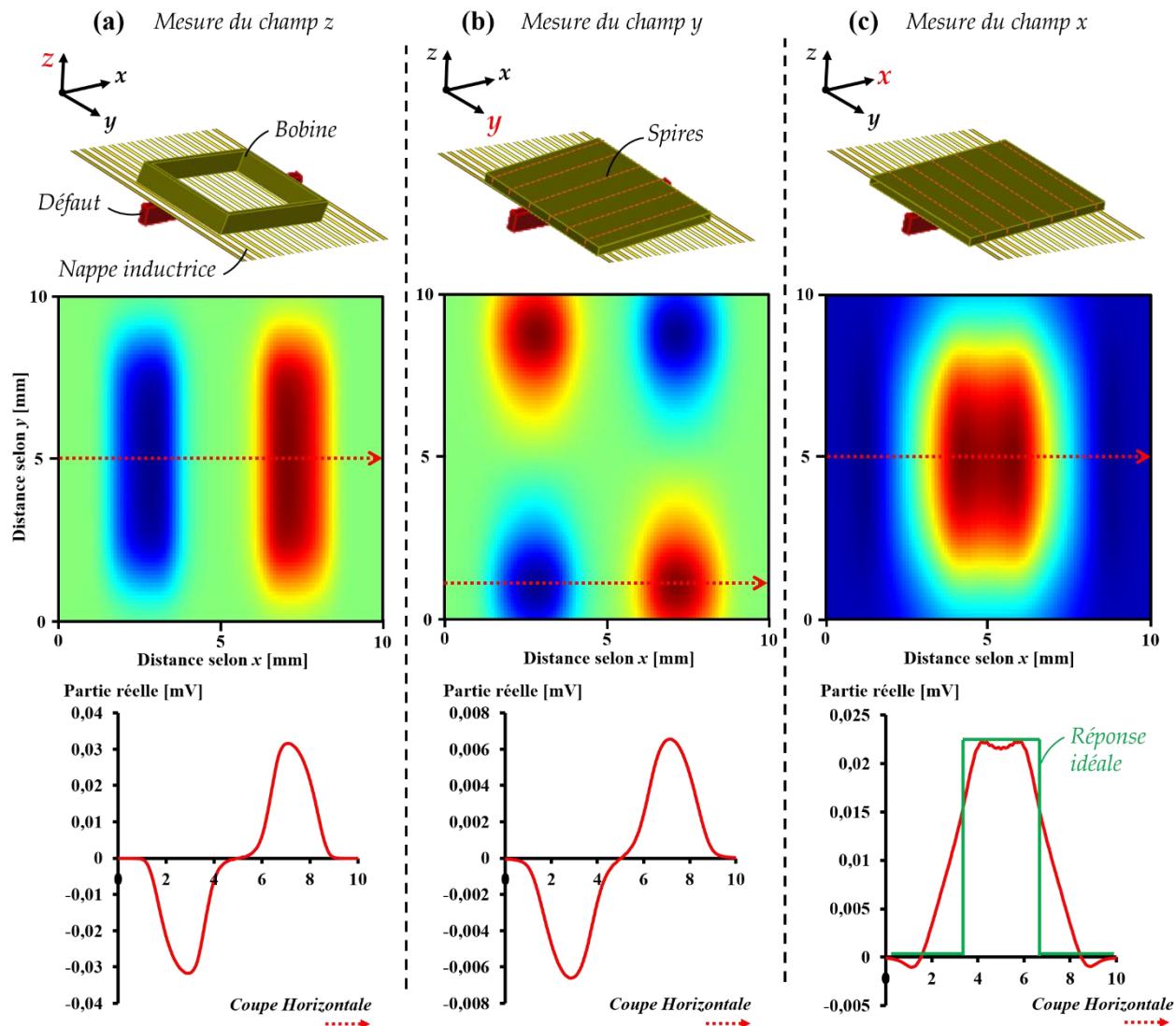


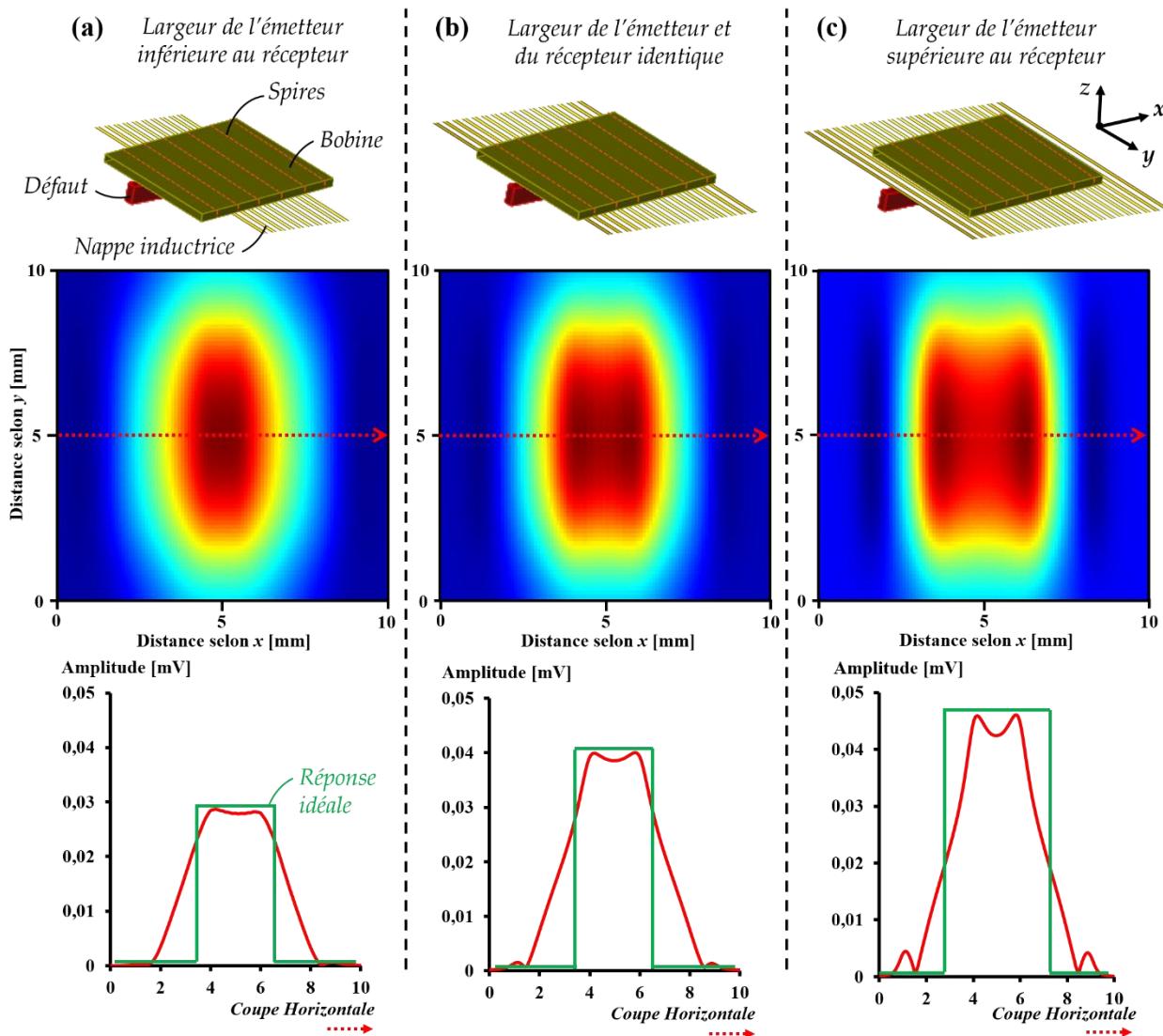
Figure 3.17 : Réponse du capteur à 1 MHz selon les axes du récepteur x (a), y (b) et z (c)

On constate que l'orientation de la bobine selon l'axe x conduit à une réponse quasi unipolaire, contrairement aux directions y et z, de plus non nulle au niveau du défaut. Dans cet exemple, la réponse de la bobine selon l'axe x est proche de la fonction « porte », représentée par le créneau vert dont la largeur correspond au pas minimum possible entre deux motifs (3 mm dans ce cas). Cette propriété intéressante permet de juxtaposer spatialement dans le plan xy des motifs élémentaires pour couvrir une surface en une seule couche d'éléments : la sensibilité est alors quasi identique pour tous les éléments car l'entrefer est constant sur toute la surface.

Le motif élémentaire à la base du second capteur conserve donc les caractéristiques du prototype en mesurant la composante du champ magnétique selon l'axe x. Dans un premier temps, pour réaliser le motif, l'émetteur est étudié.

3.3.2 Étude de l'émetteur

Pour optimiser l'émetteur, on s'est intéressé à la largeur de la nappe inductrice par rapport à la largeur de la bobine réceptrice. Le motif élémentaire de l'imageur prototype est utilisé comme exemple. La figure 3.18 montre les simulations réalisées lorsque la largeur de la nappe émettrice est inférieure (1,6 mm), environ égale (2,8 mm) et supérieure (4 mm) à la largeur de la bobine réceptrice (3 mm) tout en conservant une densité de spires constante. Le défaut simulé est de 5 mm de long, d'ouverture 0,1 mm, de profondeur 0,5 mm et orienté selon l'axe x. Les simulations sont réalisées à 1 MHz avec un courant d'excitation de 100 mA. Dans les trois cas, la cartographie de l'amplitude (ou module) du signal est présentée ainsi qu'une coupe horizontale de cette dernière, représentée par une flèche rouge en pointillé. Les cartographies sont obtenues par déplacement du récepteur par rapport au défaut. Comme dans le cas de la figure 3.17, le signal lié au défaut est évalué.



On remarque par simulation que lorsque l'on diminue le nombre de pistes des nappes émettrices (cf. figure 3.18(a)), la forme du signal se rapproche de la réponse idéale mais par contre l'amplitude du signal chute de 28 % par rapport au cas où la largeur de l'émetteur est quasi identique à celui du récepteur. Dans le cas contraire, lorsque l'on augmente le nombre de pistes (cf. figure 3.18(c)), le signal augmente de 15 %. On constate également que le signal (en rouge) coupe la fonction porte (en vert) pour une valeur relative inférieure au cas (b) si bien qu'en juxtaposant spatialement les éléments, une sensibilité assez faible sera obtenue. En définitive, il est préférable que la largeur de la nappe émettrice soit quasi identique à celle de la bobine réceptrice (cf. figure 3.18(b)). Cette configuration présente le meilleur compromis entre la forme et l'amplitude du signal obtenu. L'optimisation de la partie réceptrice est présentée dans la section suivante.

3.3.3 Étude du récepteur

Pour optimiser la bobine réceptrice, différents paramètres sont étudiés tels que sa forme, son nombre de spires ou bien ses dimensions géométriques en accord avec les limites de faisabilité pour réaliser le Kapton. L'évaluation individuelle des paramètres du récepteur permet de définir la configuration finale du motif. Ces paramètres sont présentés ci-dessous :

- La forme des bobines réceptrices :

Le choix de la forme est important pour pavier uniformément la surface active du capteur. La figure 3.19 montre quatre exemples de formes possibles : l'hexagone, la croix, le trapèze et le parallélogramme. Afin de sélectionner la forme adéquate, il faut s'assurer qu'un défaut de 1 mm de long, placé dans la zone où la sensibilité du capteur est la plus faible, obtient au moins 50 % de l'amplitude maximale (cf. figure 3.15). La forme rectangulaire n'est pas représentée dans cet exemple car cette forme est considérée comme un cas particulier du parallélogramme.

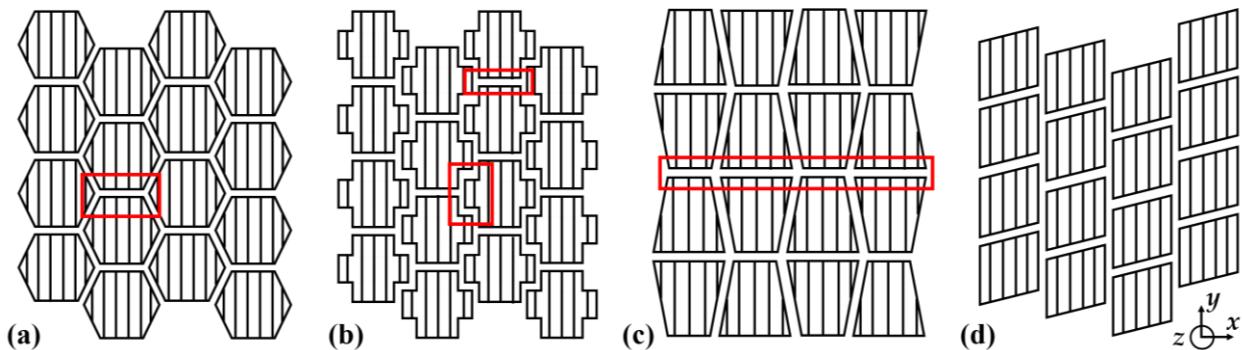


Figure 3.19 : Différentes formes de bobines réceptrices : hexagone (a), croix (b), trapèze (c) et parallélogramme (d)

Après simulation de ces motifs, on a pu constater que l'utilisation d'une forme relativement complexe (cf. figure 3.19(a, b et c)) fait apparaître des zones aveugles qui sont représentées par les rectangles rouges. Ces zones s'expliquent par une faible surface des spires au niveau des extrémités des bobines réceptrices. Le parallélogramme, montré dans la figure 3.19(d), a l'avantage de présenter une surface de spires identique sur toute sa longueur : cette forme a été retenue.

- L'encombrement de la bobine dans le plan xy et le nombre de spires :

Ces deux paramètres dépendent l'un de l'autre. En effet, en augmentant le nombre de spires, la longueur selon x de la bobine gravée augmente car il n'est pas possible d'empiler les spires. Pour déterminer ces paramètres, les critères suivants sont évalués :

- obtenir un signal important en présence d'un défaut. En se basant sur l'imageur prototype présenté précédemment, à 1 MHz, avec un courant d'excitation de 100 mA par spire à travers la nappe émettrice, une amplitude supérieure à 0,02 mV de la bobine réceptrice due à un défaut de 1 mm de long, est souhaitée. Avec une tension d'au moins 0,02 mV en simulation, le RSB du capteur est expérimentalement d'environ 20 dB ;
- éliminer les zones aveugles du capteur. Pour un défaut de 1 mm de long, 50 % de l'amplitude maximale est souhaitée lorsque le défaut est placé dans la zone où la sensibilité du capteur est la plus faible.

Du fait des dépendances entre ces deux critères, un compromis est effectivement à faire. Par exemple, l'augmentation de la largeur selon y des spires ou de la longueur selon x de la bobine réceptrice permet une amélioration du signal de réponse. En revanche, l'amplitude est impactée au niveau de la zone du capteur où la sensibilité est la plus faible.

- L'inclinaison du parallélogramme :

Pour réaliser l'inclinaison du parallélogramme, un décalage selon y entre les spires de la bobine réceptrice est nécessaire (cf. figure 3.20(a)). La figure 3.20(b) montre la variation de l'amplitude relative du signal lorsque le récepteur est centré sur le défaut (courbe bleue) et lorsque le défaut est placé entre deux éléments de réception, autrement dit dans la zone de faible sensibilité du capteur (courbe rouge). Cette variation est calculée par rapport à un décalage initial de 0 μm entre les spires, c'est-à-dire lorsque le récepteur à une forme rectangulaire, où la sensibilité du capteur est maximale. Lors des simulations, le décalage varie selon y de 0 μm à 300 μm . Le défaut simulé est de 1 mm de long, d'ouverture 0,1 mm, de profondeur 0,2 mm et orienté selon l'axe x .

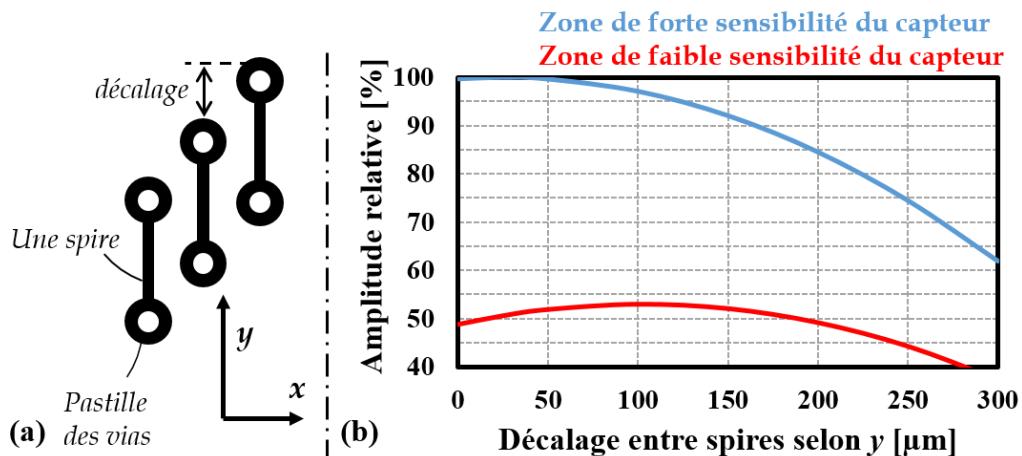


Figure 3.20 : (a) Représentation du décalage selon y des spires. (b) Simulations à 1 MHz de l'amplitude relative du signal dans la zone de forte et faible sensibilité du capteur en fonction du décalage entre spires

Ce décalage permet d'améliorer, pour un décalage compris entre 100 μm et 150 μm , d'environ 2 à 3 % le signal au niveau de la zone du capteur où la sensibilité est la plus faible par rapport à la forme du récepteur rectangulaire. En revanche, l'augmentation du décalage entre les spires abaisse de façon non négligeable le signal de réponse de la bobine réceptrice en présence d'un défaut. Par exemple, pour un décalage de 200 μm , l'amplitude relative du signal baisse de 18 % et pour un décalage de 300 μm , l'amplitude chute de 26 %.

- Étude du pas lors de la mise en série des bobines réceptrices :

Afin de relier en série les bobines réceptrices, le pas entre les éléments est étudié. La figure 3.21(b) montre la variation obtenue par simulation de la tension aux bornes d'une bobine réceptrice lorsqu'elle s'éloigne selon x de la nappe inductrice alimentée. Le motif élémentaire de l'imageur prototype est employé (cf. figure 3.18(b)). Cette variation est calculée par rapport à la position 0 lorsque la bobine réceptrice est centrée et au-dessus de la nappe émettrice. La bobine réceptrice est ensuite décalée selon x au niveau des positions 1, 2 et 3 (cf. figure 3.21 (a)). Le défaut simulé est de 5 mm de long, d'ouverture 0,1 mm, de profondeur 0,5 mm, orienté selon l'axe x et centré par rapport à la bobine réceptrice.

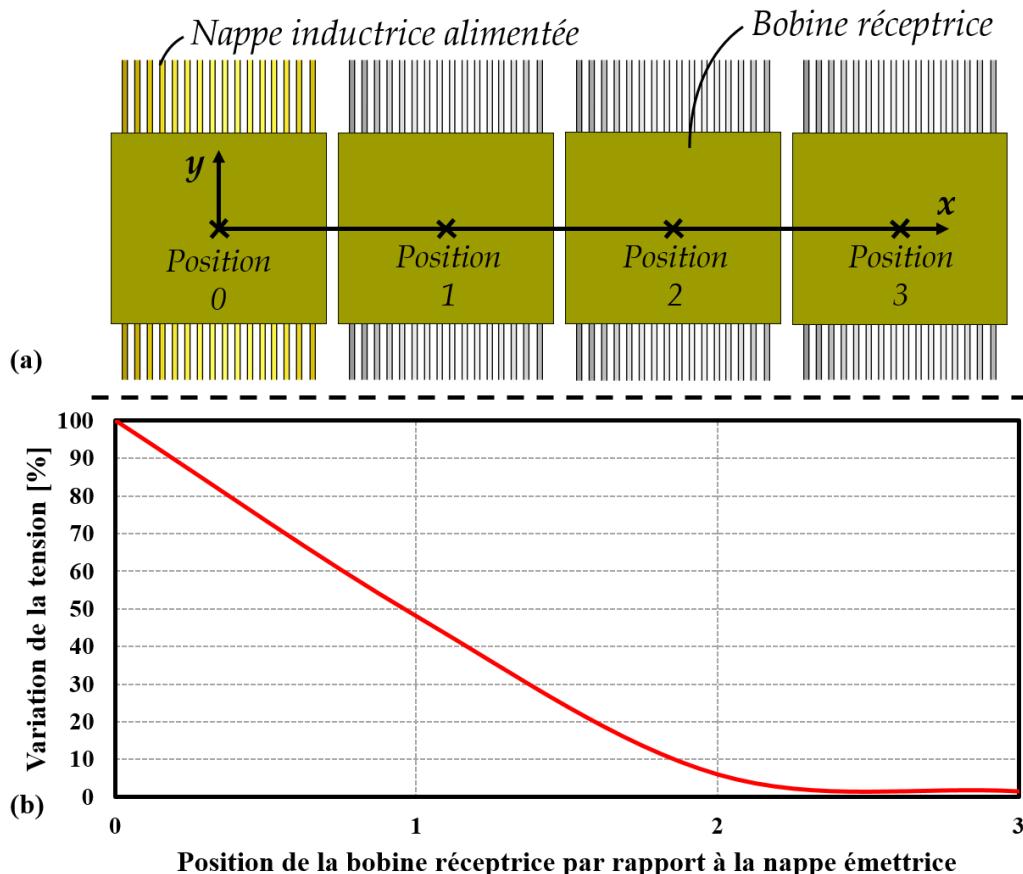


Figure 3.21 : (a) Description du décalage de la bobine réceptrice par rapport à la nappe inductrice selon x (vue de dessus). (b) Simulations à 1 MHz de la variation de la tension aux bornes de la bobine réceptrice en fonction de sa position par rapport à la nappe émettrice

En augmentant le pas, le couplage décroît rapidement. En effet, le couplage est de 48, 6 et 1 % lorsque la bobine réceptrice est respectivement au niveau des positions 1, 2 et 3 (cf. figure 3.21(a)). Le pas entre éléments est seulement limité par la configuration du capteur matriciel et, plus particulièrement, par le nombre d'émetteurs et de récepteurs que l'on souhaite employer. La minimisation du couplage est nécessaire lorsque l'on souhaite mettre en série plusieurs bobines de réception comme c'est le cas de l'imageur prototype. La mise en série d'éléments de réception permet effectivement de réduire le nombre de fils d'alimentation et donc les amplificateurs opérationnels (AOP) servant à amplifier le signal de réponse des récepteurs.

- Le décalage entre les éléments placés en colonnes :

Dans le but de réduire la zone du capteur où la sensibilité est la plus faible, un décalage selon y entre les colonnes du capteur matriciel est réalisé (cf. figure 3.22(a)). La bobine réceptrice A et le défaut restent fixes et seule la bobine réceptrice B est décalée. Ce décalage a effectivement vocation d'améliorer le signal au niveau de la zone du capteur où la sensibilité est la plus faible [Kurokawa_2015]. Pour illustrer l'effet de ce décalage, le motif élémentaire de l'imageur prototype est utilisé. La figure 3.22(b) montre la variation de l'amplitude du signal du récepteur B lorsque le défaut est placé dans la zone de faible sensibilité du capteur. Cette variation est calculée par rapport à un décalage initial de 0 mm entre les bobines réceptrices A et B. Lors des simulations, le décalage varie selon y de 0 mm à 2,6 mm qui correspond à la largeur d'une bobine de réception (cf. figure 3.22(a)). Le défaut simulé est de 5 mm de long, d'ouverture 0,1 mm, de profondeur 0,5 mm et orienté selon l'axe x .

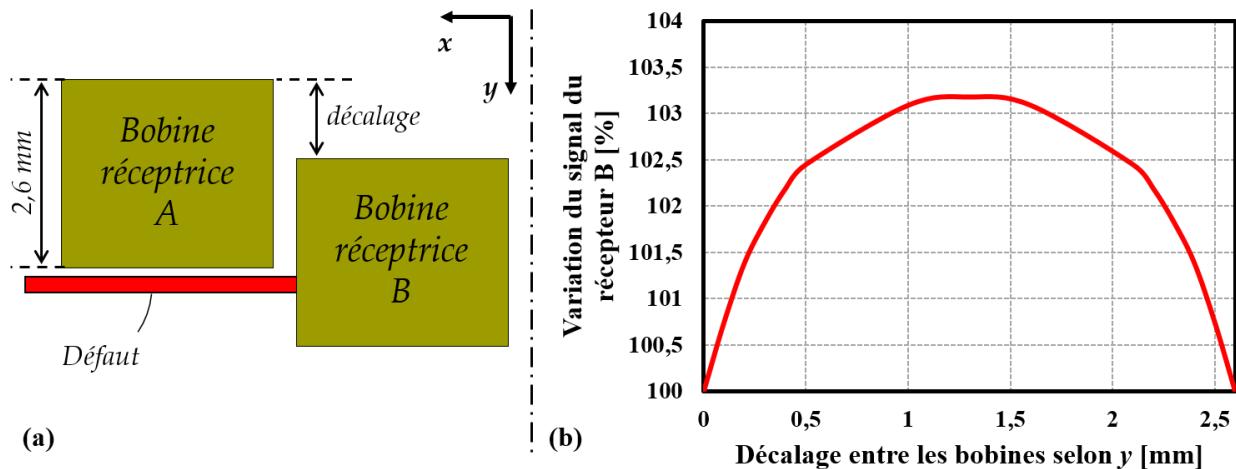


Figure 3.22 : (a) Représentation du décalage selon y des bobines réceptrices A et B (vue du dessus). (b) Simulations à 1 MHz de la variation de l'amplitude du signal du récepteur B dans la zone de faible sensibilité du capteur en fonction du décalage entre les bobines A et B

Le décalage entre les bobines selon y permet d'améliorer jusqu'à 3 % environ le signal au niveau de la zone du capteur où la sensibilité est la plus faible pour un décalage de 1,3 mm, soit la demi-largeur d'une bobine réceptrice. Néanmoins, la valeur du décalage entre deux colonnes de bobines est limitée par les contraintes lors de la réalisation du Kapton et par le routage des pistes d'alimentations permettant de relier les bobines réceptrices entre elles.

- L'épaisseur du Kapton selon z :

Afin d'augmenter l'amplitude du signal en présence d'un défaut, la hauteur, ou autrement dit l'épaisseur de la bobine réceptrice est accrue (cf. figure 3.23(a)). Pour illustrer la modification de la hauteur d'une bobine, le motif élémentaire de l'imageur prototype est utilisé. La figure 3.23(b) montre la variation de l'amplitude du signal lorsque le défaut est placé au centre d'un élément de réception. Cette variation est calculée par rapport à une hauteur initiale de la bobine de 150 μm correspondant à l'épaisseur du Kapton utilisé pour la fabrication du prototype. Lors des simulations, la hauteur de la bobine varie selon z de 150 μm à 200 μm . Le défaut simulé est de 5 mm de long, d'ouverture 0,1 mm, de profondeur 0,5 mm, orienté selon l'axe x et centré par rapport à la bobine réceptrice.

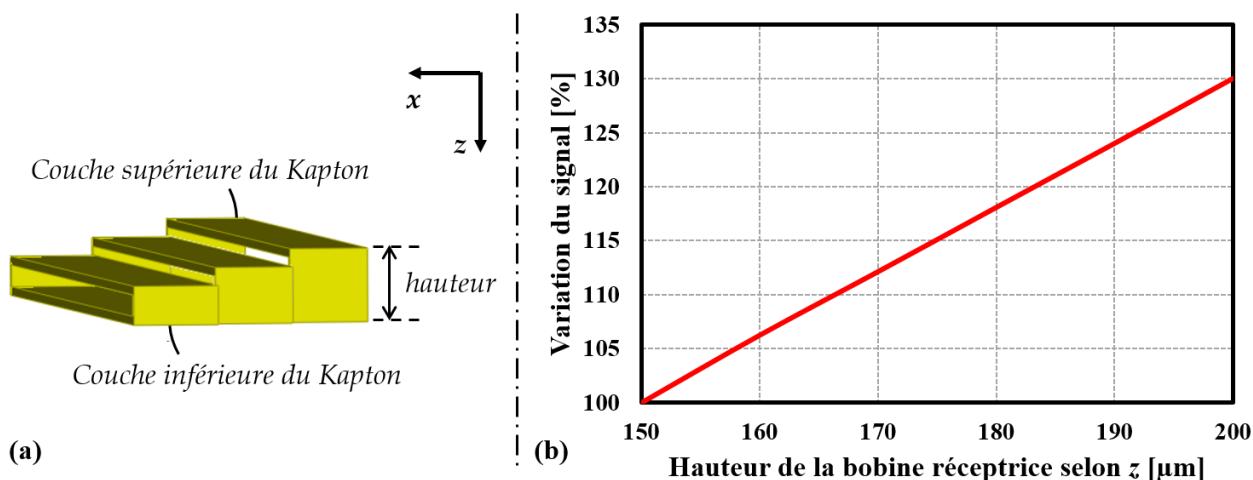


Figure 3.23 : (a) Représentation de l'augmentation de la hauteur d'une bobine réceptrice selon z (vue de profil). (b) Simulations à 1 MHz de la variation de l'amplitude du signal en fonction de la hauteur d'une bobine réceptrice lorsque le défaut est centré sur un élément de réception

On constate que l'amplitude maximale du signal aux bornes de la bobine réceptrice est quasiment proportionnelle à l'épaisseur de cette dernière. En revanche, l'épaisseur des bobines réceptrices est limitée par des critères technologiques : elle est définie par l'épaisseur du film Kapton employé.

3.3.4 Spécifications du capteur flexible

Au regard de ces nombreux paramètres, un motif est proposé et réalisé sur film Kapton. Le film Kapton, constitué de quatre couches, est composé de la façon suivante (cf. figure 3.24) : les nappes émettrices se situent sur la première couche de cuivre, c'est-à-dire au plus proche du matériau à inspecter, et les bobines réceptrices sont bobinées entre la seconde et la quatrième couche de cuivre afin d'augmenter l'épaisseur des bobines.

Le positionnement des nappes émettrices sur la couche inférieure de cuivre (n°1), au lieu de la couche supérieure (n°4), permet d'augmenter le signal dû à un défaut. Dans le cas de l'imageur prototype, lorsque la bobine est en présence d'un défaut de 5 mm de long, d'ouverture 0,1 mm et de profondeur 0,5 mm, l'amplitude maximale de la tension aux bornes de la bobine réceptrice est par simulation de 0,04 mV (cf. figure 3.18(b)). En déplaçant la couche de cuivre n°1 au-dessus de la couche de cuivre n°4, la tension aux bornes de la bobine réceptrice pour un même défaut est maintenant de 0,036 mV, soit une diminution de 10 %.

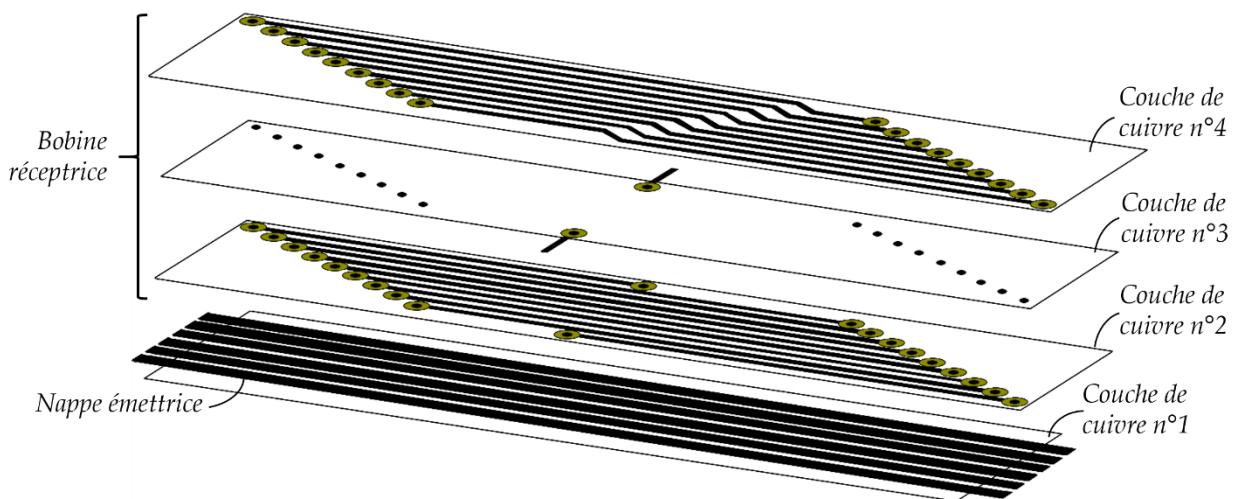


Figure 3.24 : Disposition de la nappe émettrice et de la bobine réceptrice sur les couches du Kapton

Lors de la réalisation du motif, le prestataire qui a conçu le film Kapton n'a finalement pas pu maintenir les dimensions de gravure précédemment annoncées. La largeur des pistes et l'isolation inter pistes minimale sont passés de 15 µm à 35 µm et la métallisation des via de 75 µm à 110 µm.

Au final, la configuration matricielle des éléments est basée sur l'utilisation :

- de 48 nappes émettrices composées de 6 pistes selon y qui sont parallèles entre elles;
- d'une matrice de 12x48 bobines réceptrices, orientées selon l'axe x, soit un total de 72 lignes de réception composées de 8 bobines réceptrices chacune. La surface de la partie active du capteur, constituée de 576 éléments, est de 31 x 35 mm².

La figure 3.25 montre une partie de la zone active du capteur après les modifications apportées par le prestataire qui a fabriqué le circuit imprimé flexible. En résumé, la bobine réceptrice, de type parallélogramme, comporte 9 spires et couvre une surface $a \times b$ de $2,11 \times 0,665$ mm². Le décalage e entre deux spires est de 0,145 mm et le décalage d entre deux colonnes est de 0,13 mm. La distance g de 0,11 mm, entre deux éléments, est plus importante que la distance f (0,04 mm) du fait de la construction du motif et des contraintes géométriques de routage. La largeur c de la nappe émettrice est de 0,565 mm. La distance h entre deux éléments situés sur une même colonne est de 0,235 mm. La mise en série des éléments de réception est réalisée avec un pas de trois éléments suivant x : la première et la quatrième bobine réceptrice sont reliées ensemble. La distance séparant deux éléments reliés en série est ainsi de 1,52 mm.

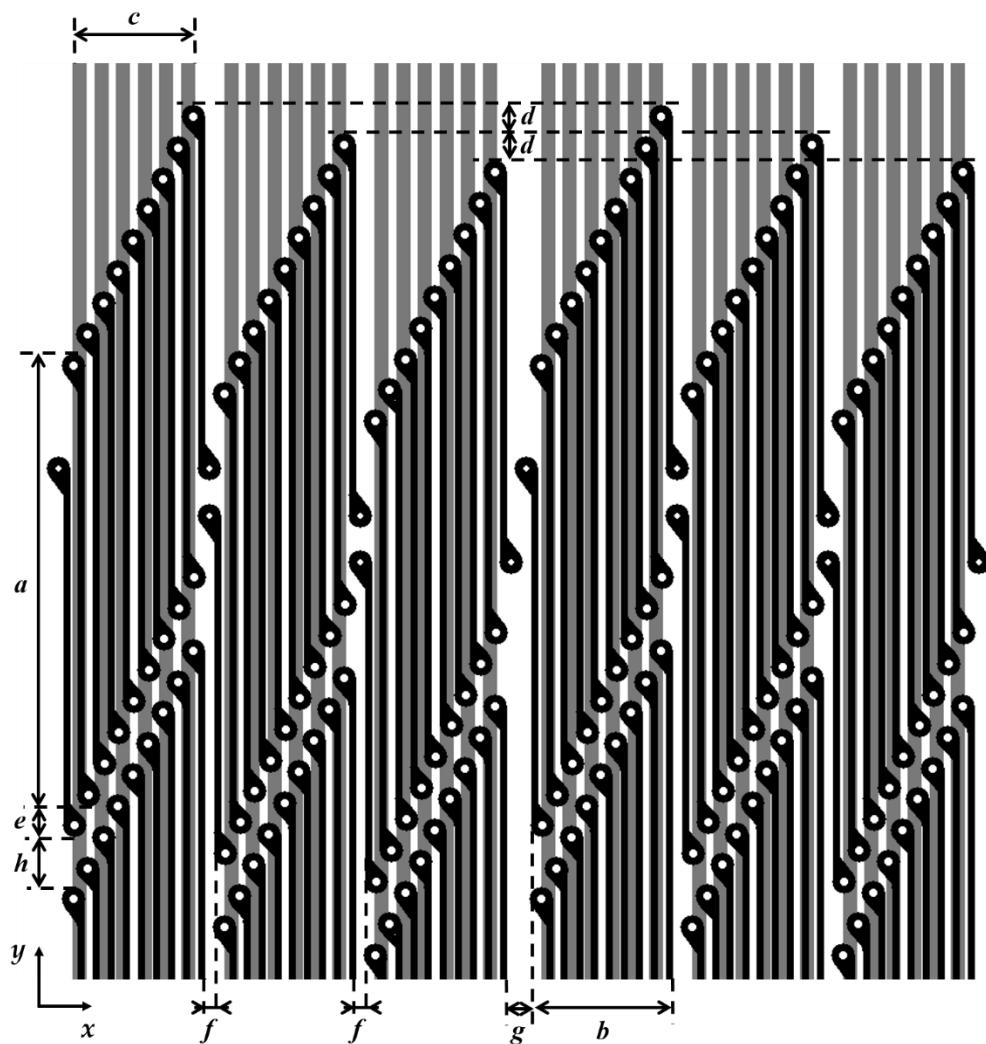


Figure 3.25 : Zoom sur une partie de la zone active du capteur

3.3.5 Résultats obtenus par simulation

Les simulations du dispositif conçu sont réalisées à 1 MHz. Différentes simulations sont menées afin d'évaluer la zone de faible sensibilité du capteur, point essentiel de l'imageur statique. Pour cela, il faut comparer la réponse obtenue par le capteur lorsque un défaut est placé dans un cas favorable (défaut placé au centre d'un récepteur) et défavorable (défaut placé dans la zone du capteur où la sensibilité est la plus faible). La figure 3.26 illustre le placement des défauts par rapport aux éléments de réception.

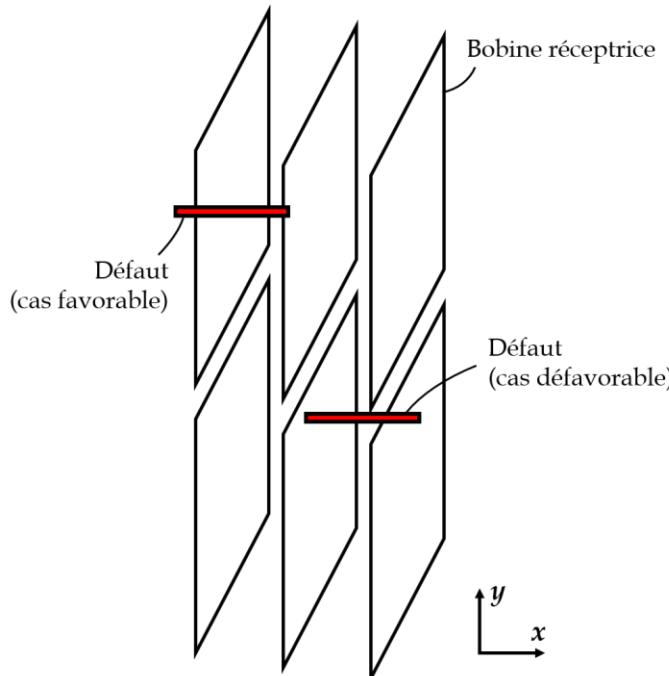


Figure 3.26 : Description du placement du défaut selon les éléments de réception

La figure 3.27 montre les résultats obtenus pour des défauts de type entaille orienté selon x (0°), d'ouverture 0,1 mm, de profondeur 0,5 mm et de différentes longueurs dans des cas où les défauts sont positionnés favorablement et défavorablement par rapport aux éléments récepteurs. La conductivité du matériau simulé est de 18 MS/m.

Pour les défauts de longueur 3, 2, 1 et 0,5 mm, la réponse du capteur dans le cas défavorable est de 75, 80, 50 et 20 % de l'amplitude maximale obtenue dans le cas du défaut de 3 mm de long dans le cas favorable. De plus, pour un courant d'excitation de 100 mA, l'amplitude du signal due au défaut est de 0,09, 0,1 et 0,06 mV pour un défaut de 3, 1 et 0,5 mm par comparaison au 0,02 mV mesuré avec l'imageur prototype pour un défaut de 3 mm. En conclusion, l'amplitude du signal est suffisamment importante. Les 50 % d'amplitude maximale obtenue dans le cas du défaut de 1 mm placé dans la zone de faible sensibilité du capteur consolide le souhait de détecter tous les défauts de 1 mm de long orientés selon x quels que soient leurs emplacements.

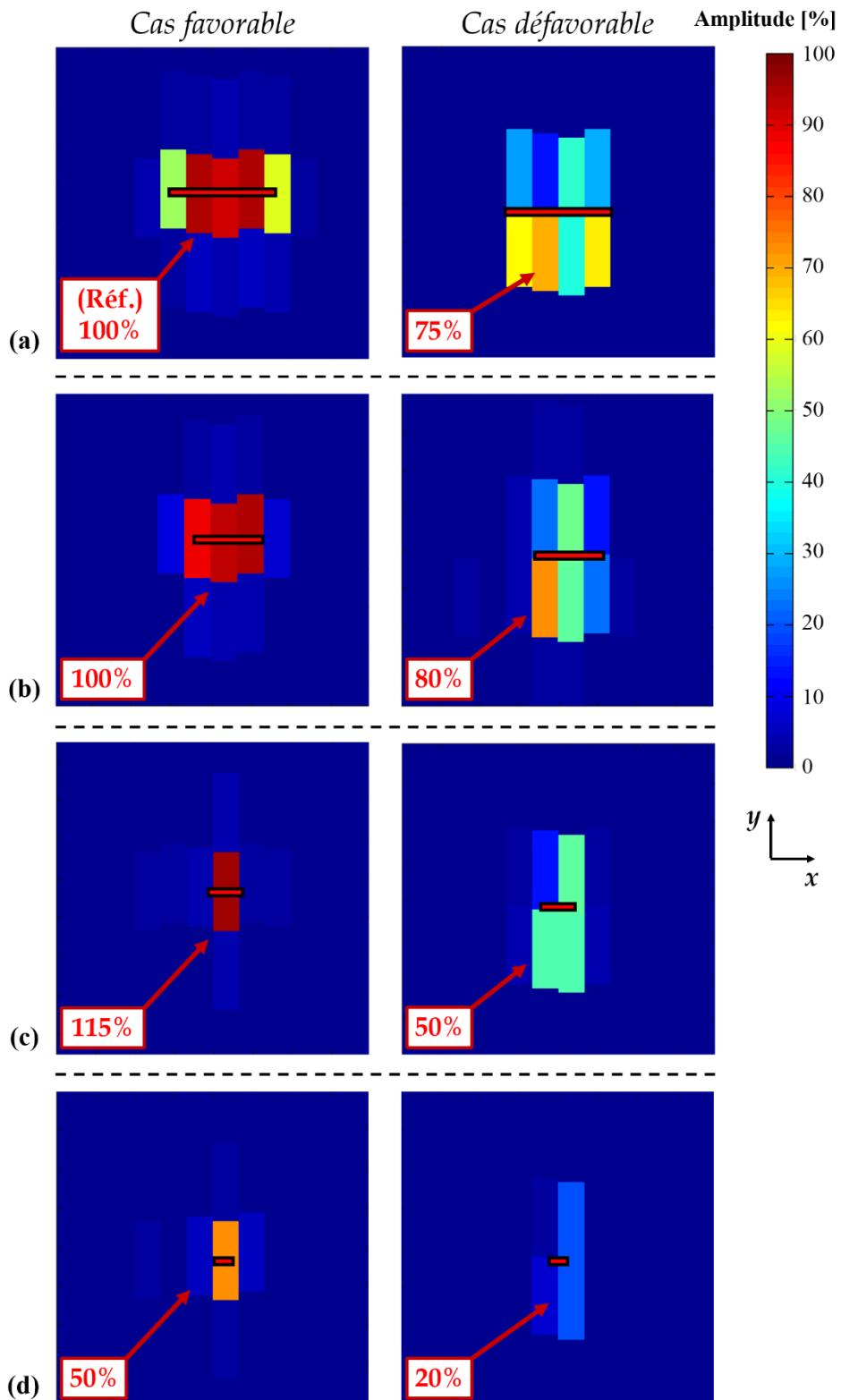


Figure 3.27 : Cartographies obtenues par simulation à 1 MHz pour des entailles orientées selon x de longueur 3 mm (a), 2 mm (b), 1 mm (c) et 0,5 mm (d)

3.4 RÉALISATION ET ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DE L'IMAGEUR STATIQUE

Ce sous-chapitre a pour objectif de présenter les éléments constitutifs de l'imageur statique ainsi que d'étudier les performances de l'imageur CF statique en fonction des dimensions des défauts. L'évaluation expérimentale est réalisée à une fréquence d'excitation de 1 MHz et une caractérisation de la zone de faible sensibilité de l'imageur est menée. L'imageur est ensuite évalué sur des trous et des défauts surfaciques de dimensions et d'orientations diverses.

3.4.1 Réalisation du capteur

Ce sous-chapitre porte sur les différents éléments constitutifs de l'imageur statique qui sont :

- La partie active du capteur :

La partie active du capteur est réalisée sur un film Kapton quatre couches (cf. sous-chapitre 3.3). La figure 3.28(a) montre la partie active du capteur composée de 576 éléments (réalisée par un prestataire) et la figure 3.28(b) montre un zoom des bobines réceptrices présentes sur la couche supérieure du Kapton.

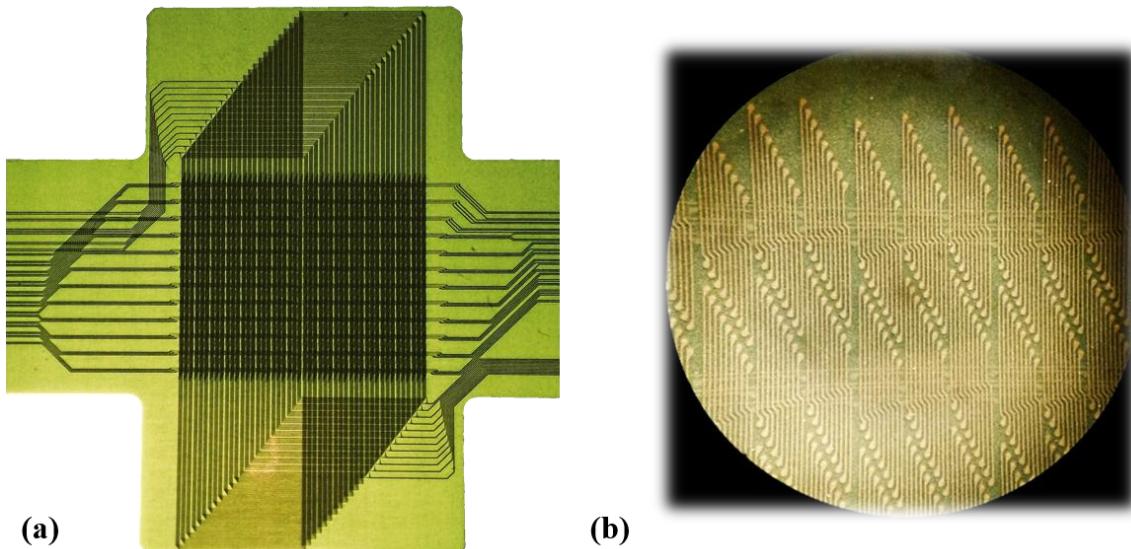


Figure 3.28 : (a) Partie active du capteur réalisé (côté matériau). (b) Zoom sur des bobines réceptrices (côté opposé)

- L'électronique :

L'alimentation des 48 nappes émettrices et l'acquisition des 72 lignes de réception passent par six cartes d'amplification identiques (cf. figure 3.29). Ces cartes électroniques, montées entre la carte où le Kapton se branche et une carte de type fond de panier (cf. figure 3.30), sont composées d'AOP, avec lesquels on réalise un montage amplificateur non inverseur, et d'un CPLD (de l'anglais Complex Programmable Logic Device) de référence 5M570Z qui gère le multiplexage des AOP. Les références des AOP sont : EL5364 pour la partie réception (gain de 20) et AD813 pour la partie émission

(gain de 4). Des tests sur plaque d'essai ont été réalisés avant la fabrication des cartes afin de valider le multiplexage des 72 lignes de réception. La programmation en VHDL des CPLD est réalisée par un ingénieur du laboratoire. Un câble multi coaxial, branché sur la carte fond de panier, relie l'imageur CF statique aux appareils de mesure.



Figure 3.29 : Carte d'amplification

- Le support mécanique :

L'imageur est composé de trois éléments : la tête, le corps et le haut du corps. La tête, réalisée en résine, est interchangeable et différentes formes de tête (arrondie, triangulaire, etc...) pourraient être employées. Le corps de l'imageur, fabriqué en aluminium par fabrication additive, permet d'accueillir jusqu'à douze cartes d'amplification. Le haut du corps en résine permet d'accéder à la carte fond de panier. La figure 3.30 montre l'imageur CF complet.

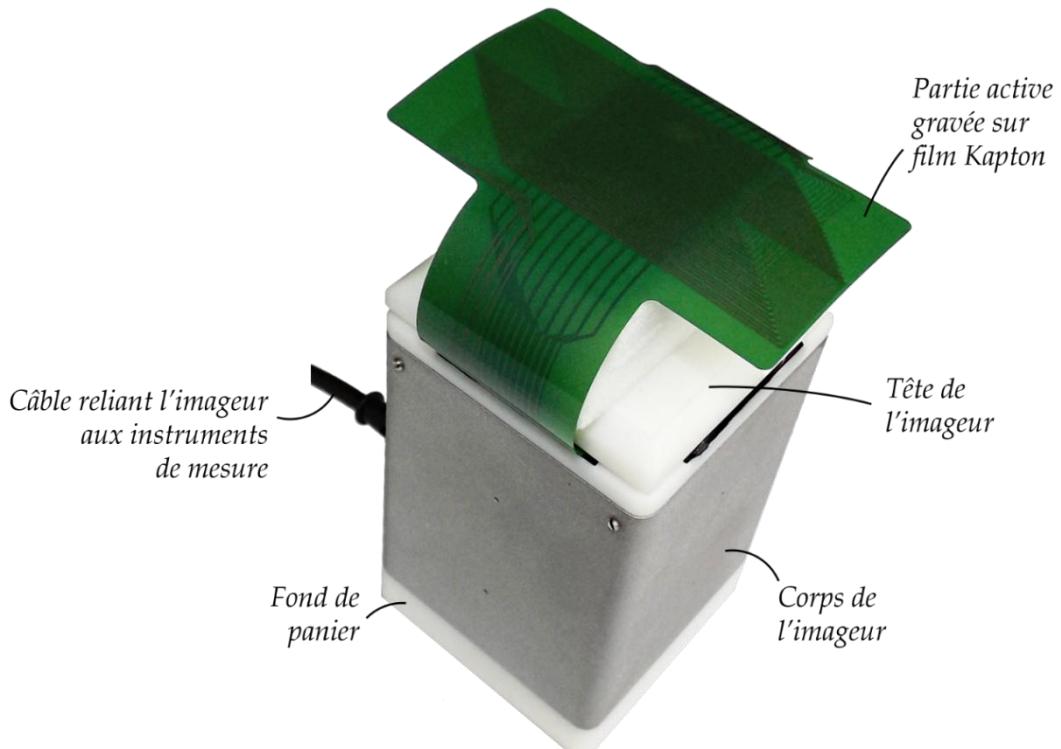


Figure 3.30 : Imageur CF statique

3.4.2 Étude d'un monoélément pour caractériser la zone de faible sensibilité du capteur

Pour évaluer la zone du capteur où la sensibilité est la plus faible, une seule nappe émettrice est alimentée et une seule bobine réceptrice est utilisée. À l'aide de ce seul élément, la cartographie d'une pièce présentant un défaut de type entaille est réalisée en déplaçant le défaut selon deux axes par rapport à la bobine réceptrice. Le pas du déplacement est de 0,1 mm selon x et y. La figure 3.31 représente les cartographies obtenues à 1 MHz avec un élément pour différentes tailles de défauts et différents matériaux. Une plaque en inconel, composée de défauts de $0,4 \times 0,1 \times 1,25 \text{ mm}^3$ (a) et $2 \times 0,1 \times 0,31 \text{ mm}^3$ (c), ainsi qu'une plaque en aluminium, avec des défauts de $1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$ (b) et $3 \times 0,1 \times 0,8 \text{ mm}^3$ (d). Les défauts sont orientés selon l'axe x. Le parallélogramme rouge représente la position de la bobine réceptrice lorsque le défaut est situé en son centre.

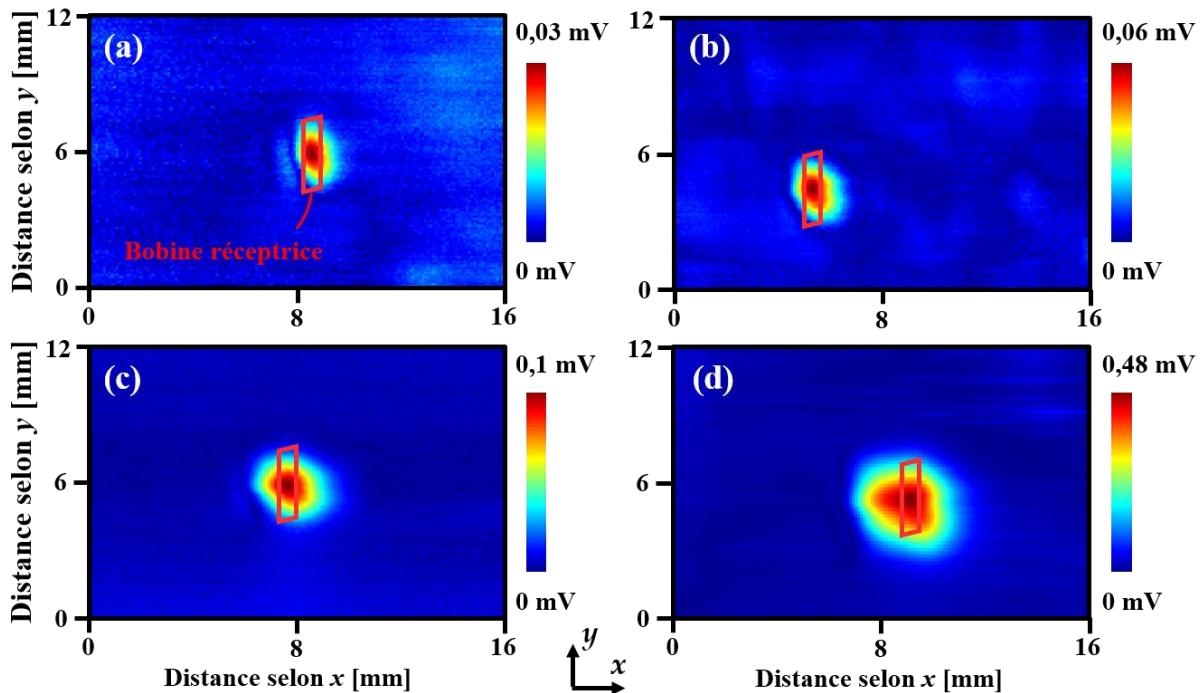


Figure 3.31 : Cartographie de l'amplitude du signal due à des entailles de $0,4 \times 0,1 \times 1,25 \text{ mm}^3$ (a) et $2 \times 0,1 \times 0,31 \text{ mm}^3$ (c) dans une plaque en inconel et des entailles de $1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$ (b) et $3 \times 0,1 \times 0,8 \text{ mm}^3$ (d) dans une plaque en aluminium (fréquence d'excitation de 1 MHz)

Pour évaluer la zone de faible sensibilité du capteur, il faut relever les points de mesure de la bobine en respectant le décalage entre les éléments de réception selon x et y. Les valeurs des décalages entre les éléments correspondent aux paramètres géométriques des bobines réceptrices décrits en figure 3.25. On obtient au niveau de la zone du capteur où la sensibilité est la plus faible, pour les défauts de 0,4, 1, 2 et 3 mm de long, un RSB de 11, 12, 15 et 16 dB et une amplitude de 0,01, 0,03, 0,07 et 0,44 mV soit 30, 50, 70 et 92 % par rapport à l'amplitude maximale obtenue pour chacun des défauts (0,03, 0,06, 0,1 et 0,48 mV). Ces valeurs sont très encourageantes même dans le cas du défaut de 0,4 mm de long.

3.4.3 Étude de l'imageur complet

L'imageur est évalué pour différentes configurations de test ; c'est-à-dire pour différentes tailles, positions et orientations de défaut par exemple. La figure 3.32 illustre l'imageur statique lors de l'inspection d'une plaque en inconel. L'imageur nécessite l'utilisation d'une alimentation ± 5 V pour l'alimentation des cartes électroniques situées dans le corps de l'imageur, d'un générateur de basses fréquences pour alimenter les nappes émettrices, d'un amplificateur à détection synchrone pour démoduler le signal en sortie des bobines réceptrices, d'une carte d'acquisition pour numériser le signal démodulé en sortie du multiplexeur et d'un programme, réalisé sous Labview, pour acquérir les 576 points de mesure. Le temps d'acquisition d'une cartographie statique est actuellement d'une demi-seconde.

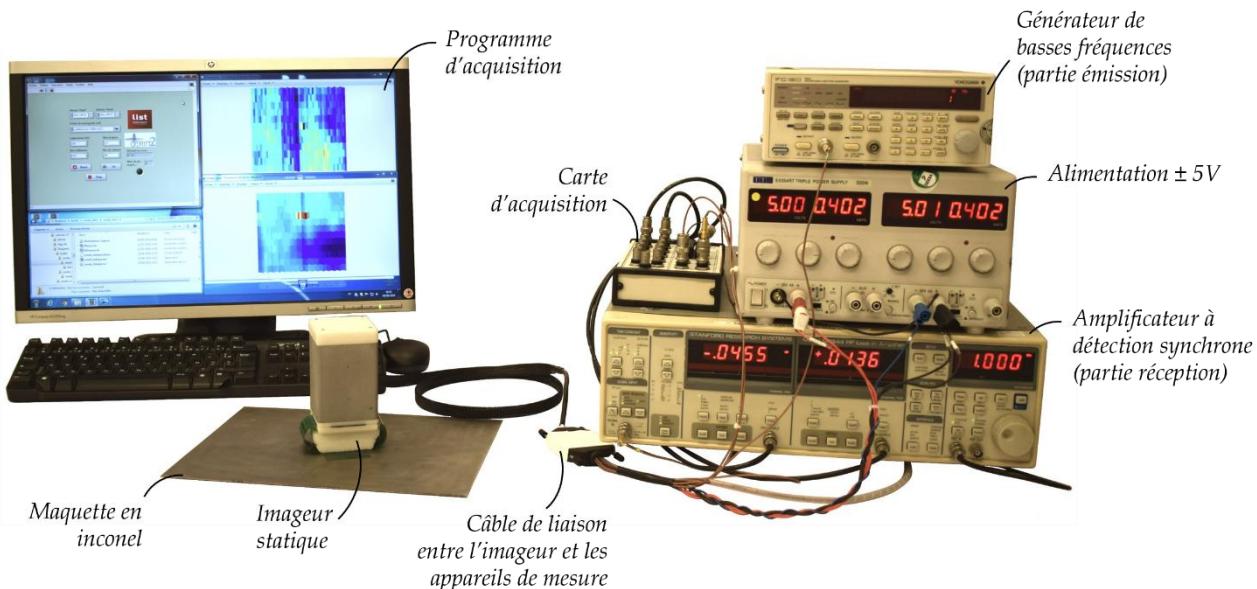


Figure 3.32 : Inspection d'une maquette en inconel par l'imageur statique

La réalisation d'une cartographie statique requiert d'équilibrer les mesures (cf. chapitre 1, section 1.2.4). Pour cela, il faut acquérir au préalable la cartographie d'une zone saine de la pièce que l'on désire inspecter. Si l'on souhaite détecter un défaut, on doit soustraire la cartographie obtenue sur la pièce saine à la cartographie du capteur en présence du défaut. Dans ce manuscrit, soit la partie réelle, soit la partie imaginaire du signal est représentée selon les cartographies statiques obtenues.

3.4.3.1 Influence des dimensions d'un défaut

L'imageur est évalué dans un premier temps sur plaque en aluminium 2024T3, d'épaisseur 3 mm, comportant trois défauts surfaciques de type entaille et un trou traversant. La conductivité électrique de la plaque est de 19,5 MS/m. Les défauts surfaciques, d'orientés selon x, ont comme dimensions 2,5 et 10 mm de long, 0,2 mm d'ouverture et 0,5 mm de profondeur. Le trou, quant à lui, à un diamètre de 6 mm. La figure 3.33 montre la partie imaginaire du signal obtenue à 1 MHz lors de la détection des défauts de 2 mm (a), 5 mm (b) et 10 mm (c) de long ainsi que d'un trou de diamètre 6 mm (d).

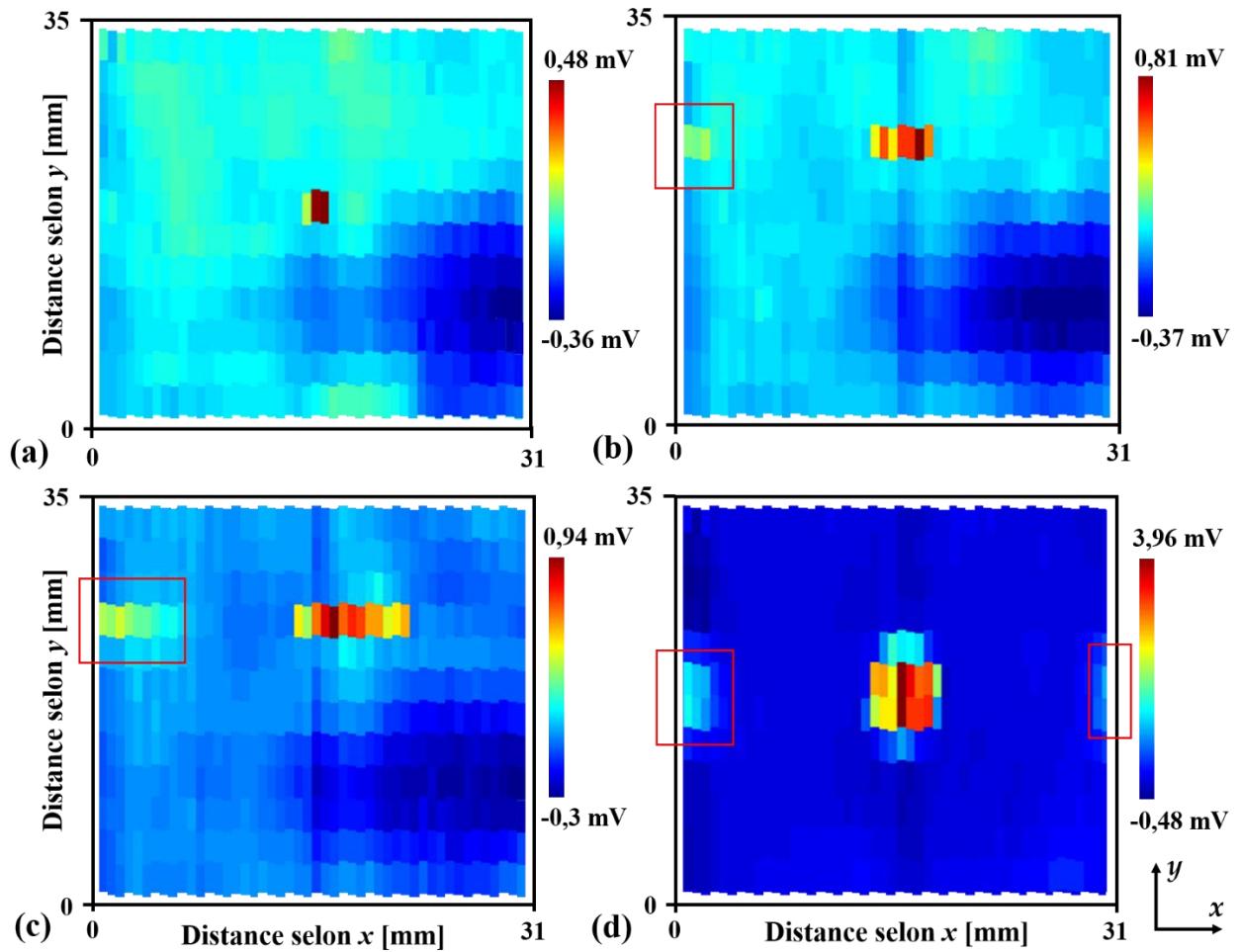


Figure 3.33 : Partie imaginaire du signal à 1 MHz lors de la détection d'entailles ($2 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$ (a), $5 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$ (b) et $10 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$ (c)) et d'un trou traversant de diamètre 6 mm (d) (maquette en aluminium 2024T3)

On constate que les défauts sont bien détectés par l'imageur : la partie de la cartographie sans défaut est relativement homogène et seul le défaut ressort. De plus, on obtient, pour les défauts surfaciques de 2, 5 et 10 mm de long et du trou, un RSB de 8, 4, 7 et 8 dB. En revanche, on remarque des artefacts pour les cas (b), (c) et (d), encadrés par les rectangles rouges. En ne tenant pas compte des artefacts, le RSB calculé passe à 10, 12 et 20 dB pour les cas (b), (c) et (d).

La figure 3.34 montre une description du phénomène d'artefact. L'apparition d'un artefact se produit lorsque le défaut coupe une nappe émettrice alimentée et que ce défaut est de longueur bien supérieure à la largeur de la nappe. Dans cet exemple, on constate que la tension aux bornes du récepteur R2 n'est pas nulle et qu'elle est égale à environ 50 % de l'amplitude maximale. Lorsque la mesure est réalisée pour le pixel correspondant au récepteur R1, la tension aux bornes de cette ligne de réception est modifiée par le récepteur R2 situé sur le défaut, du fait de la mise en série de plusieurs récepteurs sur une même ligne de réception. La tension ainsi mesurée aux bornes de R1 n'est pas nulle mais égale à la tension aux bornes de l'ensemble des éléments situés sur la même ligne de réception. Ainsi, la tension aux bornes de R1 est quasiment identique à celle de R2, soit 50 % de l'amplitude maximale. En appliquant un seuillage, on peut espérer faire disparaître les artefacts.

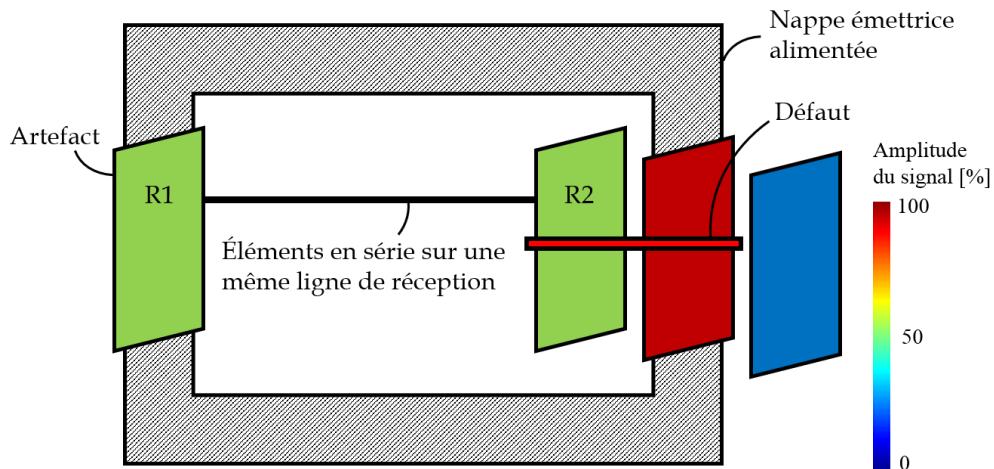


Figure 3.34 : Description du phénomène d'artefact

3.4.3.2 Influence de l'orientation d'un défaut

Une seconde série de tests est réalisée sur matériau moins conducteur tel que l'acier inoxydable 304L, dont la conductivité électrique est de 1,4 MS/m. La maquette est constituée d'un défaut de type entaille de 10 mm de long, d'ouverture 0,2 mm et de profondeur 0,5 mm. Une évaluation de l'imageur vis-à-vis de l'orientation du défaut par rapport à l'axe x est menée. Pour cela, l'imageur est pivoté entre 0° et 90° par rapport au défaut. La figure 3.35 montre la partie imaginaire du signal obtenue à 1 MHz lorsque le défaut est orienté selon x.

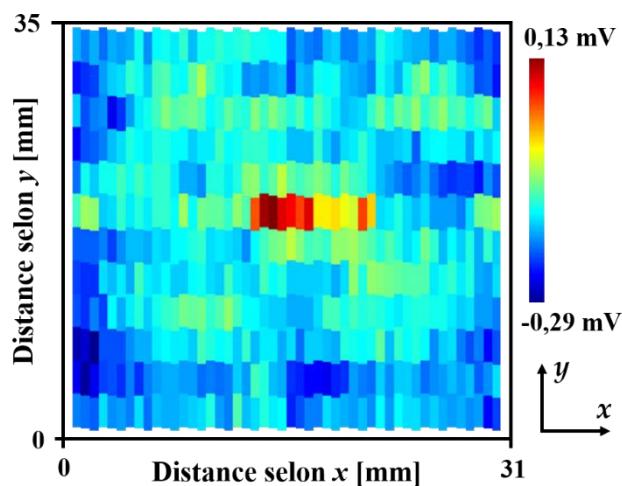


Figure 3.35 : Partie imaginaire du signal à 1 MHz lors de la détection d'une entaille de $10 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$, orientée selon l'axe x (maquette en acier inoxydable 304L)

Contrairement à la maquette en aluminium, la partie de la cartographie sans défaut présente des variations d'amplitude entre les bobines réceptrices, pouvant s'expliquer par une conductivité plus faible du matériau, mais le défaut est correctement détecté. On relève un RSB de 7 dB, légèrement plus faible que dans le cas de la maquette en aluminium.

La figure 3.36 montre la partie imaginaire du signal obtenue à 1 MHz lorsque l'entaille a un angle de 30, 50, 70 et 90° par rapport à l'axe x.

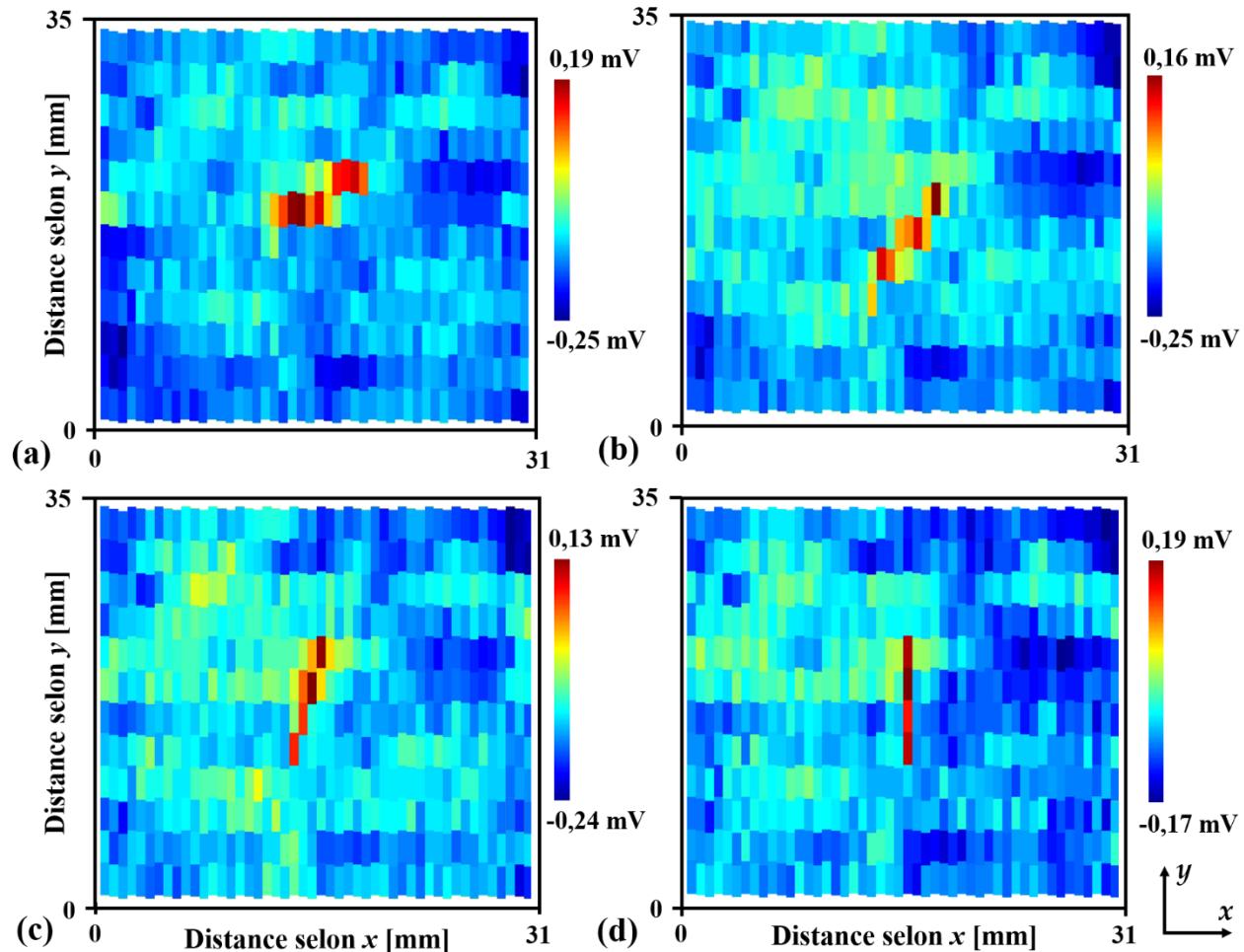


Figure 3.36 : Partie imaginaire du signal à 1 MHz lors de la détection d'une entaille de $10 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$, d'angle 30° (a), 50° (b), 70° (c) et 90° (d) par rapport à l'axe x (maquette en acier inoxydable 304L)

Les résultats sont comparables à la figure 3.35 : la partie de la cartographie sans défaut présente aussi des variations entre bobines réceptrices. On obtient un RSB de 9, 6, 5 et 7 dB pour les orientations respective de 30, 50, 70 et 90° du défaut. Dans le cas (d), pour un défaut d'orientation 90°, le défaut est probablement situé au centre d'une colonne d'éléments récepteurs. Il est quasi certain qu'un défaut de 90°, situé entre deux colonnes de bobines réceptrices, ne soit pas ou peu perçu par l'imageur.

3.4.3.3 Détection d'un défaut de faible longueur

Comme énoncé précédemment au sous-chapitre 3.3, la détection d'un défaut de longueur 1 mm et d'orientation donnée est souhaitée. Pour évaluer le capteur, une maquette en alliage d'aluminium, dont la conductivité électrique est de 14 MS/m, constituée d'un défaut de type entaille de 1 mm de long, d'ouverture 0,1 mm et de profondeur 0,2 mm est utilisée. La figure 3.37 montre la partie réelle du signal obtenue à 1 MHz lorsque le défaut est orienté selon l'axe x.

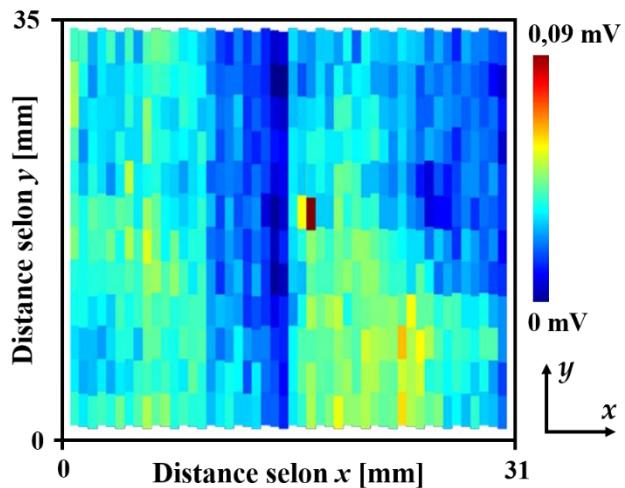


Figure 3.37 : Partie réelle du signal à 1 MHz lors de la détection d'une entaille de $1 \times 0,1 \times 0,2$ mm 3 , orientée selon l'axe x (maquette en aluminium)

On remarque que les résultats sont très satisfaisants : le défaut est détecté par l'imageur malgré le défaut soit vraisemblablement situé au niveau de deux bobines réceptrices. En revanche le RSB est assez faible : il est de 4dB.

3.4.4 Application à l'inspection de défauts aux abords d'un trou de rivet

Pour finir, l'imageur est testé en vue de détecter des amorces de fissures aux abords d'un trou de rivet. L'inspection de lignes de rivets est un enjeu du CND par CF [Paillard_2007]. Le capteur est évalué sur plaque en aluminium 2024T3, d'épaisseur 3 mm et de conductivité électrique 19 MS/m, comportant deux défauts traversant, de type entaille, accolés à un trou de rivet (cf. figure 3.38). Les défauts orientés selon x, ont une longueur de 2 et 5 mm et une ouverture de 0,2 mm. Le trou quant à lui a un diamètre de 6 mm. La figure 3.39 montre la partie réelle du signal obtenue à 1 MHz lors de la détection des défauts précédemment cités.

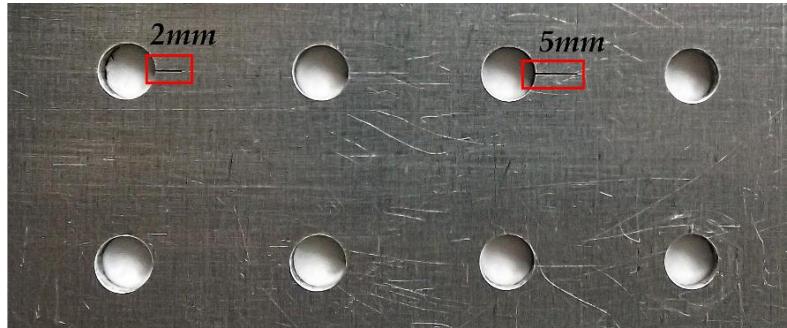


Figure 3.38 : Maquette composée de deux entailles de 2 et 5 mm de long et de trous de rivet

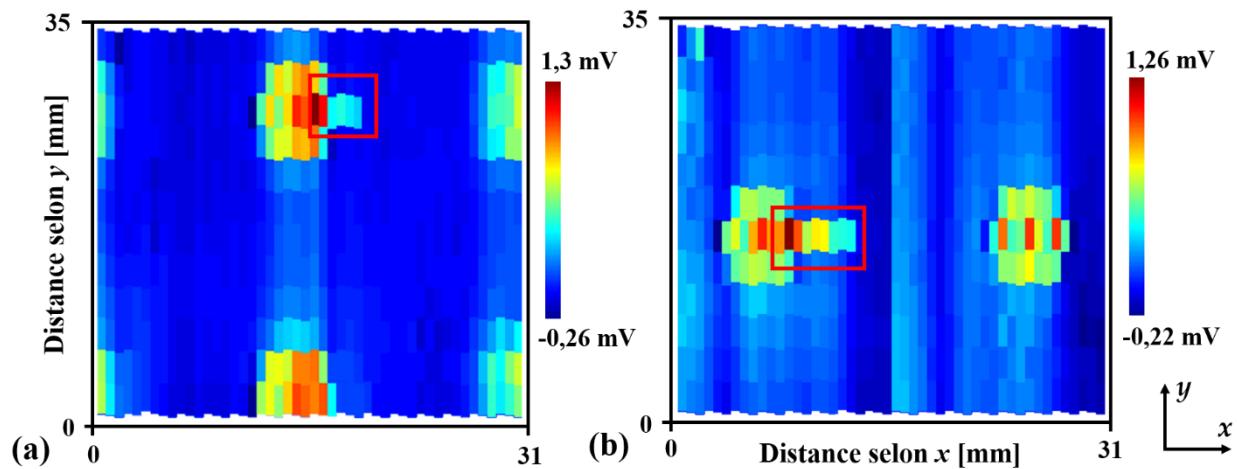


Figure 3.39 : Partie réelle du signal à 1 MHz lors de la détection d'entailles de 2 mm (a) et 5 mm (b) de long aux abords d'un trou de rivet (maquette en aluminium 2024T3)

Les défauts sont effectivement détectés et la réponse des éléments permet bien de dissocier l'entaille des trous de rivet. Dans le cas des défauts de 2 et 5 mm de long, l'amplitude de la tension aux bornes des bobines réceptrices est au mieux de 35 et 60 % par rapport à l'amplitude maximale obtenue au niveau du trou du rivet. Ces valeurs sont suffisamment grandes pour permettre visuellement de détecter ces défauts.

De par son principe d'imagerie, l'imageur CF statique s'apparente à l'imageur magnéto-optique (de l'anglais Magneto-Optical Imager, MOI) développé et commercialisé dans les années 1980 par la société américaine PRI (Physical Research Instrumentation [Fitzpatrick_1993a] [Fitzpatrick_1993b]) afin d'inspecter les structures rivetées dans le secteur de l'aéronautique [Fitzpatrick_1996].

Son principe de fonctionnement repose sur la combinaison d'une nappe émettrice afin d'induire des CF dans la structure inspecté et d'un capteur magnéto-optique pour imager les changements de l'intensité du champ magnétique dus à un défaut [Joubert_2007]. Le MOI permet de couvrir une surface de $5 \times 6 \text{ cm}^2$, d'acquérir la cartographie de la pièce inspectée sans déplacement du capteur et, actuellement, d'inspecter des défauts enterrés jusqu'à une profondeur de 8 mm [Decitre_2003] [Le Diraison_2009].

En revanche, le MOI est limité à une fréquence d'excitation de 100 kHz et n'a pas été conçu pour l'imagerie de défauts surfaciques. De plus, l'interprétation des résultats (cf. figure 3.40) semble dans certains cas plus difficile en comparaison des cartographies obtenues avec l'imageur CF statique. Dans cet exemple, la présence de bruit dû aux domaines magnétiques peut compromettre l'interprétation de l'image.

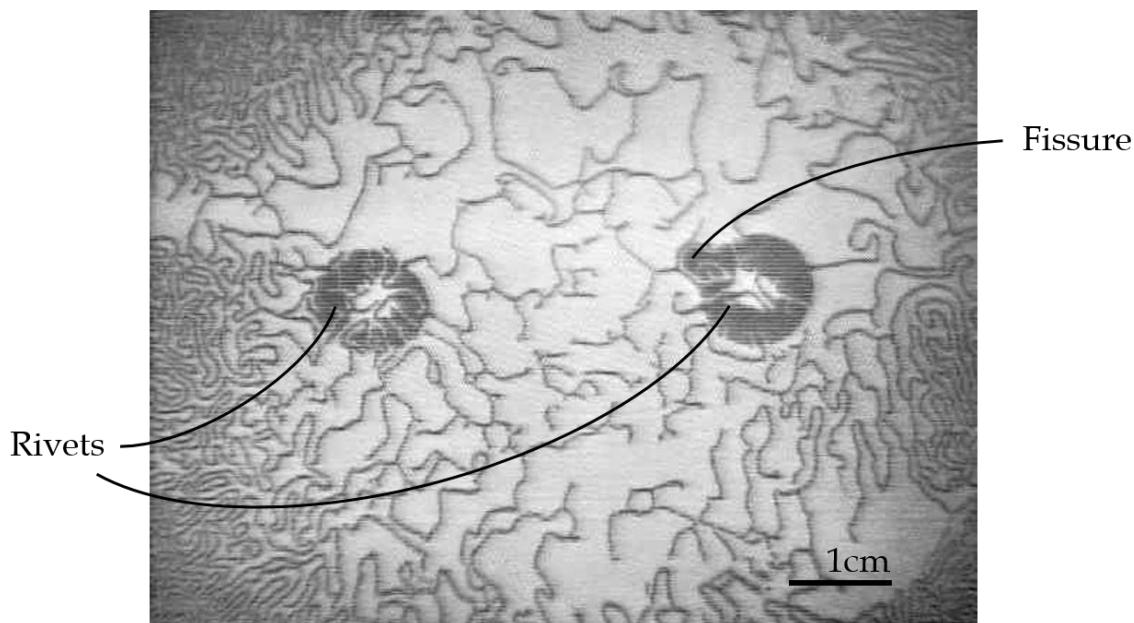


Figure 3.40 : Image produite par un MOI commercial à 20 kHz pour la détection d'une fissure aux abords d'un trou de rivet [Decitre_2003]

3.5 CONCLUSION

L'inspection d'une surface par imagerie statique a été l'objet de ce chapitre. L'imagerie CF monoélément, multiéléments et multiéléments statique a été décrite dans un premier temps. L'imagerie statique permet de réaliser la cartographie d'une surface en très peu de temps sans nécessité obligatoirement un banc mécanique.

Dans un second temps, le prototype d'un premier imageur CF statique, composé de 32 bobines réceptrices a été exposé. L'imageur a été évalué sur maquettes planes afin de valider le principe de fonctionnement du capteur et d'évaluer les performances du capteur en termes de RSB et de longueur de défaut pouvant être détecté.

Dans l'objectif de détecter un défaut de longueur 1 mm d'orientation perpendiculaire à celle des nappes émettrices quel que soit son emplacement vis-à-vis des bobines réceptrices, un second capteur a donc été étudié et réalisé. Afin de répondre à ce critère, les finesse de gravure des pistes électriques et du diamètre des vias ont été réduites et les limites technologiques de réalisation de circuits imprimés sur film Kapton ont été atteintes. L'imageur CF statique optimisé est composé au final de 576 bobines réceptrices et de 48 nappes émettrices permettant de couvrir une surface de $31 \times 35 \text{ mm}^2$. L'imageur a ensuite été évalué expérimentalement et l'influence des dimensions et de l'orientation d'un défaut par rapport à la réponse des bobines réceptrices a été présentée. Les cartographies obtenues sont prometteuses. L'imageur CF statique laisse entrevoir la possibilité de détecter des défauts de 1 mm de long. Enfin, un test de l'imageur statique a été réalisé dans le but de détecter des entailles aux abords d'un trou de rivet. Les mesures effectuées sont encourageantes et permettent de différencier la présence d'une entaille de longueur 2 mm accolé à un trou de 6 mm de diamètre.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail de thèse porte sur la conception de capteurs à courants de Foucault, dans le cadre du contrôle non destructif, pour la caractérisation et le contrôle de matériaux conducteurs et/ou magnétiques. Ce travail s'est divisé en deux volets : l'un a porté sur la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et l'autre sur la détection de défauts par imagerie CF statique.

La caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux a fait l'objet du premier volet de ce manuscrit. Des travaux ont abouti à la réalisation d'un capteur CF mettant en évidence l'intérêt de la caractérisation de matériaux dans le domaine du contrôle non destructif. Dans le but d'évaluer expérimentalement le capteur CF réalisé, une caractérisation d'échantillons conducteurs et magnétiques par méthodes conventionnelles a été menée. La méthode à quatre pointes et la méthode du perméamètre ont été mises en œuvre. Il s'est avéré que le procédé de mesures CF est moins contraignant que ceux des méthodes conventionnelles du fait que ces dernières nécessitent généralement une découpe préalable des échantillons à évaluer.

Les évaluations expérimentales du capteur CF ont montré un caractère rectiligne de la réponse du capteur dans le plan complexe lorsqu'il y a variation de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique ou bien de ces deux paramètres. Cette caractéristique intéressante a permis d'évaluer simplement la conductivité électrique d'un matériau purement conducteur. En revanche, dans le cas des matériaux magnétiques, il a été constaté qu'une mesure indépendante de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique du matériau avec ce capteur CF n'était pas possible.

Pour répondre à cette problématique, le capteur CF initial a été amélioré. Une diminution de la fréquence d'excitation a permis de s'affranchir en grande partie de l'effet de la conductivité électrique d'un matériau magnétique. Des mesures ont été entreprises à très basses fréquences (0,5 Hz) pour estimer la perméabilité magnétique et deux technologies de récepteurs ont été évaluées : un récepteur bobiné composé d'un nombre important de spires et un capteur magnétique de type GMR. Dans un même plan complexe normalisé, la GMR présente, par rapport à la bobine, un comportement plus monotone et moins bruité lorsque la perméabilité magnétique du matériau évolue. Avec des outils de simulation et des matériaux étalons supplémentaires, il semble envisageable d'évaluer indépendamment la conductivité électrique et la perméabilité magnétique.

La caractérisation de la conductivité électrique et du comportement magnétique peut s'avérer d'un grand intérêt lors du renseignement des paramètres électromagnétiques du matériau dans les outils de simulation. Le comportement magnétique d'un matériau est très complexe et il n'est pas garanti que la perméabilité magnétique obtenue par une mesure CF permette de renseigner avec suffisamment de précision le comportement magnétique dans les modèles de simulation. Des travaux sont de plus actuellement en cours au DISC afin de modéliser le comportement non linéaire des matériaux ferromagnétiques. A partir de ces modèles, il serait intéressant de poursuivre l'étude

Conclusions et perspectives

commencée sur la mesure simultanée de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique d'un matériau.

D'un point de vue industriel, ce capteur CF visant à caractériser les propriétés de matériaux conducteurs répond potentiellement à plusieurs enjeux. Une application portant sur l'inspection de zones brûlées a d'ailleurs été exposée dans ce manuscrit. Ces brûlures, réalisées par rectification d'une pièce métallique magnétique, correspondent à de mauvaises conditions d'usinage. L'apparition d'une zone brûlée conduit à une modification localisée des paramètres électromagnétiques de la pièce inspectée. Les études expérimentales réalisées lors de ce travail montrent une bonne corrélation entre les mesures CF et la dureté du matériau. Selon le CEntre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), ces résultats sont assez comparables à ceux obtenus avec la méthode du bruit ferromagnétique, aussi appelé « bruit de Barkhausen ». Cette méthode de contrôle non destructif est par ailleurs couramment employée pour l'évaluation de la dureté d'un matériau ferromagnétique lors de la fabrication ou bien pour des contrôles au cours de la vie des pièces, par exemple, de tôles ou d'engrenages. Au regard des résultats obtenus avec le capteur CF, le contrôle CF mériterait donc d'être approfondi avec plus de matériaux de référence.

Les études effectuées avec le capteur CF initial, lors de l'inspection de défauts, ont montré que la signature d'un défaut ne suit pas la même direction que la réponse quasi rectiligne du capteur représentant l'effet des paramètres électromagnétique du matériau. Il est alors possible de différencier la présence du défaut d'un changement de conductivité électrique (ou de perméabilité magnétique) de la pièce inspectée. Les caractéristiques particulières de ce capteur CF peuvent s'avérer d'un grand intérêt lors de l'inspection d'une soudure inhomogène, autrement dit d'une liaison bimétallique. Les liaisons bimétalliques, principalement employées dans les centrales nucléaires, permettent l'assemblage de deux métaux présentant une composition et une constitution métallurgique très différente. Lors de la réalisation de la soudure bimétallique, les propriétés électromagnétiques des aciers au voisinage de la liaison sont modifiées. Cette modification est amplifiée, d'une part, par des sollicitations mécaniques supplémentaires étant donné que les aciers présentent des coefficients de dilatation souvent différents, et d'autre part par le vieillissement au cours du temps des matériaux. Ce capteur CF laisse donc entrevoir la possibilité d'inspecter des défauts surfaciques, de repérer une modification localisée des paramètres électromagnétiques aux abords de la soudure et, par conséquent, d'anticiper l'apparition d'une zone fragile.

Le second volet de ce manuscrit, dédié à l'imagerie CF statique, a donné lieu à l'étude, la réalisation et l'évaluation expérimentale d'un imageur CF statique flexible. Une description des différentes méthodes d'imagerie CF (monoélément, multiéléments et multiéléments statique) a été donnée afin de comparer les avantages et inconvénients de chacune. On a constaté que l'imagerie CF statique présente un intérêt certain lorsque l'on souhaite cartographier rapidement une partie d'une pièce sans avoir à déplacer le capteur et, par conséquent, sans utiliser un banc mécanique.

À partir des résultats expérimentaux obtenus avec un imageur prototype, une étude de conception par simulation d'un nouvel imageur CF basé sur l'utilisation de nappes émettrices et d'une matrice de

bobines réceptrices, a été présentée. Cet imageur CF avait comme objectif initial de détecter un défaut de longueur 1 mm, d'orientation perpendiculaire à celle des nappes émettrices, quel que soit son emplacement vis-à-vis des bobines réceptrices. Afin de répondre à ce critère, les limites technologiques de réalisation de circuits imprimés sur film Kapton ont été atteintes. Les finesse de gravure des pistes électriques et du diamètre des vias, paramètres limitants lors de la réalisation du circuit imprimé, ont été réduites au maximum. Pour réaliser le nouvel imageur, de nombreuses simulations ont été réalisées dans le but d'optimiser les caractéristiques du motif et, plus particulièrement, celles des bobines réceptrices (notamment la forme, le nombre de spires ou bien les dimensions géométriques) en accord avec les limites de faisabilité du film Kapton. L'imageur CF statique conçu est ainsi composé de 576 bobines réceptrices et de 48 nappes émettrices permettant de couvrir une surface de $31 \times 35 \text{ mm}^2$. Les bobines de réception sont disposées sous forme d'une matrice de 12 par 48 éléments. L'imageur a ensuite été évalué expérimentalement sur maquettes. L'influence des dimensions et de l'orientation d'un défaut sur la réponse des bobines réceptrices a été présentée. Les performances de l'imageur ont été étudiées et l'imageur laisse entrevoir la possibilité de détecter des défauts de 1 mm de long.

Dans le but d'améliorer les capacités de détection de l'imageur, la conception d'une deuxième tête comportant deux Kaptons gravés identiques pivotés à 90° l'un de l'autre pourrait être envisagée. Cette configuration présenterait l'avantage d'inspecter toute orientation de défauts, d'autant plus que l'imageur CF est compatible, de par sa conception mécanique et électronique au pilotage d'un second Kapton. Une autre piste porte sur une réduction du temps d'acquisition d'une image ; la finalité étant de s'approcher du temps réel et par conséquent d'inspecter rapidement la pièce en question par un contrôle manuel. D'autre part, un agrandissement de la surface de la partie active de l'imageur est tout à fait possible en augmentant le nombre d'éléments.

Par ailleurs, une amélioration du rapport signal à bruit (RSB) de l'imageur peut être envisagée. Pour cela, différentes pistes peuvent être investiguées. Dans un premier temps, au lieu d'équilibrer les mesures après amplification et démodulation des signaux par une simple soustraction de cartographies, il semble possible d'équilibrer les signaux obtenus en sortie des récepteurs avant leur amplification et démodulation. Cette méthode présenterait l'avantage d'amplifier et de démoduler seulement la partie utile du signal lié au défaut et non le couplage direct entre les nappes émettrices et les bobines réceptrices. De plus, un étalonnage des éléments pourrait aussi être réalisé, permettant de ce fait d'obtenir une amplitude équivalente pour chacun d'eux pour un défaut donné. Pour chaque nouveau film Kapton, une méthode consisterait à déplacer l'imageur sur une longue entaille électroérodée et à calculer les coefficients de correction à appliquer à l'ensemble des 576 bobines de réception de sorte à compenser individuellement les signaux. L'une et l'autre de ces méthodes devraient permettre d'améliorer de manière notable le RSB du capteur.

Des résultats de l'imageur CF statique pour l'inspection de lignes de trous de rivet ont été montrés dans le cas de défauts surfaciques présents sur la plaque supérieure. En pratique, le rivet permet d'assembler plusieurs plaques métalliques entre elles et des défauts peuvent se situer sur les plaques inférieures. En diminuant la fréquence d'excitation, la détection de défauts enterrés peut être

Conclusions et perspectives

envisagée. D'un point de vue technologique, le remplacement des bobines par des capteurs magnétiques de type GMR semble envisageable avec l'avantage que les GMR présentent une sensibilité indépendante de la fréquence d'excitation contrairement aux bobines. D'autre part, ce changement de technologie permettrait *a priori* de s'affranchir des nombreux vias présents sur la partie active du capteur qui sont limitants lors de la réalisation des circuits imprimés sur film Kapton. La GMR, ou autre capteur directement sensible au champ magnétique, semble donc plus adaptée au contrôle de défauts enterrés. En revanche, le caractère rigide actuel des capteurs à base de GMR permettrait seulement l'inspection de pièces planes.

ANNEXE A – COMPLÉMENTS SUR LA MÉHODE DU PERMÉAMÈTRE

Lors de la mise en œuvre du perméamètre, des mesures ont été effectuées afin d'assurer une bonne reproductibilité de la méthode. En effet, l'influence de la fréquence, par exemple, impacte l'évaluation de μ_{MES}/μ_0 . Dans cette annexe, différents essais sont exposés.

A.1 Influence de la fréquence d'excitation

Durant les mesures, l'influence de la fréquence d'excitation sur l'évaluation de μ_{MES}/μ_0 a été relevée. On peut constater cet effet visuellement lorsque l'on trace le cycle d'hystérésis d'un matériau. La figure A.1 représente les cycles d'hystérésis du fer doux à 0,05, 0,5, 1 et 5 Hz.

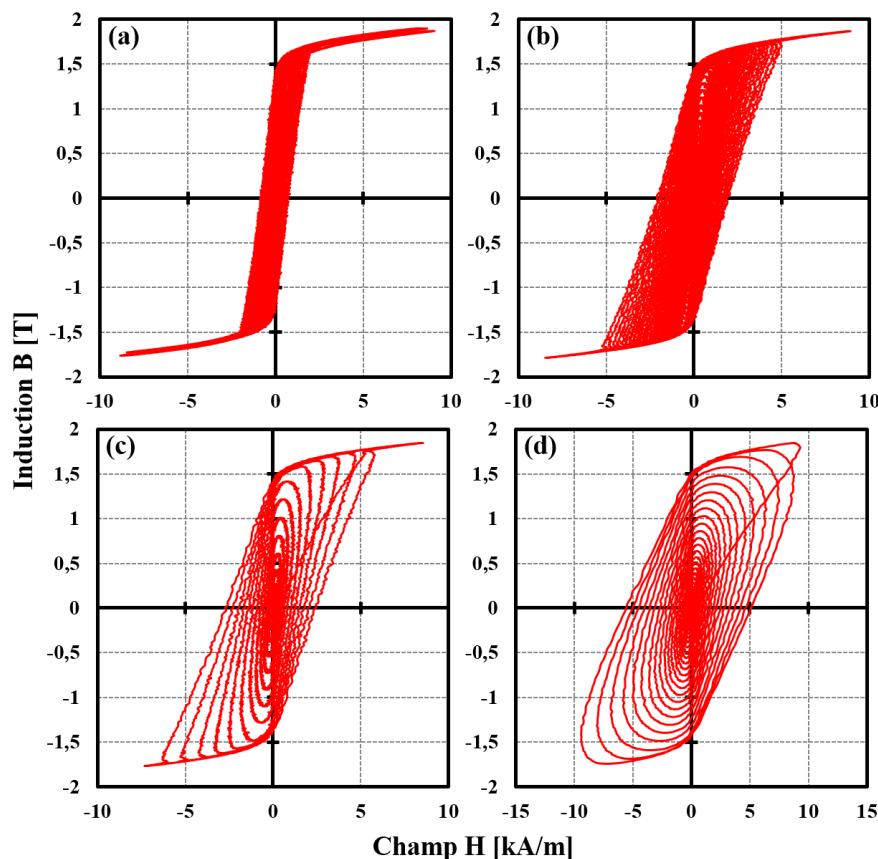


Figure A.1 : Cycles d'hystérésis du fer doux à une fréquence de :
0,05 Hz (a), 0,5 Hz (b), 1 Hz (c) et 5 Hz (d)

On remarque que l'influence de la fréquence sur l'échantillon de fer doux n'est pas négligeable. Le cycle d'hystérésis s'élargit en fonction de la fréquence d'excitation et le champ coercitif H_c passe de 0,6 kA/m à 5 kA/m entre 0,05 Hz et 5 Hz.

La surface du cycle d'hystérésis dépend fondamentalement de la fréquence car les pertes par courants de Foucault P_{CF} augmentent considérablement avec celle-ci [Mazaleyrat_2006]. En effet, les pertes P_{CF} dépendent de la conductivité du matériau et de la fréquence à la puissance deux. Les pertes par hystérésis P_{HYS} interviennent dans une moindre mesure car elles sont proportionnelles à la fréquence [Dahia_2014]. L'ensemble de ces pertes s'appelle les pertes fer. Afin de s'affranchir de cet effet, la fréquence est choisie en fonction de l'échantillon évalué et de l'épaisseur de peau dans l'échantillon. L'épaisseur de peau, en fonction de la fréquence, provoque une déformation du cycle $B(H)$. L'acquisition du cycle $B(H)$, et par conséquent l'évaluation de μ_{MES}/μ_0 , ne peut donc pas être correctement réalisée. L'épaisseur de peau du fer doux à 0,5 Hz et 0,05 Hz est respectivement de 7,5 mm et 23,8 mm alors que l'épaisseur d'échantillon est de 20 mm. Pour une épaisseur de peau d'au moins 20 mm, il faut utiliser une fréquence d'excitation inférieure à 0,07 Hz (cf. figure A.1(a)).

A.2 Influence de l'entrefer

Dans le but d'étudier l'influence de l'entrefer entre l'échantillon et les circuits magnétiques en « U », des cales de 0,1, 0,2 et 0,4 mm d'épaisseur ont été insérées à chaque extrémité des « U ». La figure A.2 montre les cycles d'hystérésis obtenus à 1 Hz dans le cas d'un échantillon de 16NCD13 pour différentes valeurs d'entrefer. L'absence d'entrefer entre le circuit magnétique et l'échantillon est représentée par le cycle d'hystérésis rouge. Les cycles d'hystérésis vert, violet et bleu correspondent aux entrefers de 0,1, 0,2 et 0,4 mm.

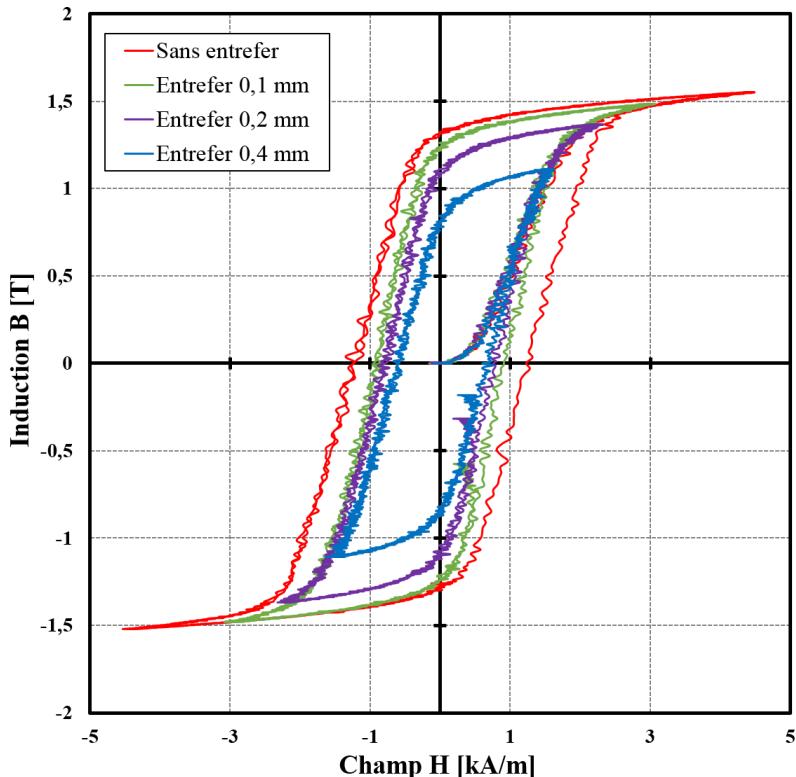


Figure A.2 : Cycles d'hystérésis de l'acier 16NCD13 sans et avec un entrefer de 0,1, 0,2 et 0,4 mm (fréquence d'excitation de 1 Hz)

L'entrefer a une influence non négligeable sur l'intensité du champ magnétique à travers l'échantillon. On remarque une chute importante du champ H lorsque l'entrefer est de 0,4 mm : le champ H passe de 4,5 kA/m à 1,6 kA/m. Dès lors qu'il y a présence d'un entrefer, dans le cas de cet échantillon, l'induction B_S de saturation n'est plus atteinte. Il faut donc limiter l'entrefer pour limiter le courant à injecter. Afin de s'assurer un entrefer minimum, un système mécanisé permet de refermer le circuit magnétique sur l'échantillon en appliquant une force.

A.3 Relevés de cycles d'hystérésis

Pour réaliser les cycles d'hystérésis des échantillons, la bobine d'excitation est parcourue par un courant sinusoïdal de fréquence 1 Hz. Une démagnétisation de la pièce est effectuée avant l'acquisition du cycle complet. Lorsque l'on souhaite réaliser un cycle d'hystérésis complet, le capteur à effet Hall est employé pour mesurer le champ H . L'induction B est mesurée par la B-Coil.

La figure A.3 représente les cycles d'hystérésis des matériaux suivants : l'acier composé de 0,35 % de carbone, l'acier 16MND5, l'acier 32CDV13, l'inox 15-5-PH, l'acier allié et le ferrite 3C94. On remarque que le cycle d'hystérésis, dans le cas du ferrite 3C94, est très étroit. L'estimation des champs B_S de saturation est indiquée dans le tableau A.1.

Tableau A.1 : Échantillons magnétiques évalués

Matériaux	Section [mm ²]	Longueur [mm]	Champ B de saturation [T]	σ [MS/m]	μ_{MES}/μ_0
Inox 15-5-PH	30 x 10	120	0,8	1,3	40
Acier 16NCD13	30 x 8	120	1,7	3,4	110
Acier 32CDV13	30 x 10	120	1,6	3,4	80
Acier 16MND5	29 x 10	170	1,7	4,2	90
Acier 0,35%C	11 x 5	150	1,8	4,8	80
Acier allié	32 x 8	160	0,55	2,3	30
Fer doux	35 x 20	220	1,85	8,9	1 000
Ferrite 3C94	25 x 25	100	0,45	~0	2 200

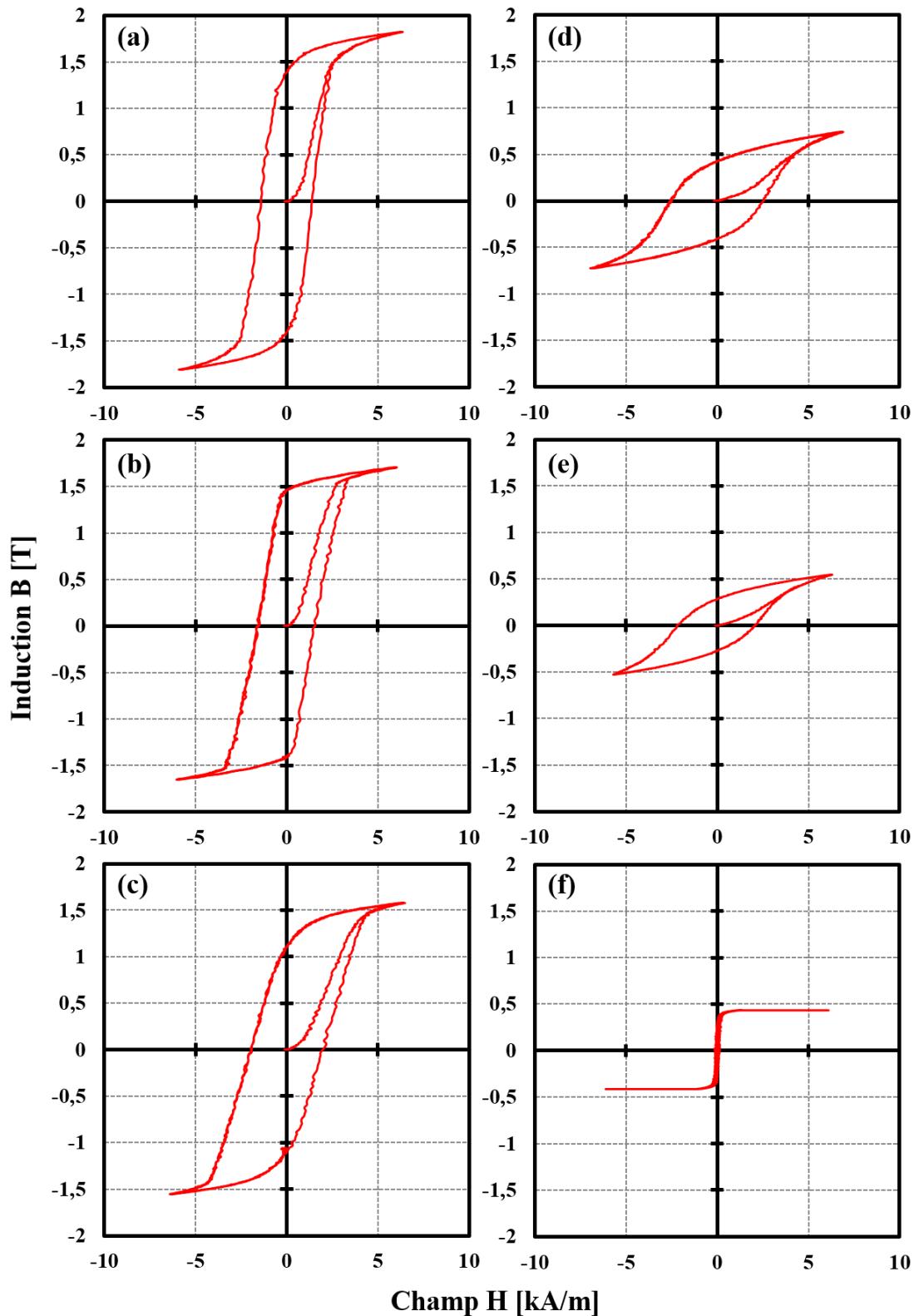


Figure A.3 : Cycles majeurs des échantillons : acier 0,35%C (a), acier 16MND5 (b), acier 32CDV13 (c), inox 15-5-PH (d), acier allié (e) et ferrite 3C94 (f) (fréquence d'excitation de 1 Hz)

ANNEXE B – MÉTHODE DE CALCUL DU RAPPORT SIGNAL À BRUIT

Cette annexe décrit le mode de calcul du rapport signal à bruit (RSB) indiqué dans ce manuscrit de thèse pour des acquisitions CF. A partir d'une cartographie expérimentale, une zone de mesure la plus étendue possible, incluant le défaut dont on souhaite évaluer le RSB ainsi qu'une large zone de bruit, est sélectionnée (cf. figure B.1).

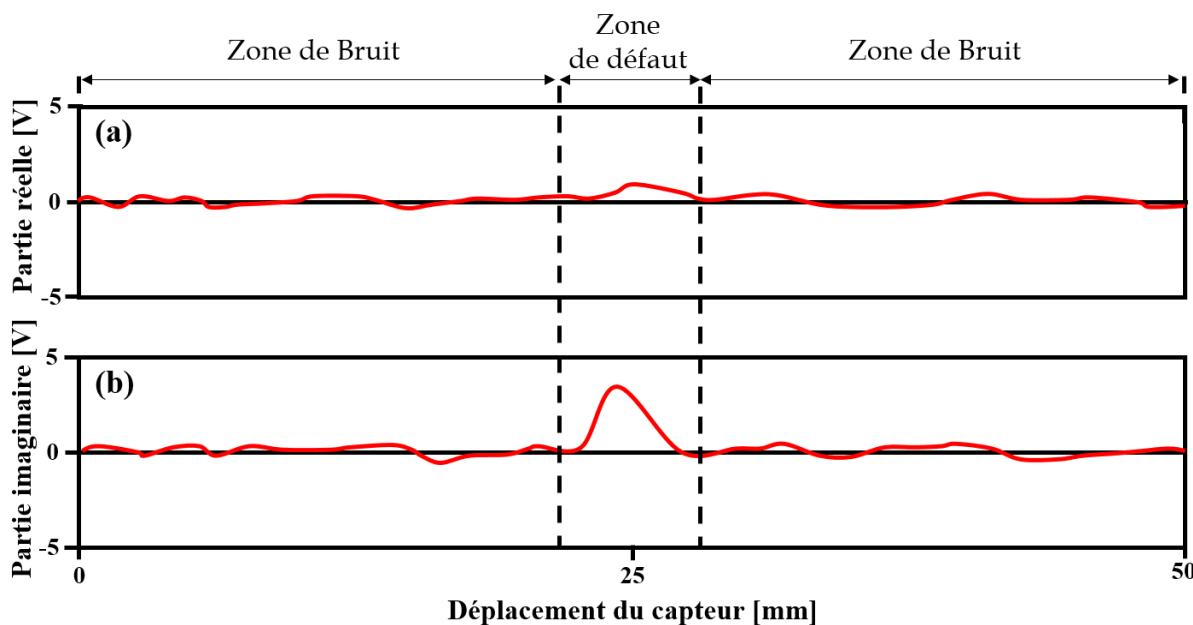


Figure B.1 : Segment de mesure et zone de défaut sélectionné

Les données, c'est-à-dire le signal du défaut et du bruit, sont dans un premier temps disposées dans le plan complexe (cf. figure B.2) puis le RSB est calculé suivant tous les axes de projection compris entre 0° et 180° au moyen de la formule :

$$RSB_\theta = \frac{\text{Max}(\Delta\text{Signal})}{\text{Max}(\Delta\text{Bruit})} \Big|_{\text{axe de projection } \theta} \quad (\text{B.1})$$

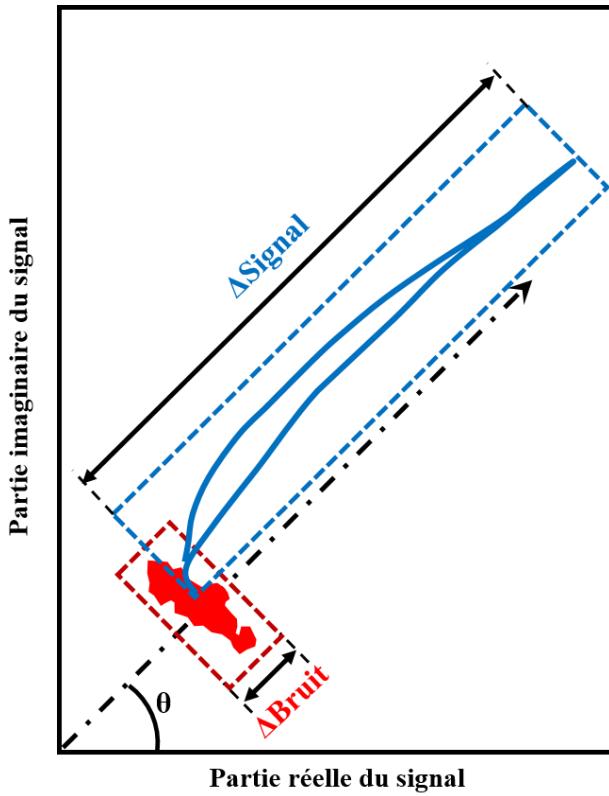


Figure B.2 : Représentation des points de mesure dans un plan complexe

La figure B.3 montre le RSB selon l'orientation de l'axe de projection θ .

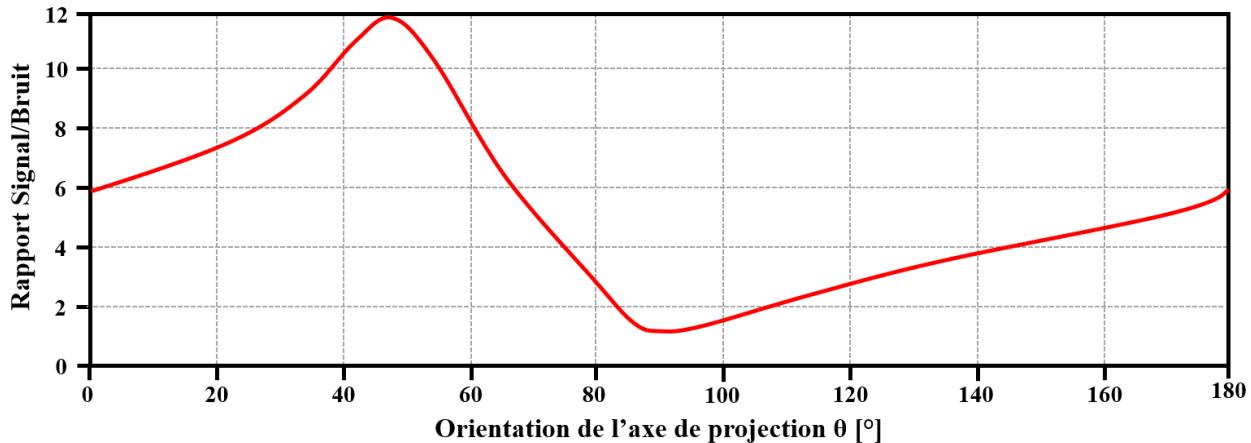


Figure B.3 : Rapport signal à bruit en fonction de la rotation appliquée

L'amplitude du RSB est maximale pour une projection de 46° : il est de 12 soit environ 21 dB. À 0° , le RSB est de 6 soit 16 dB et le RSB minimum est de 1,8 soit 5 dB à 87° . Dans notre cas, c'est la valeur maximale du RSB qui est explicité dans le manuscrit de thèse. En revanche, ce mode de calcul minore le RSB dans la mesure car il tient compte du maximum du bruit et non de sa valeur moyenne.

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 : Machine d'induction de Foucault (collection de l'École Polytechnique)	18
Figure 1.2 : (a) Génération d'un champ magnétique par la bobine.	
(b) Induction de CF dans l'échantillon et apparition d'un champ de réaction.....	19
Figure 1.3 : Unité de mesure développée par l'Institut Foerster [Hellier_2001]	21
Figure 1.4 : Distribution des CF sous une surface plane d'épaisseur infinie	22
Figure 1.5 : Exemples de profondeur δ selon la fréquence d'excitation des CF [Dumont_1996]	22
Figure 1.6 : Sensibilité réduite (a), faible (b) et maximum (c) à la détection d'un défaut selon son emplacement [Hellier_2001].....	23
Figure 1.7 : Modification de la circulation des CF due aux bords du matériau. (a) CF non perturbés. (b) Perturbation des CF liée à l'effet de bord [Hellier_2001].....	23
Figure 1.8 : Capteur à double fonction	24
Figure 1.9 : Capteur CF à fonctions séparées	25
Figure 1.10 : Représentation d'un plan d'impédance.....	28
Figure 1.11 : Exemples de plans d'impédance normalisée. (a) Cas de matériaux non magnétiques.	
(b) Cas de matériaux magnétiques	29
Figure 1.12 : Représentation d'un contrôle 2D simulé sous CIVA [CIVA].....	30
Figure 1.13 : Trois exemples de capteurs CF : tête d'un capteur multiéléments flexible pour l'inspection de surfaces planes (a) [Marchand_2012], schéma de principe d'un capteur encerclant (b) et sonde multiéléments interne (c) [Marchand_2010].....	31
Figure 1.14 : Bobines composées d'un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau d'air	32
Figure 1.15 : Capteur multiéléments composé de bobines gravées sur film Kapton [Decitre_2014].....	32
Tableau 1.1 : Conductivité électrique de métaux purs à 300 K	33
Figure 1.16 : Courbe de première aimantation	35
Figure 1.17 : Cycle d'hystérosis	35
Figure 1.18 : Représentation de différentes perméabilités [Mazaleyrat_2013].....	37
Figure 2.1 : Méthode dite à quatre pointes	42
Figure 2.2 : (a) Méthode du perméamètre. (b) Détail de l'échantillon.....	43
Figure 2.3 : Exemple de désaimantation d'un acier faiblement allié	44
Figure 2.4 : Évaluation expérimentale de μ_{MES}	45
Tableau 2.1 : Échantillons magnétiques évalués	46
Tableau 2.2 : Caractéristiques géométriques et physiques de la bobine et du matériau	47
Figure 2.5 : Capteur simulé.....	48
Figure 2.6 : Simulation de l'impédance normalisée d'une bobine lorsque la conductivité d'un matériau évolue (fréquence d'excitation de 200 kHz)	48
Tableau 2.3 : Caractéristiques géométriques et physiques des capteurs et du matériau	50
Figure 2.7 : Réponse des capteurs lorsque σ évolue (trait plein) et effet de l'entrefer (pointillé) dans le cas d'un capteur double fonction (a) et de capteurs à fonctions séparées (b) et (c) (fréquence d'excitation de 200 kHz).....	51
Figure 2.8 : Description des paramètres déterminés (en rouge) du capteur à fonctions séparées	52

Table des figures

Tableau 2.4 : Caractéristiques du capteur	52
Figure 2.9 : Description des diverses configurations de bobines	53
Tableau 2.5 : Caractéristiques géométriques et physiques des capteurs (a), (b) et (c)	53
Figure 2.10 : Comparaison des réponses obtenues pour quatre configurations de capteurs (fréquence d'excitation de 200 kHz)	54
Figure 2.11 : (a) Capteur CF. (b) Zoom sur le motif optimisé pour l'évaluation de σ	55
Figure 2.12 : Évolution de la réponse du capteur lorsque σ évolue à une fréquence de 100 (a), 200 (b), 600 (c) et 1000 kHz (d)	56
Tableau 2.6 : Étalons conducteurs utilisés	57
Figure 2.13 : Comparaison entre les données expérimentales et données simulées avec CIVA lorsque la conductivité électrique de l'échantillon évolue (fréquence d'excitation de 1 MHz)	58
Figure 2.14 : Courbe d'étalonnage expérimentale du capteur à 20 mA efficace (fréquence d'excitation de 1 MHz)	58
Figure 2.15 : Représentation schématique de la réponse du capteur en présence d'un défaut	59
Figure 2.16 : Inspection de défauts surfaciques dans le cas de matériaux purement conducteurs (fréquence d'excitation de 1 MHz)	60
Figure 2.17 : Représentation de la partie réelle et imaginaire du signal après modification de la phase (fréquence d'excitation de 1 MHz)	61
Tableau 2.7 : Étalons ferritiques utilisés	62
Figure 2.18 : Comparaison des mesures effectuées sur matériaux purement conducteurs et matériaux ferritiques (fréquence d'excitation de 1 MHz)	63
Tableau 2.8 : Échantillons ferromagnétiques étudiés	63
Figure 2.19 : Comparaison des mesures effectuées sur matériaux purement conducteurs et matériaux ferromagnétiques (fréquence d'excitation de 1 MHz)	64
Figure 2.20 : Inspection de défauts surfaciques dans le cas de matériaux purement conducteurs et de matériaux ferromagnétiques (fréquence d'excitation de 1 MHz)	65
Figure 2.21 : Capteur en présence d'un échantillon d'acier 18NiCr 5-4	66
Figure 2.22 : Amplitude des cartographies obtenues à 1 MHz pour les échantillons en 18NiCr 5-4 présentant une absence de brûlure (a), brûlure légère (b), brûlure moyenne (c), brûlure forte (d) et brûlure très forte (e)	67
Figure 2.23 : Parties réelle et imaginaire des coupes horizontales à 1 MHz	68
Figure 2.24 : Représentation dans le plan complexe des coupes horizontales à 1 MHz	68
Figure 2.25 : Comparaison entre mesures CF et mesures de dureté HV5	69
Figure 2.26 : Simulation du comportement en fréquence du capteur optimisé dans le cas d'échantillons purement conducteurs	71
Figure 2.27 : Simulation du comportement en fréquence du capteur optimisé dans le cas d'échantillons conducteurs et d'échantillons magnétiques	72
Tableau 2.9 : Caractéristiques géométriques de la bobine d'émission	73
Figure 2.28 : Représentation des capteurs simulés : bobine gravée identique à l'émetteur (a), bobine gravée quasi ponctuelle (b) et récepteur bobiné de grande hauteur (c)	73
Tableau 2.10 : Caractéristiques géométriques des bobines réceptrices simulées	74
Figure 2.29 : Simulation de différentes distances entre les axes des bobines émettrice	74

et réceptrice à 10 Hz.....	74
Figure 2.30 : Comparaison des configurations (a), (b) et (c) à 10 Hz.....	75
Tableau 2.11 : Simulation de la tension aux bornes des bobines à un courant de 1 mA (10Hz).....	76
Tableau 2.12 : Simulation de la tension aux bornes des bobines pour le nombre de spires donné à un courant de 1 mA (10 Hz)	76
Tableau 2.13 : Caractéristiques du capteur.....	76
Figure 2.31 : Illustration du capteur évalué expérimentalement (vue en coupe)	77
Tableau 2.14 : Description des échantillons étudiés	77
Figure 2.32 : (a) Évaluation du capteur avec récepteur bobiné sur matériaux purement conducteurs et matériaux magnétiques à une fréquence de 0,5 Hz. (b) Zoom au niveau des points de mesures.....	78
Figure 2.33 : Partie imaginaire de la tension normalisée en fonction de μ_{MES}/μ_0 et du taux de ferrite à 0,5 Hz	78
Figure 2.34 : Mesures réalisées avec le capteur optimisé à 1 MHz sur cales conductrices lorsque le capteur est en présence du récepteur bobiné	79
Figure 2.35 : Représentation de la configuration avec la bobine émettrice et le récepteur GMR.....	80
Figure 2.36 : (a) Évaluation du capteur à base de GMR sur matériaux purement conducteurs et matériaux magnétiques à une fréquence de 0,5 Hz. (b) Zoom au niveau des points de mesures.....	80
Figure 2.37 : Réponses du capteur à base de GMR et de la bobine en fonction de μ_{MES}/μ_0 et du taux de ferrite à 0,5 Hz	81
Figure 2.38 : Mesures réalisées avec le capteur optimisé à 1 MHz sur cales conductrices lorsque le capteur est en présence d'un récepteur bobiné et du capteur à base de GMR.....	82
Figure 3.1 : Exemple d'une cartographie obtenue avec un capteur monoélément [Copley_1983].....	88
Figure 3.2 : Représentation de la disposition des motifs en barrette (a) et en quinconce (b)	88
Figure 3.3 : (a) Photographie de l'échantillon d'aluminium corrodé. (b) Cartographie CF obtenue [Macecek_1991].....	89
Figure 3.4 : Système CF d'acquisition constitué d'un capteur statique, d'un multiplexeur et d'un ordinateur [Krampfner_1988].....	90
Figure 3.5 : Simulation d'une cartographie statique lorsque le défaut est placé dans le pire (a) et le meilleur (b) des cas [Hedengren_1992]	90
Figure 3.6 : Imageur statique composé de trois couches d'éléments [Hedengren_1997].....	91
Figure 3.7 : (a) Disposition des échantillons sur un repère quadrillé et images CF de la partie réelle (b) et de la partie imaginaire (c) du signal [Hu_2009]	91
Figure 3.8 : Cartographie obtenue avec le capteur matriciel composé de 3x10 éléments sur une plaque en titane présentant cinq défauts de type entaille : 2,5 x 1,3 mm ² (a), 1,5 x 0,8 mm ² (b), 0,8 x 0,4 mm ² (c), 0,5 x 0,25 mm ² (d) et 0,25 x 0,13 mm ² (d) [IMTT_2007]	92
Figure 3.9 : Principe de la couverture effective du motif comportant deux éléments (a) et quatre éléments (b) [Lepage_2009].....	93
Figure 3.10 : Imagerie CF monoélément (a), multiéléments (b) et multiéléments statique (c).....	93
Figure 3.11 : Représentation du motif élémentaire.....	94
Figure 3.12 : (a) Bobinage des spires entre la couche inférieure et supérieure du Kapton. (b) Disposition des éléments [Decitre_2013].....	95
Figure 3.13 : (a) Prototype réalisé sur film Kapton. (b) Zoom de la partie active du capteur	96

Table des figures

Figure 3.14 : Cartographies à 1 MHz d'une entaille de 5 mm (cas favorable (a) et défavorable (c)) et de 3 mm de long (cas favorable (b) et défavorable (d)) (maquette en aluminium)	97
Figure 3.15 : (a) Description de l'acquisition. Mesures obtenues à 1 MHz avec deux récepteurs accolés pour une entaille de 4 mm (b) et de 2 mm (c) de long (maquette en inox 304L)	98
Figure 3.16 : Cartographies simulées à 1 MHz d'entailles de 6 mm (a) et 5 mm (b) de long situées entre deux éléments de réception	99
Figure 3.17 : Réponse du capteur à 1 MHz selon les axes du récepteur x (a), y (b) et z (c)	101
Figure 3.18 : Réponse du capteur à 1 MHz lorsque la largeur de la nappe émettrice est inférieure (a), égale (b) et supérieure (c) à la largeur de la bobine réceptrice	102
Figure 3.19 : Différentes formes de bobines réceptrices : hexagone (a), croix (b), trapèze (c) et parallélogramme (d)	103
Figure 3.20 : (a) Représentation du décalage selon y des spires. (b) Simulations à 1 MHz de l'amplitude relative du signal dans la zone de forte et faible sensibilité du capteur en fonction du décalage entre spires	104
Figure 3.21 : (a) Description du décalage de la bobine réceptrice par rapport à la nappe inductrice selon x (vue de dessus). (b) Simulations à 1 MHz de la variation de la tension aux bornes de la bobine réceptrice en fonction de sa position par rapport à la nappe émettrice	105
Figure 3.22 : (a) Représentation du décalage selon y des bobines réceptrices A et B (vue du dessus). (b) Simulations à 1 MHz de la variation de l'amplitude du signal du récepteur B dans la zone de faible sensibilité du capteur en fonction du décalage entre les bobines A et B	106
Figure 3.23 : (a) Représentation de l'augmentation de la hauteur d'une bobine réceptrice selon z (vue de profil). (b) Simulations à 1 MHz de la variation de l'amplitude du signal en fonction de la hauteur d'une bobine réceptrice lorsque le défaut est centré sur un élément de réception	107
Figure 3.24 : Disposition de la nappe émettrice et de la bobine réceptrice sur les couches du Kapton	108
Figure 3.25 : Zoom sur une partie de la zone active du capteur	109
Figure 3.26 : Description du placement du défaut selon les éléments de réception	110
Figure 3.27 : Cartographies obtenues par simulation à 1 MHz pour des entailles orientées selon x de longueur 3 mm (a), 2 mm (b), 1 mm (c) et 0,5 mm (d)	111
Figure 3.28 : (a) Partie active du capteur réalisé (côté matériau). (b) Zoom sur des bobines réceptrices (côté opposé)	112
Figure 3.29 : Carte d'amplification	113
Figure 3.31 : Cartographie de l'amplitude du signal due à des entailles de $0,4 \times 0,1 \times 1,25 \text{ mm}^3$ (a) et $2 \times 0,1 \times 0,31 \text{ mm}^3$ (c) dans une plaque en inconel et des entailles de $1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$ (b) et $3 \times 0,1 \times 0,8 \text{ mm}^3$ (d) dans une plaque en aluminium (fréquence d'excitation de 1 MHz)	114
Figure 3.32 : Inspection d'une maquette en inconel par l'imageur statique	115
Figure 3.33 : Partie imaginaire du signal à 1 MHz lors de la détection d'entailles ($2 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$ (a), $5 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$ (b) et $10 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$ (c)) et d'un trou traversant de diamètre 6 mm (d) (maquette en aluminium 2024T3)	116
Figure 3.34 : Description du phénomène d'artefact	117
Figure 3.35 : Partie imaginaire du signal à 1 MHz lors de la détection d'une entaille de $10 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$, orientée selon l'axe x (maquette en acier inoxydable 304L)	117

Figure 3.36 : Partie imaginaire du signal à 1 MHz lors de la détection d'une entaille de $10 \times 0,2 \times 0,5 \text{ mm}^3$, d'angle 30° (a), 50° (b), 70° (c) et 90° (d) par rapport à l'axe x	118
(maquette en acier inoxydable 304L)	118
Figure 3.37 : Partie réelle du signal à 1 MHz lors de la détection d'une entaille de $1 \times 0,1 \times 0,2 \text{ mm}^3$, orientée selon l'axe x (maquette en aluminium)	119
Figure 3.38 : Maquette composée de deux entailles de 2 et 5 mm de long et de trous de rivet	120
Figure 3.39 : Partie réelle du signal à 1 MHz lors de la détection d'entailles de 2 mm (a) et 5 mm (b) de long aux abords d'un trou de rivet (maquette en aluminium 2024T3)	120
Figure 3.40 : Image produite par un MOI commercial à 20 kHz pour la détection d'une fissure aux abords d'un trou de rivet [Decitre_2003]	121
Figure A.1 : Cycles d'hystérésis du fer doux à une fréquence de :	127
0,05 Hz (a), 0,5 Hz (b), 1 Hz (c) et 5 Hz (d)	127
Figure A.2 : Cycles d'hystérésis de l'acier 16NCD13 sans et avec un entrefer de 0,1, 0,2 et 0,4 mm (fréquence d'excitation de 1 Hz)	128
Tableau A.1 : Échantillons magnétiques évalués.....	129
Figure A.3 : Cycles majeurs des échantillons : acier 0,35%C (a), acier 16MND5 (b), acier 32CDV13 (c), inox 15-5-PH (d), acier allié (e) et ferrite 3C94 (f) (fréquence d'excitation de 1 Hz)	130
Figure B.1 : Segment de mesure et zone de défaut sélectionné.....	131
Figure B.2 : Représentation des points de mesure dans un plan complexe	132
Figure B.3 : Rapport signal à bruit en fonction de la rotation appliquée	132

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Conductivité électrique de métaux purs à 300 K	33
Tableau 1.2 : Exemples de perméabilités relatives initiales et maximales	38
Tableau 2.1 : Échantillons magnétiques évalués	46
Tableau 2.2 : Caractéristiques géométriques et physiques de la bobine et du matériau	47
Tableau 2.3 : Caractéristiques géométriques et physiques des capteurs et du matériau	50
Tableau 2.4 : Caractéristiques du capteur	52
Tableau 2.5 : Caractéristiques géométriques et physiques des capteurs (a), (b) et (c)	53
Tableau 2.6 : Étalons conducteurs utilisés	57
Tableau 2.7 : Étalons ferritiques utilisés	62
Tableau 2.8 : Échantillons ferromagnétiques étudiés	63
Tableau 2.9 : Caractéristiques géométriques de la bobine d'émission	73
Tableau 2.10 : Caractéristiques géométriques des bobines réceptrices simulées	74
Tableau 2.11 : Simulation de la tension aux bornes des bobines à un courant de 1 mA (10Hz)	76
Tableau 2.12 : Simulation de la tension aux bornes des bobines pour le nombre de spires donné à un courant de 1 mA (10 Hz)	76
Tableau 2.13 : Caractéristiques du capteur	76
Tableau 2.14 : Description des échantillons étudiés	77
Tableau A.1 : Échantillons magnétiques évalués	129

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[12718_2008] NF EN ISO 12718:2008-11, *Essais non destructifs – Contrôle par courants de Foucault – Vocabulaire* (2008).

[60404-4_2009] NF EN 60404-4/A2, *Matériaux magnétiques - Partie 4 : Méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques des matériaux magnétiquement doux* (2009).

[60468_1974] CEI 60468:1974, *Méthode de mesure de la résistivité des matériaux métalliques* (1974).

[A773_2001] ASTM A773 / A773M-01, *Standard test method for dc magnetic properties of materials using ring and permeameter procedures with dc Electronic hysteresographs*, ASTM International, West Conshohocken, PA (2001).

[Adewale_2013] Adewale I.D. et Tian G.Y., Decoupling the influence of permeability and conductivity in pulsed eddy-current measurements, *IEEE Trans. Magn.*, vol. **49**, No 3, pp. 1119-1127 (2013).

[Ahmad_2012] Ahmad Latif N.A., Dollah M., Kamaron M.K. et Ibrahim S., *A study of frequency effects on conductivity measurements*, Malaysian Nuclear Agency, rapport No MY1204241 (2012).

[Aubert_2010] Aubert & Duval, *Alliage titane TA6V Ti-6Al-4V*, Référence 8809b (2010).

[Auld_1991] Auld B.A., *Probe-flaw interactions with eddy current array probes*, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **10A**, pp. 951-955 (1991).

[B193_2014] ASTM B193-02, *Standard test method for resistivity of electrical conductor materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA (2014).

[Bertrand_1878] Bertrand J.L.F., *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Paris: Gauthier-Villars (1878).

[Bowler_2005] Bowler N. et Huang Y., Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point methods, *Meas. Sci. Technol.*, vol. **16**, No 11, pp. 2193-2200 (2005).

[Brissonneau_1997] Brissonneau P., *Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique*, Paris : Hermès (1997).

[Burke_2008] Burke S.K. et Ditchburn R.J., Mutual impedance of planar eddy-current driver-pickup spiral coils, *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. **19**, pp. 1-19 (2008).

Références bibliographiques

[Chen_2015] Chen X. et Lei Y., Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method, *NDT&E Int.*, vol. **75**, pp. 33-38 (2015).

[Chew_1990] Chew W.C., *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, New York : van Nostrand Reinhold (1990).

[CIVA] CIVA, Plateforme de simulation dédiée au CND, URL: <http://www-civa.cea.fr>

[Coey_2011] Coey J.M.D., *Magnetism and magnetic materials*, Cambridge: Cambridge University press, (2011).

[Collins_1985] Collins H.D. et Gribble R.P., Eddy current curvilinear scanned linear array near real-time imaging technique, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **4A**, pp. 517-524 (1985).

[Copley_1983] Copley D.C., Eddy-current imaging for defect characterization, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **2B**, pp. 1527-1540 (1983).

[Dahia_2014] Dahia A., *Contribution à la caractérisation non destructive de matériaux magnétiques sous contraintes par méthode électromagnétique*, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, France, spécialité Physique (2014).

[Dahia_2015] Dahia A., Berthelot E., Le Bihan Y. et Daniel L., A model-based method for the characterisation of stress in magnetic materials using eddy current non-destructive evaluation, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **48**, No 19, pp. 195002 (2015).

[Debus_1992] Debus A. et Vannes A.B., *Contrôle non destructif par courants de Foucault. Propriétés électromagnétiques des matériaux*, CAST, Niveau III, INSA de Lyon (1992).

[Decitre_2003] Decitre J.-M., *Modélisation électromagnétique et réalisation d'un dispositif d'imagerie magnéto-optique quantitatif*, Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, France, spécialité Électronique – Électrotechnique – Automatique (2003).

[Decitre_2013] Decitre J.-M., *Tête de contrôle d'un capteur de contrôle non destructif par courants de Foucault et capteur comportant une telle tête de contrôle*, Brevet No Fr-3005503-B1 (2013).

[Decitre_2014] Decitre J.-M., Marchand B., Nozais F., Cartier F., Ruaud C., Dessendre M., Weber M., Durez B. et Trétout H., Développement de sondes flexibles multiéléments courants de Foucault, *Cofrend 2014*, Bordeaux (France) (2014).

[Delabre_2014] Delabre B. et Decitre J.-M., *Procédé de fabrication d'une tête de contrôle d'un capteur contrôle non destructif à courants de Foucault*, Brevet No FR-3021115-A1 (2014).

[Desjardins_2016] Desjardins D., Krause T.W. et Clapham L., *Transient eddy current method for the characterization of magnetic permeability and conductivity*, *NDT&E Int.*, vol. **80**, pp. 65-70 (2016).

[Dinger_1952] Dinger J.E., *Method and apparatus for measuring the thickness of nonconducting coatings or films*, Brevet No US-2581394-A (1952).

[Ditchburn_2003] Ditchburn R.J., Burke S.K., et Posada M., *Eddy-Current nondestructive inspection with thin spiral coils: long cracks in steel*, *J. Nondestruct. Eval.*, vol. **22**, pp. 63-77 (2003).

[Dodd_1968] Dodd C.V. et Deeds W.E., *Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems*, *J. Appl. Phys.*, vol. **39**, No 6, pp. 2829-2838 (1968).

[Drake_1932] Drake H.C., *Rail flaw detector*, Brevet No US-1870796-A (1932).

[Duane_1987] Duane J.P., *Flexible eddy-current coil and coil array for nondestructive testing*, Brevet No EP-0228177-A2 (1987).

[Dumont_1996] Dumont-Fillon J., *Contrôle non destructif (CND)*, Techniques de l'ingénieur, Référence R1400 (1996).

[Dziczkowski_2013] Dziczkowski L., *Elimination of coil liftoff from eddy current measurements of conductivity*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. **62**, No 12, pp. 3301-3307 (2013).

[E1004_2009] ASTM E1004-09, *Standard Test Method for Determining Electrical Conductivity Using the Electromagnetic (Eddy-Current) Method*, ASTM International, West Conshohocken, PA (2009).

[Ether_2013] Ether NDE, *SigmaCheck – Fully featured eddy current conductivity meter*, Issue 5 (2013).

[Fan_2015] Fan M., Cao B., Yang P., Li W. et Tian G., *Elimination of liftoff effect using a model-based method for eddy current characterization of a plate*, *NDT&E Int.*, vol. **74**, pp. 66-71 (2015).

[Feickert_1996] Feickert C.A., *Resonant eddy analysis: A contactless, inductive method for deriving quantitative information about the conductivity and permeability of a test sample*, Brevet No US-5528142-A1 (1996).

[Fermon_2010] Fermon C. et Pannetier-Lecoeur M., *Électronique de spin et capteurs magnétiques*, *Reflets Phys.*, vol. **18**, pp. 8-11 (2010).

Références bibliographiques

[Fitzpatrick_1993a] Fitzpatrick G.L., Thome D.K., Skaugset R.L., Shih E.Y.C. et Shih W.C.L., The present status of magneto-optic eddy current imaging technology, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **12A**, pp. 617-624 (1996).

[Fitzpatrick_1993b] Fitzpatrick G.L., Thomas D.K., Skaugset R.L., Shih E.Y.C. et Shih W.C.L., Magneto-optic/eddy current imaging of ageing aircraft : a new NDI technique, *Material Evaluation*, vol. **51**, No 12, pp. 1402-1407 (1993).

[Fitzpatrick_1996] Fitzpatrick G.L., Thome D.K., Skaugs R.L. et Shih W.C.L., Magneto-optic/eddy current imaging of subsurface corrosion and fatigue cracks in aging aircraft, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **15A**, pp. 1159-1166 (1996).

[Fiorillo_2004] Fiorillo F., *Measurement and characterization of magnetic materials*, San Diego, CA: Elsevier-Academic (2004).

[Fiorillo_2010] Fiorillo F., Measurements of magnetic materials, *Metrologia*, vol. **47**, pp. S114-S142 (2010).

[Fischer_2002] Fischer Technology Inc., New equipment, processes and materials, *Metal Finishing*, vol. **100**, issues 11-12, pp. 96 (2002).

[Fischer_2009] Fischer Technology Inc., *Fischerscope MMS PC2 – Operator's manual*, Version 1.1 (2009).

[Geithman_1993] Geithman G.A., An eddy current array imaging system, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **12A**, pp. 1025-1029 (1993).

[Gié_1985] Gié H. et Sarmant J.-P., *Électromagnétisme*, vol. **2**, Paris : Lavoisier (1985).

[Gilles-Pascaud_2006] Gilles-Pascaud C., Decitre J.-M., Vacher F., Fermon C., Pannetier M. et Cattiaux G., Eddy current flexible probes for complex geometries, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, Melville, N.Y.: American Institute of Physics , vol. **25A**, pp. 399-406 (2006).

[Gramz_1994] Gramz M. et Stepinski T., Eddy current imaging, array sensors and flaw reconstruction, *Res. Nondestr. Eval.*, vol. **5**, No 3, pp.157-174 (1994).

[Haynes_2016] Haynes W.M., *CRC Handbook of chemistry and physics*, 96th edition, Boca Raton, FL.: CRC Press/Taylor and Francis, (2016).

[Heck_1974] Heck C., *Magnetic materials and their applications*, Londres: Butterworths, (1974).

[Hedengren_1992] Hedengren K.H. et Howard P.J., Surface coverage issues when using eddy current arrays, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **11A**, pp. 1145-1152 (1992).

[Hedengren_1997] Hedengren K.H.V. et Kornrumpf W.P., *Multilayer eddy current probe array for complete coverage of an inspection surface without mechanical scanning*, Brevet No US-5659248 (1997).

[Hellier_2001] Hellier C.J., *The Handbook of Nondestructive Evaluation*, New York, N.Y.: McGraw-Hill (2001).

[Hesse_2005] Hesse O. et Pankratyev S., Usage of magnetic field sensors for low frequency eddy current testing, *Meas. Sci. Rev.*, vol. **5**, section 3, pp. 86-93 (2005).

[Hildebrand_1985] Hildebrand B.P. et Fitzpatrick G.L., Inversion of eddy current data using holographic principles, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **4A**, pp. 505-515 (1985).

[Hu_2009] Hu X. et Yang W., An imaging system with planar PCB-coil sensor array, *International Workshop on Imaging Systems and Techniques*, Shenzhen (Chine) (2009).

[Hughes_1879] Hughes D.E., On an induction-currents balance, and experimental researches made therewith, *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. **29**, pp. 56-65 (1879).

[Hurley_1992] Hurley D.C., Hedengren K.H. et Young J.D., Eddy current arrays for defect detection, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **28A**, pp. 1137-1144 (1992).

[IAEA48_2011] Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained IAEA-TECDOC-628/Rev. 2 'Training Guidelines for Non-Destructive Testing Techniques', IAEA, Vienna (2011).

[IMTT_2007] IMMT, Inc., *Large area inspection & structure health monitoring using magnetic carpet probe*, Brochure (2007).

[Joubert_2007] Joubert P.-Y., Le Diraison Y. et Pinassaud J., A linear magneto-optical imager for non-destructive evaluation, *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. **25**, pp.297-305 (2007).

[Karimian_2014] Karimian N., Wilson J.W., Peyton A.J., Yin W., Liu J., et Davis C.L., Differential permeability behavior of P9 and T22 power station steels, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. **352**, pp. 81-90 (2014).

Références bibliographiques

- [Krampfner_1988] Krampfner Y.D. et Johnson D.D., Flexible substrate eddy current coil array, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **7A**, pp. 471-478 (1988).
- [Kranz_1931] Kranz H.E., *Apparatus for measuring variations in thickness of metallic bodies*, Brevet No US-1815717-A (1931).
- [Kurokawa_2015] Kurokawa M. et Shichida T., *Eddy current testing probe and eddy current testing method*, Brevet No US-2015/0108970-A1 (2015).
- [Le Bihan_2003] Le Bihan Y., Study on the transformer equivalent circuit of eddy current nondestructive evaluation, *NDT&E Int.*, vol. **36**, No 5, pp. 297–302 (2003).
- [Le Diraison_2008] Le Diraison Y., *Imagerie à courants de Foucault pour l'évaluation non-destructive de structures rivetées aéronautiques*, Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, France, spécialité Électronique – Électrotechnique – Automatique (2007).
- [Le Diraison_2009] Le Diraison Y., Joubert P.Y. et Placko D., Characterization of subsurface defects in aeronautical riveted lap-joints using multi-frequency eddy current imaging, *NDT&E Int.*, vol. **42**, No 2, pp. 133-140 (2009).
- [Lebourgeois_2005] Lebourgeois R., *Ferrites doux pour l'électronique de puissance*, Techniques de l'ingénieur, Référence D2160 (2005).
- [Lepage_2009] Lepage B., Langlois P. et Drummy M., A phased scan eddy current array probe and a phase scanning method which provide complete and continuous coverage of a test surface without mechanical scanning, Brevet No EP-2037261-A1 (2009).
- [Li_2015] Li J., Wu X., Zhang Q. et Sun P., Pulsed eddy current testing of ferromagnetic specimen based on variable pulse width excitation, *NDT&E Int.*, vol. **69**, pp. 28-34 (2015).
- [Libby_1971] Libby H.L., *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods*, New York, N.Y.: John Wiley and Sons (1971).
- [Lissajous_1857] Lissajous J.A., Mémoire sur l'Etude optique des mouvements vibratoires, *Annales de chimie et de physique*, 3^{ème} série, vol. **51**, pp. 147-232 (1857).
- [Ma_2006] Ma X., Peyton A.J. et Zhao Y.Y., Eddy current measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals, *NDT&E Int.*, vol. **39**, pp. 562-568 (2006).

[Macecek_1991] Macecek M., Advanced eddy current array defect imaging, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, N.Y.: Plenum Press, vol. **10A**, pp. 995-1002 (1991).

[Marchand_2010] Marchand B., Decitre J.-M. et Casula O., Flexible and array eddy current probes for the inspection of complex parts, *10th ECNDT*, Moscow (Russie) (2010).

[Marchand_2012] Marchand B., Decitre J.-M. et Casula O., Innovative flexible eddy current probes for the inspection of complex parts, *18th World Conf. on NDT*, Durban (Afrique du Sud) (2012).

[Mazaleyrat_2006] Mazaleyrat F., *Introduction à la physique des matériaux électromagnétiques*, Cours de l'Institut Universitaire de Formation des Maîtres de Créteil (2006).

[Mazaleyrat_2013] Mazaleyrat F., *Matériaux magnétiques : Des principes aux applications*, Cours de l'École Normale Supérieure de Cachan (2013).

[McCary_1984] McCary R.O., Oliver D.W., Silverstein K.H. et Young J.D., Eddy current imaging, *IEEE Trans. Magn.*, vol. **MAG-20**, No 5, pp. 1986-1988 (1984).

[Mook_2006] Mook G., Hesse O. et Uchanin V., Deep penetrating eddy currents and probes, *9th ECNDT*, Berlin (Allemagne) (2006).

[Moosbrugger_2000] Moosbrugger C., *ASM Ready reference: Electrical and magnetic properties of metals*, Materials Park, OH: ASM International (2000).

[Nath_2002] Nath S.C., Batzinger T.J., Rose C.W. et Stryjek P.P., *Eddy current inspection method and apparatus for detecting flaws in an electrically conductive component*, Brevet No US-6414483-B1 (2002).

[NDTH_2004] *Nondestructive Testing Handbook*, 3^{ième}édition, vol.5, *Electromagnetic Testing*. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing (2004).

[Obrutsky_1997] Obrutsky L.S., Sullivan S.P. et Cecco V.S., *Transmit-receive eddy current probes*, 3rd CORENDE, Mendoza (Argentine) (1997).

[Ouyang_2009] Ouyang T. and Sun Y., *Apparatus and method for eddy-current scanning of a surface to detect cracks and other defects*, Brevet No US-7560920-B1 (2009).

[Paillard_2007] Paillard S., *Développement d'un modèle pour le contrôle non destructif par courants de Foucault de structures rivetées en aéronautique*, Thèse de doctorat, Université Paris-sud 11, France, spécialité Physique (2007).

Références bibliographiques

[Peng_2014] Peng T., Moulin J., Alves F. et Le Bihan Y., Fabrication and AC characterization of magneto-impedance microsensors for alternating magnetic field measurement, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. **45**, No 1, pp. 809-816 (2014).

[Perdrix_1990] Perdrix M., *Contrôle non destructif par courants de Foucault. La théorie des courants de Foucault*, CAST, Niveau III, INSA de Lyon (1990).

[Ramos_2014] Ramos H.G. et Lopes Ribeiro A., Present and future impact of magnetic sensors in NDE, *Procedia Engineering*, vol. **86**, pp. 406-419 (2014).

[Ripka_2001] Ripka P., *Magnetic sensors and magnetometers*, Boston, MA: Artech (2001).

[Roney_2006] Roney R.M. et Murphy T.F., *Methods and apparatus for eddy current inspection of metallic posts*, Brevet No US-7026811-B2 (2006).

[Smits_1958] Smits F.M., Measurement of sheet resistivities with the four-point probe, *Bell System Technical Journal*, vol. **34**, pp. 711-718 (1958).

[Snyder_1995] Snyder P.J., *Method and apparatus for reducing errors in eddy-current conductivity measurements due to lift-off by interpolating between a plurality of reference conductivity measurements*, Brevet No US-5394084 (1995).

[Stossel_1981] Stossel A., *Caractérisation de l'état métallurgique des alliages fer-carbone par la méthode des courants de Foucault*, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme, France (1981).

[Sun_2006] Sun Y. et Ouyang T., Large area instant crack detection and identification using magnetic carpet probe, *9th Joint FAA/DoD/NASA Conference on Aging Aircraft*, Atlanta (Géorgie – USA) (2006).

[Sun_2007] Sun Y., Ouyang T., Yang X. et Zhu H., Magnetic carpet probe for large area crack instant crack/corrosion detection and health monitoring, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Editeurs : Thompson D.O. et Chimenti D.E, AIP Conf. Proc. **894**, pp.926-933 (2007).

[Tai_1996] Tai C.C., Rose J.H. et Moulder J.C., Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy-current measurements. *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **67**, No 11, pp. 3965-372 (1996).

[Theodoulidis_2008] Theodoulidis T., Developments in calculating the transient eddy-current response from a conductive plate, *IEEE Trans. Magn.*, vol. **44**, No 7, pp. 1894-1896 (2008).

[Trémolet_2000] du Trémolet de Lacheisserie E., *Magnétisme*, vol. 1, Grenoble: EDP Sciences (2000).

[Vuillermoz_1994] Vuillermoz P.L., *Les courants de Foucault : Principes, mesure et contrôle*, AFNOR, (1994).

[Wilson_2014] Wilson J.W., Karimian N., Liu J., Yin W., Davis C.L. et Peyton A.J., Measurement of the magnetic properties of P9 and T22 steel taken from service in power station, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. **360**, pp. 52-58 (2014).

[Yin_2012] Yin W., Karimian N., Liu J., Zhou L., Peyton A.J., Strangwood M. et Davis C.L., Measurement of electromagnetic properties of power station steels, *NDT&E Int.*, vol. **51**, pp. 135-141 (2012).

[Zergoug_2000] Zergoug M., Hammouda A., Sellidj F., Boucherou N., Haddad H., Mebrek S., Benchaala A. et Oussaid G., Probe characterization and simulation of conductivity, *15th World Conf. on NDT*, Rome (Italie) (2000).

[Zhang_2014a] Zhang F., Walasezk H. et Gos C., Application des méthodes électromagnétiques à la caractérisation non destructive des composants mécaniques, *Cofrend 2014*, Bordeaux (France) 2014.

[Zhang_2014b] Zhang F., Walasezk H. et Gos C., Barkhausen noise technique Non-destructive characterization of mechanical components, *ECNDT 2014*, Prague (République tchèque) 2014.

COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Brevet d'invention

Delabre B. et Decitre J.-M., *Procédé de fabrication d'une tête de contrôle d'un capteur contrôle non destructif à courants de Foucault*, Brevet No FR-3021115-A1 (2014).

Article dans une revue avec comité de lecture (accepté)

Delabre B., Decitre J.-M. et Le Bihan Y., Design of a flexible eddy current probe in view of the evaluation of the electrical conductivity during inspection of defects, *Nondestructive Testing and Evaluation* (2016).

Communication avec acte

Delabre B., Decitre J.-M., Le Bihan Y. et Berthelot E., Design of a flexible eddy current sensor in view of the evaluation of electromagnetic properties of a material, *BINDT 2015*, Telford (Grande-Bretagne) (2015).

Communications sans actes

Delabre B., Decitre J.-M., Le Bihan Y. et Berthelot E., Estimation des propriétés électromagnétiques d'un matériau par courants de Foucault, *Cofrend 2015*, Marne la Vallée (France) (2015).

Delabre, B. et Decitre J.-M., Estimation des propriétés électromagnétiques d'un matériau par courants de Foucault, *Cofrend 2014*, Bordeaux (France) (2014).

DÉVELOPPEMENT DE CAPTEURS FLEXIBLES À COURANTS DE FOUCault : APPLICATIONS À LA CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DES MATÉRIAUX ET À LA DÉTECTION DE DÉFAUTS PAR IMAGERIE STATIQUE

Résumé : Ce travail de thèse porte sur le développement et l'optimisation de capteurs dans le cadre du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF). Le manuscrit présente plusieurs réalisations de capteurs CF souples gravés sur film Kapton. Un premier volet décrit l'évaluation des paramètres électromagnétiques (conductivité électrique σ et perméabilité magnétique μ) des matériaux typiquement rencontrés en CND par CF. Des méthodes conventionnelles pour estimer σ et μ ont été investiguées et mises en œuvre : il s'agit de la méthode à quatre pointes et du perméamètre. Néanmoins, ces méthodes présentent des difficultés pratiques au regard de l'état de surface (peinture, corrosion,...) et de la géométrie de l'échantillon. Deux capteurs ont donc été conçus : le premier composé d'une bobine d'émission et d'une bobine de réception afin d'évaluer la conductivité des matériaux purement conducteurs, puis le second composé d'un bobinage émetteur et d'une GMR pour évaluer la perméabilité magnétique. La conception des motifs et des résultats expérimentaux sont présentés dans le manuscrit. Le second volet décrit le développement d'un imageur CF flexible statique. L'imageur est un capteur multiélément composé de 576 récepteurs disposés en matrice permettant d'inspecter la surface d'une pièce sans déplacement du capteur par rapport à cette dernière. Le contrôle par l'imageur statique permet d'obtenir une image pixélisée de la surface sous le capteur. L'imageur a été optimisé de manière à détecter un défaut surfacique d'au moins 1 mm de long et d'orientation donnée quel que soit son emplacement vis-à-vis des bobines réceptrices. La conception du capteur et son évaluation expérimentale sont donnés dans le manuscrit.

Mots-clés : contrôle non destructif, courants de Foucault, capteur flexible multiéléments, conductivité électrique, perméabilité magnétique, imageur statique

DEVELOPMENT OF FLEXIBLE EDDY CURRENT PROBES: APPLICATIONS TO THE CHARACTERIZATION OF THE ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF MATERIALS AND THE DETECTION OF FLAWS BY STATIC IMAGING

Abstract: The work of this thesis focuses on the development and the optimization of probes for non-destructive testing (NDT) by Eddy Currents (EC). The manuscript presents several achievements of flexible EC probes engraved on Kapton film. The first part describes the evaluation of the electromagnetic parameters (electrical conductivity σ and magnetic permeability μ) of materials typically encountered in NDT by EC. Conventional methods to estimate σ and μ have been investigated and implemented: it is the four-point probe and the permeameter. However, these methods present practical difficulties relating to the surface condition (paint, corrosion,...) and the sample geometry. Two probes have therefore been designed: the first is composed of a transmitting and a receiving coil in order to evaluate the conductivity of purely conductive materials, and the second is composed of a transmitter coil and a GMR for evaluate the magnetic permeability. Design patterns and experimental results are presented in the manuscript. The second part describes the development of a flexible static EC imager. The imager is a multielement probe composed of 576 receivers arranged in a matrix allowing to inspect the surface of a structure under test without moving the probe relative to the sample surface. The inspection by the static imager provides a pixelated image of the surface under the probe. The imager has been optimized to detect a surface defect of at least 1 mm long of given orientation regardless of its location relative to the receiver coils. The design of the probe and its experimental evaluation are given in the manuscript.

Keywords: non-destructive testing, eddy currents, array flexible probe, electrical conductivity, magnetic permeability, static imager