

PROJET IMAGINE : DÉVELOPPEMENT DE CAPTEURS MULTI-ÉLÉMENTS COURANTS DE FOUCAULT À BASE DE RÉCEPTEURS MAGNÉTIQUES HAUTE RÉOLUTION ET HAUTE SENSIBILITÉ
IMAGINE PROJECT: DEVELOPMENT OF EDDY CURRENT ARRAY PROBES BASED ON MAGNETIC RECEIVERS WITH HIGH RESOLUTION AND HIGH SENSITIVITY

C. Gilles-Pascaud, CEA LIST, France
H. Jaffres, Unité mixte CNRS/THALES, France
F. Nguyen Van Dau, THALES R&T, France
F. Alves, LGEP/ SUPELEC, France
J. Moulin, IEF, France
N. Dominguez, EADS IW, France
C. Ruaud, STATICE, France

Résumé

La fiabilité des structures et la sécurité des installations sont des impératifs incontournables auxquels doivent répondre de nombreux secteurs industriels. L'enjeu primordial est de détecter un composant défectueux ou susceptible de le devenir lors de sa fabrication ou pendant des inspections en service, tout en améliorant la productivité du contrôle. Pour répondre à ces exigences, IMAGINE vise à développer des technologies innovantes de capteurs courants de Foucault (CF) multi-éléments à haute résolution et haute sensibilité afin d'améliorer les performances en détection. Ce projet repose sur la mise en œuvre de nouveaux composants magnétiques fondés sur les magnéto-résistances à effet transverse, les magnéto-résistances à effet tunnel, les magnéto-impédances, et sur la réalisation de capteurs CF intégrant ces composants comme récepteurs.

Cette contribution présente l'étude réalisée par simulation avec le logiciel CIVA afin de définir l'architecture des capteurs permettant de répondre aux applications industrielles visées, les procédés technologiques mis en œuvre pour réaliser les capteurs magnétiques multi-éléments en technologie intégrée, et les premiers résultats de validation des capteurs développés.

Abstract

The reliability of the structures and the safety of the installations are requirements to which a lot of industrial sectors must answer. The main stake is to detect a defective component or likely to become it during manufacture or in-service inspections, while improving control productivity. In this context, IMAGINE aims at developing innovating technologies of eddy current array (EC) probe with high sensitivity and high resolution to improve the detection performances. This project is based on the development of new magnetic components such as transverse and tunnel magneto-resistance, magneto-impedance, and the realization of EC probe integrating these components as receivers.

This contribution presents the study carried out by simulation with CIVA software to define the probe architecture in the case of selected industrial applications, the technological processes developed to produce the array probe in integrated technology, and the first validation results.

INTRODUCTION

Cette contribution décrit les résultats marquants associés au projet IMAGINE (Imagerie MAGnétique pour l'Inspection à l'aide de Nanostructures magnétiquEs), labellisé en décembre 2005 auprès du Programme en Nanosciences et Nanotechnologies (PNANO) de l'Agence Nationale pour la Recherche. Ce projet d'une durée de trois ans réunit des partenaires industriels, des laboratoires de recherche, et des laboratoires universitaires.

Après une présentation des enjeux et du contenu scientifique du projet, la seconde partie de cet article est consacrée à l'étude réalisée par simulation avec le logiciel CIVA afin de définir l'architecture des capteurs courants de Foucault (CF) répondant aux applications industrielles spécifiées. Les procédés technologiques mis en œuvre pour réaliser les composants magnétiques en technologie intégrée sont décrits dans la troisième partie. La dernière partie de cette contribution présente les capteurs CF développés à base de ces composants magnétiques.

Contexte et objectifs du projet

Les capteurs inductifs sont les capteurs les plus communément utilisés pour le CND par courants de Foucault. Cependant, on assiste depuis quelques années à l'émergence de nouvelles technologies de capteurs de champ magnétique afin de dépasser les performances des capteurs bobinés en termes de sensibilité et de résolution.

L'objectif d'IMAGINE est de développer des technologies innovantes de capteurs magnétiques à base de magnéto-résistances à effet transverse et effet tunnel, et de magnéto-impédances. La motivation principale du projet est de lever plusieurs verrous technologiques dans la mise en œuvre des capteurs magnétiques multi-éléments afin de proposer au marché du CND actuellement très demandeur, un gain important en sensibilité et en résolution lui permettant d'ouvrir de nouveaux marchés et de réduire les cycles de contrôle.

Descriptif technique

Le projet est constitué de quatre principaux lots techniques reposant sur :

- l'établissement par simulation des spécifications techniques associées aux capteurs prototypes développés dans le projet.
- la mise en œuvre et la validation des process technologiques liés à la réalisation des composants magnétiques magnéto-résistances à effet transverse et tunnel, et magnéto-impédances.
- Le développement de la connectique et du packaging pour l'intégration des capteurs magnétiques au sein des capteurs courants de Foucault. Un démonstrateur multi-éléments à base de magnéto-résistances à effet transverse, et des dispositifs mono-élément à base de magnéto-résistance à effet tunnel et magnéto-impédance sont attendus dans le cadre du projet.
- l'évaluation des performances des démonstrateurs.

Consortium

Sept partenaires participent au projet :

Le Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies du CEA (CEA LIST), spécialisé dans le développement de méthodes avancées pour le CND, assure la coordination du projet, la conception, l'intégration et l'évaluation des capteurs CF.

Le laboratoire THALES R&T et l'unité mixte CNRS/THALES, spécialisés dans la thématique électronique de spin et capteurs magnétiques, assurent la validation des process technologiques liés au développement des magnéto-résistances à effet transverse et tunnel.

Le laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP/SUPELEC) et l'Institut d'Electronique Fondamentale (IEF) assurent la conception et la réalisation des magnéto-impédances en technologie intégrée.

L'industriel EADS IW, dont les compétences concernent la recherche technologique et le développement dans le domaine de l'aéronautique apporte, à travers son équipe de fiabilité des structures et investigations non-destructives, une expertise métier et un contexte applicatif au projet.

La PME STATICE, spécialisée dans l'étude et le développement microtechnique, assure le transfert industriel des technologies de capteurs développées.

OPTIMISATION DU DESIGN DES CAPTEURS CF

Cas d'application sélectionnés

Deux applications aéronautiques sont traitées dans le cadre du projet :

- une application haute fréquence liée à la recherche de très petits défauts débouchants ($0.2 \times 0.1 \times 0.1$ mm) dans les moteurs d'avion (aubes de turbine, alvéoles...).
- une application basse fréquence associée à la détection de fissures en tôles inférieures dans des jonctions rivetées (défauts enterrés de quelques mm de long sous une épaisseur d'aluminium comprise entre 4 et 16mm) des structures d'aéronefs.

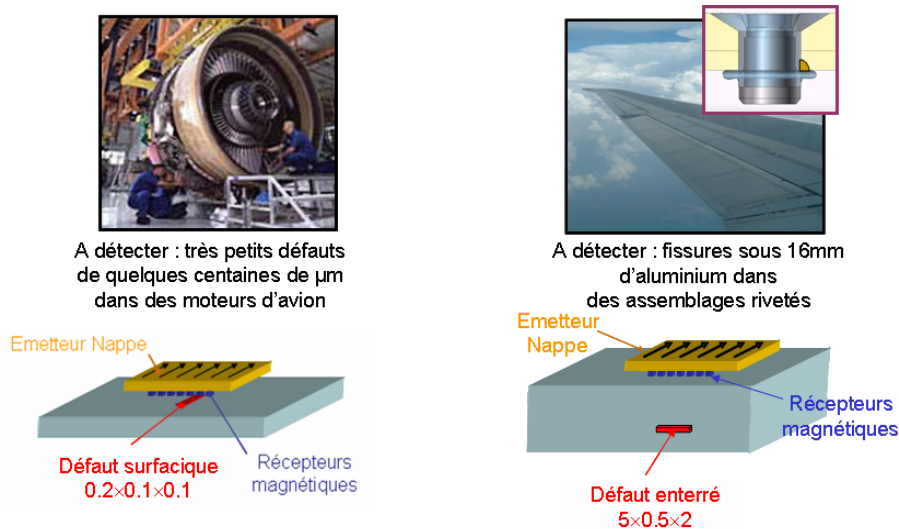


Figure 1 : Applications industrielles identifiées dans IMAGINE, et description des configurations de contrôle étudiées par simulation

Ces deux applications nécessitent la mise en œuvre de capteurs à haute sensibilité et à haute résolution spatiale afin d'améliorer le rapport signal sur bruit et la probabilité de détection. Ces cas illustrent le besoin de développer de nouveaux capteurs pour dépasser les performances des techniques inductives limitées du fait de la diminution de la sensibilité des bobinages en fonction de leur taille et de la fréquence d'excitation.

Etude par simulation

L'architecture des capteurs prototypes permettant de répondre aux cas d'application sélectionnés a été optimisée à l'aide du logiciel CIVA [1]. Il s'agit d'une plate-forme de simulation dédiée au CND par ultrasons, courants de Foucault, et rayons X, et constituée de modules de simulation, d'imagerie et d'analyse. Le logiciel est associé à une interface utilisateur conviviale facilitant la description des configurations de contrôle et la résolution

des problèmes numériques. Les modèles courants de Foucault intégrés dans CIVA sont fondés sur la méthode de résolution des intégrales de volume utilisant le formalisme des dyades de Green, et dont l'un des principaux intérêts est de prédire rapidement le signal d'un capteur lié à la présence d'un défaut 3D [2].

Les configurations de contrôle décrivant les applications sélectionnées ont été simulées afin de définir les spécifications liées à l'architecture des capteurs CF comprenant un inducteur et un récepteur magnétique. Plus particulièrement, cette étude a permis d'évaluer les paramètres liés à l'inducteur (technologie, dimensions, fréquence d'excitation, courant d'injection) et ceux liés au récepteur magnétique (technologie, positionnement, pas entre éléments pour un capteur multi-éléments). Pour chacune des deux applications, les composantes du champ magnétique B_x et B_y liées aux perturbations des lignes de courant induites par la présence du défaut ont été calculées pour différentes valeurs de la fréquence d'excitation (Figure 2 et Figure 3).

Pour la détection des petits défauts débouchants, les résultats préconisent l'utilisation à haute fréquence (quelques MHz) d'un capteur CF à base d'un émetteur nappe de courant et d'un récepteur multi-éléments ayant un pas optimum entre éléments de $150\mu\text{m}$. Le récepteur privilégié pour cette application est une magnéto-résistance à effet transverse ou tunnel.

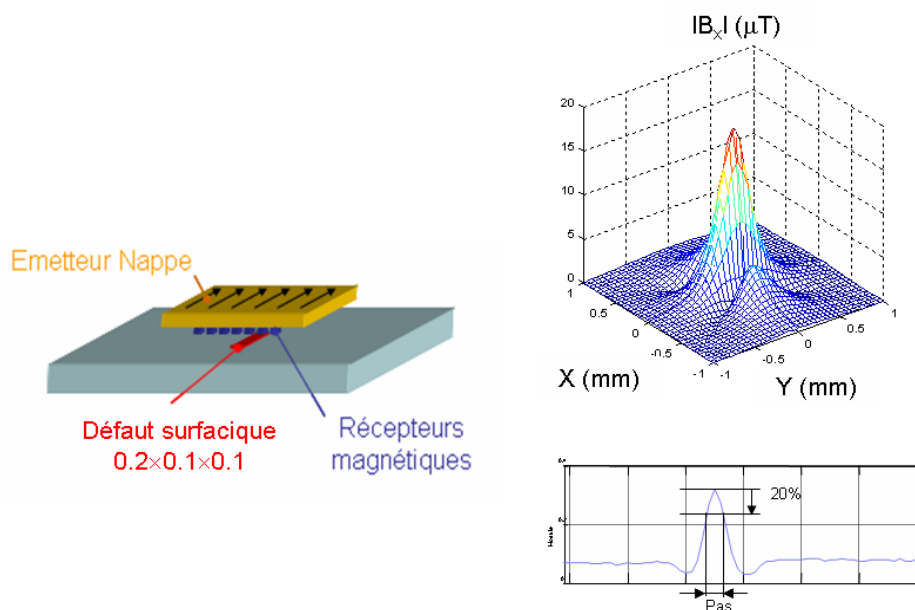


Figure 2: Simulation du champ magnétique lié à la présence d'un petit défaut surfacique

Concernant la détection des défauts enfouis, la simulation privilégie l'utilisation d'un capteur à basse fréquence (dizaine d'Hz). L'architecture retenue est un capteur mono-élément à base d'un émetteur nappe de courant et d'un récepteur à base de magnéto-impédance à effet géant.

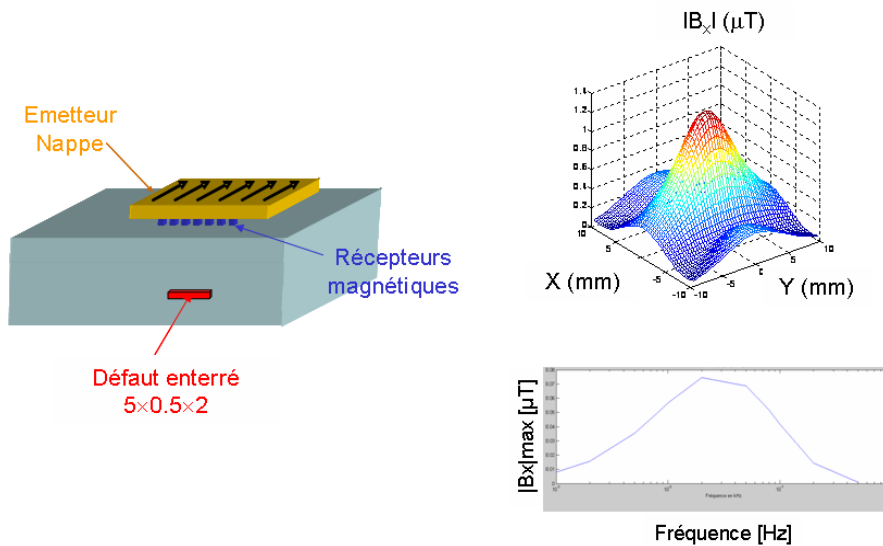


Figure 3 : Simulation du champ magnétique lié à la présence d'un défaut enfoui sous 16mm d'épaisseur

DEVELOPPEMENT ET VALIDATION DES TECHNOLOGIES DE RECEPTEURS MAGNETIQUES

Magnéto-résistance en mode transverse

Une magnéto-résistance est un capteur de champ magnétique dont la résistance est sensible au champ magnétique. Ce type de capteur repose sur la mesure transverse de l'effet de magnétorésistance anisotrope dans un film mince ferromagnétique [3]. Par rapport à la mesure classique longitudinale, cette géométrie permet de mesurer un signal d'amplitude directement proportionnel au champ et sans composante constante. Dans le cadre d'IMAGINE, l'enjeu est de développer une technologie multi-éléments à base de ces composants. Dans le cadre du projet, un travail a été entrepris pour améliorer et fiabiliser les étapes de lithographie intervenant dans le process technologique de réalisation des magnéto-résistance à effet transverse. Un process complet a été réalisé et a permis d'obtenir un wafer contenant une centaine d'échantillons mono-élément (Figure 4).

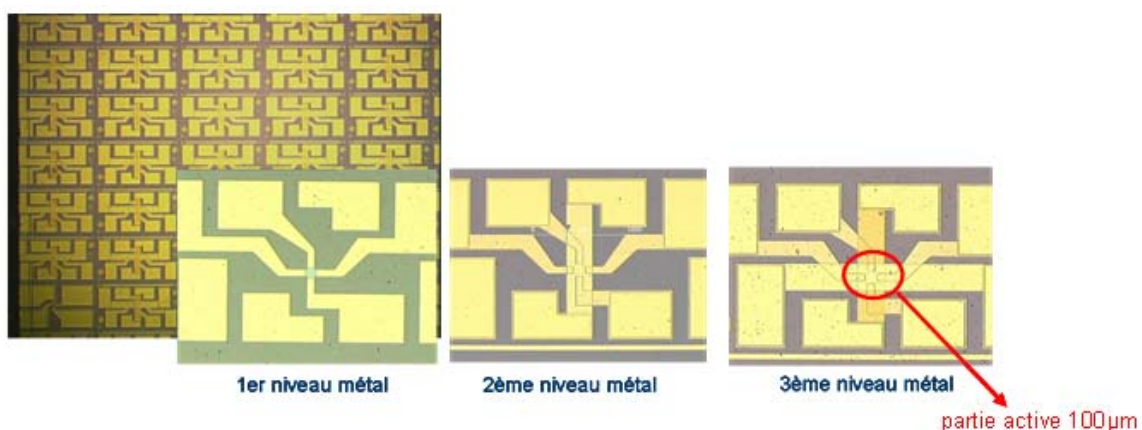


Figure 4 : Description du process technologique

Les performances de ces échantillons ont été caractérisées à l'aide d'un équipement de testeur sous pointe avec champ magnétique mis en œuvre pour le projet. La Figure 5 montre une fonction de transfert typique obtenue ainsi que la partie linéaire et réversible de cette fonction à partir de laquelle est évaluée la sensibilité du capteur. Les mesures montrent une bonne reproductibilité des éléments en sensibilité avec une valeur d'environ 100V/T.A

quelque soit l'échantillon considéré. Les travaux en cours concernent le design et la réalisation d'un composant multi-éléments intégrant une centaine de puces magnétorésistives.

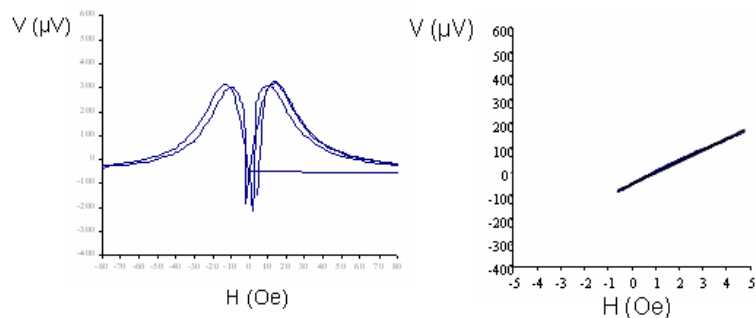


Figure 5 : Fonction de transfert typique obtenu sur les capteurs à magnéto-résistance transverse

Magnéto-résistance à effet tunnel

La magnéto-résistance à effet tunnel est une résistance électrique sensible au champ magnétique, composée de deux couches magnétiques conductrices séparées par une barrière isolante de quelques nanomètres d'épaisseur (la barrière tunnel) [4]. La résistance électrique opposée au passage du courant par effet tunnel d'un matériau à l'autre au travers de la couche isolante varie alors en fonction de l'orientation relative des deux couches magnétiques, la résistance étant généralement maximale dans un alignement antiparallèle. Dans l'état actuel de développement de cette technologie, le problème de la dérive d'offset, principale cause limitant la précision des capteurs, n'est pas traité. Le but visé dans le projet est de développer un process technologique permettant d'adapter des composants au CND.

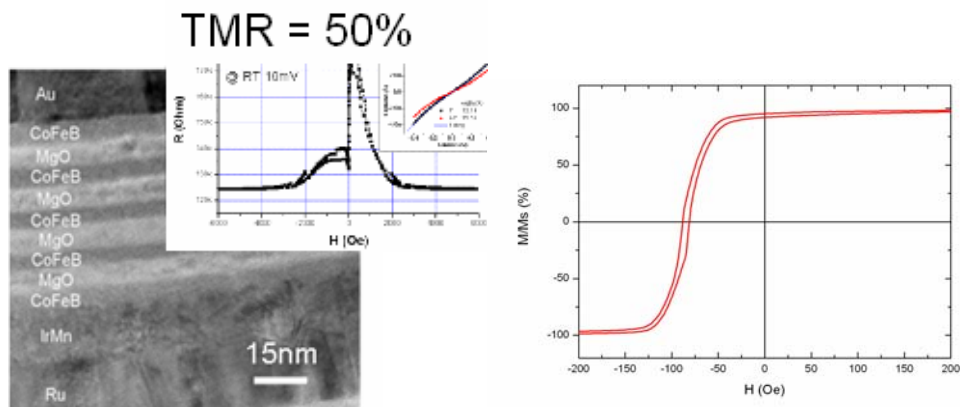


Figure 6 : Obtention des jonctions tunnel à base d'oxyde de magnésium et cycle d'hystérésis observé sur l'empilement optimisé

Dans le cadre du projet, l'optimisation de la croissance des jonctions tunnel à base d'oxyde de magnésium a été réalisée par pulvérisation cathodique (Figure 6). Les travaux réalisés ont permis de concevoir et de fiabiliser le procédé de lithographie afin de réaliser une jonction tunnel adaptée à un fonctionnement de type capteur de champ magnétique linéaire et réversible. La prochaine étape concerne l'intégration du composant dans un capteur courants de Foucault afin de tester ses performances pour les applications CND sélectionnées.

Magnéto-impédance

Une magnéto-impédance (MI) est un capteur de champ magnétique dont l'impédance est sensible au champ magnétique. Cet effet est lié à une modification de la profondeur de pénétration d'un courant alternatif de fréquence élevée au travers d'un matériau ferromagnétique soumis à un champ externe. L'effet est toutefois considérablement augmenté dans le cas d'un empilement ferromagnétique/conducteur/ferromagnétique [5, 6]. Les capteurs développés actuellement sont des assemblages unitaires d'un ruban de cuivre et de deux films amorphes nanocristallins. Dans le cadre d'IMAGINE, l'objectif est de passer d'une technique d'assemblage macroscopique à un procédé d'élaboration de films minces. La maîtrise d'une technologie de fabrication collective ouvrira des perspectives d'applications multi-éléments.

Dans le cadre du projet, des composants MI de type multicouches Finemet/Cuivre/Finemet ont été réalisés en technologie intégrée par lift-off de films déposés par pulvérisation RF (Finemet) et DC (Cuivre) (Figure 7 et Figure 8).

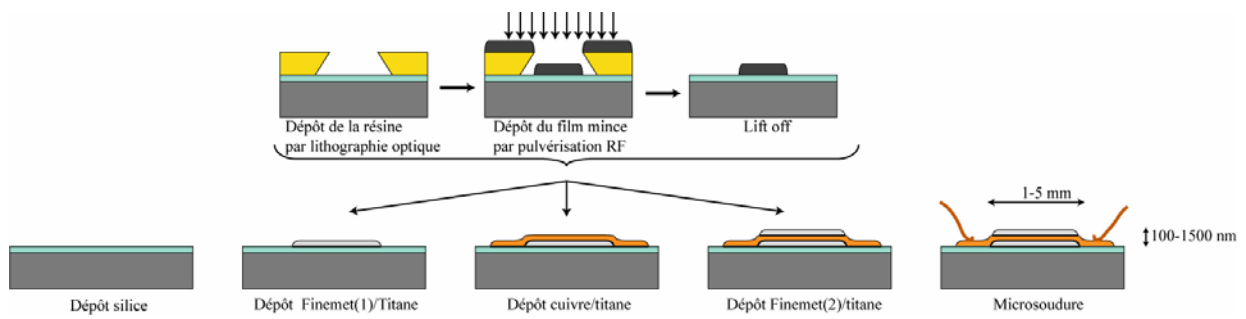


Figure 7 : Schéma du process technologique mis en œuvre pour développer des magnéto-impédances en technologie intégrée

Les propriétés du capteur sont étroitement corrélées à celles du matériau ferromagnétique. L'optimisation des conditions de dépôt et de la température de recuit ont permis d'obtenir une couche magnétique de 500nm d'épaisseur, de champ coercitif $40\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ et de polarisation à saturation 1,4T.

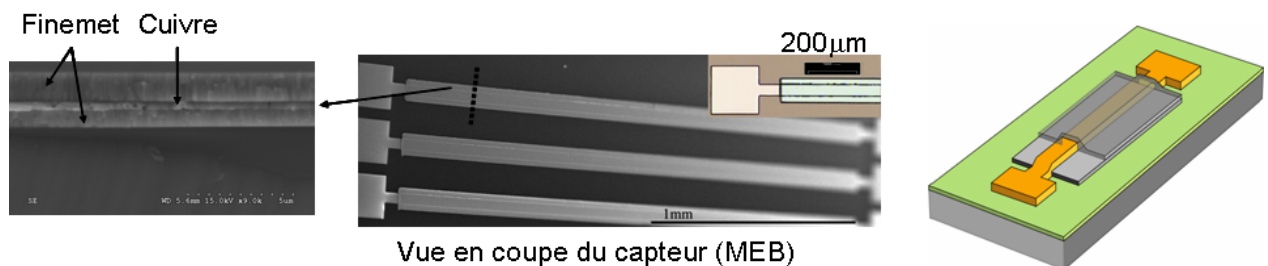


Figure 8 : Vue en coupe des composants MI multi-couches développés dans le cadre d'IMAGINE

Les échantillons obtenus présentent une variation de la partie imaginaire de l'impédance maximale de l'ordre de 12% à 1 MHz (Figure 9). La sensibilité atteinte sur les premiers capteurs est de 0,15%/Oe ou 20 V/T.A que ce soit en champ continu ou alternatif (essais effectués jusqu'à 73 Hz). Des structures en domaines magnétiques transverses (90° par rapport à l'axe longitudinal des capteurs) bien marquées, nécessaires à un fort effet de magnéto-impédance ne sont pas observées et des traitements thermiques sous champ magnétique sont envisagés pour améliorer les performances des futurs capteurs.

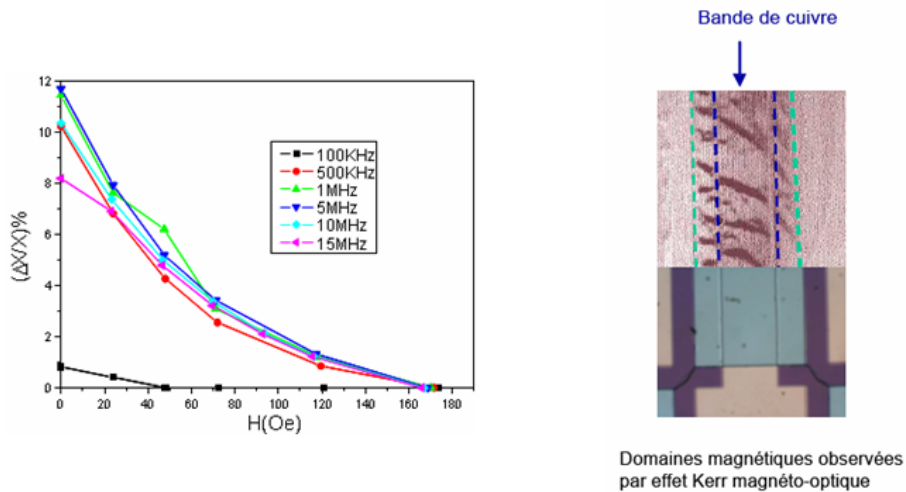


Figure 9 : Caractéristiques des capteurs développés

ETUDE DE L'INTEGRATION DES COMPOSANTS MAGNETIQUES

Un des axes de travail d'IMAGINE est consacré à l'étude du packaging et de la connectique en vue d'intégrer les composants magnétiques en tant qu'éléments récepteurs des capteurs CF. Afin de s'assurer des bonnes performances de ces composants en termes de CND, un premier capteur CF a été spécialement conçu. Une bobine sert d'émetteur et un élément magnéto-résistif intégré dans un boîtier DIL constitue le récepteur (Figure 10). Ce capteur a pour objectif la détection à basses fréquences de défauts enterrés. L'intérêt de ce dispositif est de pouvoir interchanger facilement le boîtier DIL, et ainsi tester plusieurs composants magnétiques au sein du même capteur CF.

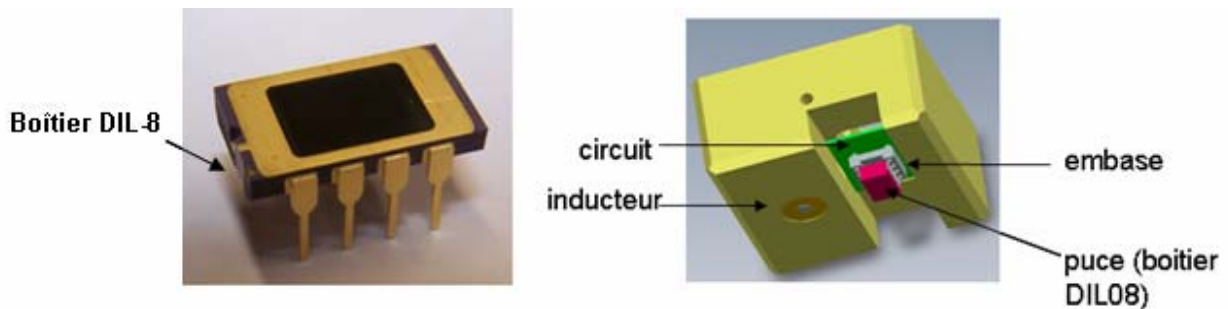


Figure 10 : Capteur mono-élément obtenu après packaging

En parallèle, un second capteur dédié à la détection de petits défauts surfaciques est en cours de développement. L'intégration des composants magnéto-résistifs sera différente de celle du premier capteur compte tenu des contraintes liées à cette application. La validation du procédé d'intégration débouchera sur la réalisation d'une sonde multi-éléments basée sur la même technologie.

CONCLUSIONS

Cette contribution présente les principaux résultats obtenus dans le cadre du projet IMAGINE. Elle met en évidence l'apport des outils de modélisation pour optimiser le design des capteurs CF en fonction des configurations de contrôle retenues par les partenaires, ainsi que les travaux réalisés pour développer des récepteurs magnétiques haute sensibilité et haute résolution adaptés aux applications de contrôle non destructif. Les travaux en cours concernent l'étude et la réalisation du packaging et de la connectique en vue de la réalisation et de la validation des performances des démonstrateurs attendus dans le cadre du projet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Informations sur CIVA: www-civa.cea.fr
- [2] Le Ber L., Calmon P., Sollier T., Mahaut S., Benoist P., Advances of simulation and expertise capabilities in CIVA platform, QNDE Vol. 25, 2006, pp. 684-691.
- [3] Montaigne F., Schuhl A., Nguyen Van Dau F., Encinas A., Development of planar Hall effect sensors for applications to microcompass, Sensors and Actuators, A81, 324 (2000)
- [4] Field sensing using the magnetoresistance of IrMn exchange-biased tunnel junctions, D. Lacour, H. Jaffrès, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, A. Vaurès et J. Humbert, J. Appl. Phys., 91, 4655 (2002)
- [5] Bensalah A-D., Barrué R., Alves F., Abi Rached L., GMI Sensors based on rapidly Stress-annealed FESiBCuNb Ribbons, Sensor Letters, vol. 5, 1-3, 2007.
- [6] Alves F., Abi Rached L. Coillot C., Moutoussamy J., Trilayer GMI sensor based on fast stress-annealing of FeSiBCuNb ribbons, Sensors and Actuators A, 2007, on line.