

Simulation d'un contrôle par GMR de pièces aluminium

*Fabrice FOUCHER¹, Marc DESSENDRE², Hervé TRETOUT²,
Jean-Marc DECITRE³, Laura PUCCI³, Jean-Marc SARTEEL⁴*

¹ EXTENDE, 15 Avenue Emile BAUDOT 91300 MASSY, fabrice.foucher@extende.com,

² DASSAULT AVIATION, Etablissement d'Argenteuil, 1 Avenue du Parc, 95100 ARGENTEUIL,

³ CEA LIST DISC, CEA Saclay – Digiteo Labs, Bâtiment 565-PC058, 91191 GIF SUR YVETTE

⁴ STATICE, 9, rue Thomas Edison, 25038 BESANCON

RESUME

Une étude de simulation de capteurs à Courants de Foucault avec des récepteurs de technologie GMR (Magnéto-Résistance Géante) a été menée pour positionner des éléments en aluminium sous des plaques épaisses de ce même matériau. Cette étude a été menée par la société EXTENDE en collaboration avec DASSAULT AVIATION. Elle a notamment permis de comparer les performances d'un capteur GMR avec celui d'un capteur inductif, d'étudier la sensibilité du capteur à la position de la GMR, d'optimiser le design du capteur et d'assurer l'adaptabilité du capteur à différentes épaisseurs de plaques.

A partir des résultats de l'étude de simulation, EXTENDE, DASSAULT-AVIATION, le CEA LIST et STATICE ont défini une configuration optimale de capteurs GMR pour l'application. Le capteur a été réalisé par STATICE et a été évalué dans plusieurs configurations au CEA-LIST. Il a été vérifié la bonne corrélation des signaux expérimentaux obtenus avec les signaux de simulation et les bonnes performances du capteur pour l'application.

Cet article illustre avec ces quelques résultats d'étude, l'intérêt de l'utilisation de la modélisation pour accompagner le développement d'un procédé de Contrôle Non Destructif, permettant d'apporter à la fois des résultats utiles pour les choix de développement et une meilleure compréhension et maîtrise de ces techniques, notamment pour des techniques innovantes comme il est présenté ici.

Mots-Clés: GMR, Courants de Foucault, Simulation, Aluminium

INTRODUCTION

La simulation est largement utilisée dans le cadre d'études de conception car elle a l'avantage, par rapport aux essais expérimentaux, de permettre d'évaluer un très large éventail de cas à moindre coût et d'apporter des éléments permettant d'améliorer la compréhension des phénomènes et donc la maîtrise de ce développement. Cette démarche s'applique également au Contrôle Non Destructif. Cet article présente les résultats issus d'une étude pilotée par DASSAULT AVIATION autour du développement d'un dispositif de contrôle par capteur de type GMR (capteur à magnétorésistance géante) pour le contrôle de pièces en aluminium. Cette étude a permis la réalisation d'un prototype par STATICE qui a donné lieu à des essais sur des maquettes représentatives et à une étude par simulation, réalisée par EXTENDE. La simulation ne se substitue pas aux essais mais accompagne le développement d'un prototype en aidant à faire les choix pertinents parmi les options techniques a priori disponibles. Dans

un second temps, comme cela fut le cas pour cette étude, la simulation permet de travailler sur des phases d'optimisation en amont de la mise au point du dispositif proprement dit. Enfin, la simulation peut également être utilisée dans le cadre de qualifications (étude de paramètres influents, justifications techniques, POD, etc.).

I APPLICATION DU CAPTEUR GMR POUR LE CONTROLE DE PIECES D'ALUMINIUM

Le contexte concerne ici le contrôle de pièces d'aluminium pour l'aéronautique et plus particulièrement la détection de pièces métalliques en profondeur. Une maquette représentative a été réalisée. Elle est constituée d'une plaque d'aluminium d'épaisseur variable, pouvant aller jusqu'à 15 mm puis d'une seconde pièce en aluminium placée sous la première. L'objectif est d'étudier le signal de cette seconde pièce, que l'on appellera « cible », à l'aide d'un capteur placé sur la plaque supérieure.

Les capteurs GMR font partie de la famille des capteurs magnétiques (du type capteurs à effet Hall) et sont utilisés dans différentes applications (mesure de distance, mesure de vitesse, mesure de courant, tête de lecture, etc.). Ils ont l'avantage d'être moins sensibles aux variations de température que les capteurs à effet Hall. Pour les applications CND, ils présentent un intérêt par rapport aux capteurs traditionnels inductifs par leur meilleure sensibilité à basse fréquence. Ils constituent ainsi une technologie compétitive pour la détection de défauts, ou plus généralement de discontinuités, en profondeur. Les capteurs GMR offrent aussi des capacités de très haute résolution, intéressantes pour la recherche de très petits défauts. Le CEA LIST travaille depuis plusieurs années sur ce type de technologies et a publié sur plusieurs réalisations, voir par exemple [1] et [2]. La partie sensible d'une GMR est constituée d'une succession de plusieurs couches de matériaux métalliques ferromagnétiques et non ferromagnétiques. Cet empilement a la particularité de présenter une forte chute de sa résistivité lorsqu'un champ magnétique lui est appliqué, constituant ainsi un élément sensible de mesure au champ magnétique [3]. Dans sa globalité, le capteur est généralement constitué de bobine(s) classique(s) jouant le rôle d'émetteur(s) qui, alimentée(s) par un courant alternatif, génère(nt) des courants de Foucault dans la pièce. La GMR proprement dit constitue la cellule réceptrice, sensible à la valeur de l'induction magnétique en surface de la pièce contrôlée.

II PRESENTATION DU MODELE ET CHOIX DU CAPTEUR GMR

Pour notre application, le capteur sera constitué de deux bobines émettrices (les inducteurs) et de plusieurs GMR pour la partie réception. Les GMR sont montées sur circuit imprimé (PCB) où une fonction d'amplification différentielle et une bobine de polarisation sont présentes, la bobine de polarisation ayant pour rôle de placer le capteur GMR dans sa zone de linéarité (i.e. relation linéaire entre induction mesurée et signal de sortie). Concernant le design et le mode de fonctionnement du capteur, plusieurs configurations ont été étudiées par simulation:

- Une GMR unique à l'entraxe des inducteurs ou utilisation de 2 GMR placées à l'intérieur des inducteurs et fonctionnant en mode différentiel
- Position au centre ou au bord des inducteurs des GMR en mode différentiel
- Alimentation en phase ou en opposition de phase des bobines inductrices
- Recherche de la fréquence d'excitation des bobines émettrices
- Etude d'impact de ces paramètres en fonction de l'épaisseur de la pièce d'aluminium

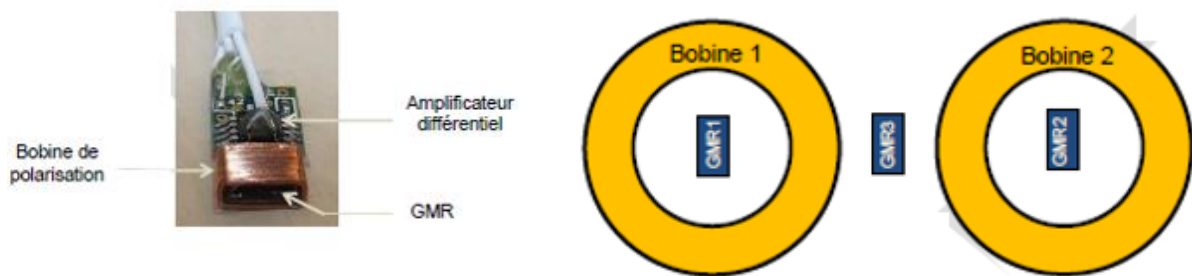


Figure 1 : Photo d'une GMR, schéma montrant quelques exemples de dispositions des GMR par rapport aux bobines

Le modèle de simulation a été réalisé par Eléments Finis sous le logiciel FLUX (édité par Altair Engineering). Une vue de la géométrie et du maillage du modèle est visualisée sur la Figure 2 (bobines émettrices en rouge et en rose, pièce d'aluminium en bleu). Par symétrie, une moitié du dispositif seulement a pu être représentée dans le modèle. On note la forte densité de maillage nécessaire compte-tenu des faibles entrefers entre bobines et pièce.

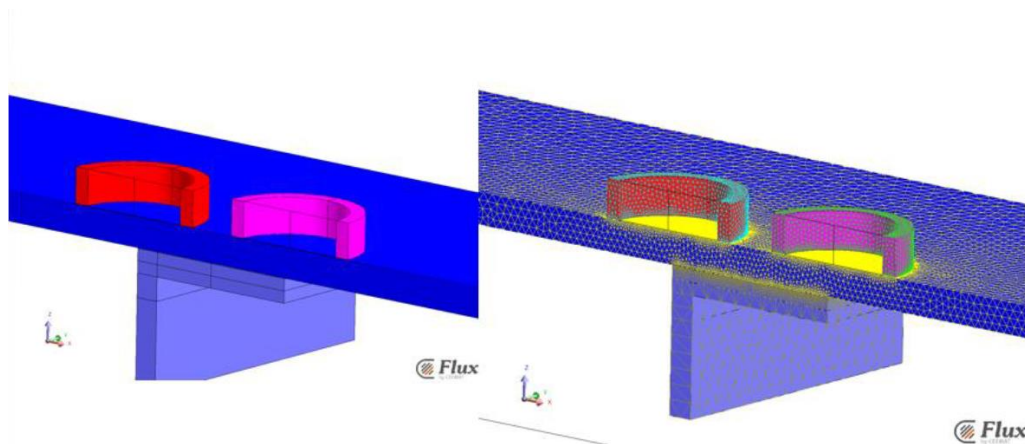


Figure 2 : Vue du modèle Eléments Finis réalisés sous FLUX (Altair Engineering), géométrie et maillage

On affiche sur la Figure 3 les densités de courants induits dans les pièces d'aluminium et la cible pour 2 fréquences différentes (250 Hz et 2 kHz) parmi celles testées, et pour une épaisseur de pièce de 10 mm. Le récepteur GMR est ici sensible à la composante verticale de l'induction magnétique en surface. La modélisation de la partie réceptrice du capteur GMR s'apparente donc à une mesure de champ en surface et à l'étude de ses variations en fonction de la position du capteur au-dessus de la pièce. Le modèle doit être construit de façon à pouvoir extraire le signal de variation issu du balayage mécanique et le distinguer du bruit numérique dû aux modifications de maillage engendrées par les différentes positions du capteur. On définit ensuite la quantité mesurable (tension de sortie) par application des différents gains associés à l'électronique de traitement.

La modélisation a tout d'abord permis de sélectionner certaines fréquences de travail (entre 200 et 500 Hz selon les épaisseurs de plaques considérées) et d'écartier un positionnement des GMR fonctionnant en mode différentiel au bord des bobines émettrices car l'amplitude du signal obtenue était moindre que pour des configurations analogues avec GMR au centre des bobines. Concernant l'alimentation en phase ou en opposition de phase, l'utilisation d'une

GMR absolue à l'entraxe ou de GMR différentiel au centre des émettrices, l'étude porte sur l'optimisation du contraste de champ due à la cible par rapport au champ moyen dans lequel évolue la GMR au cours du déplacement du capteur.

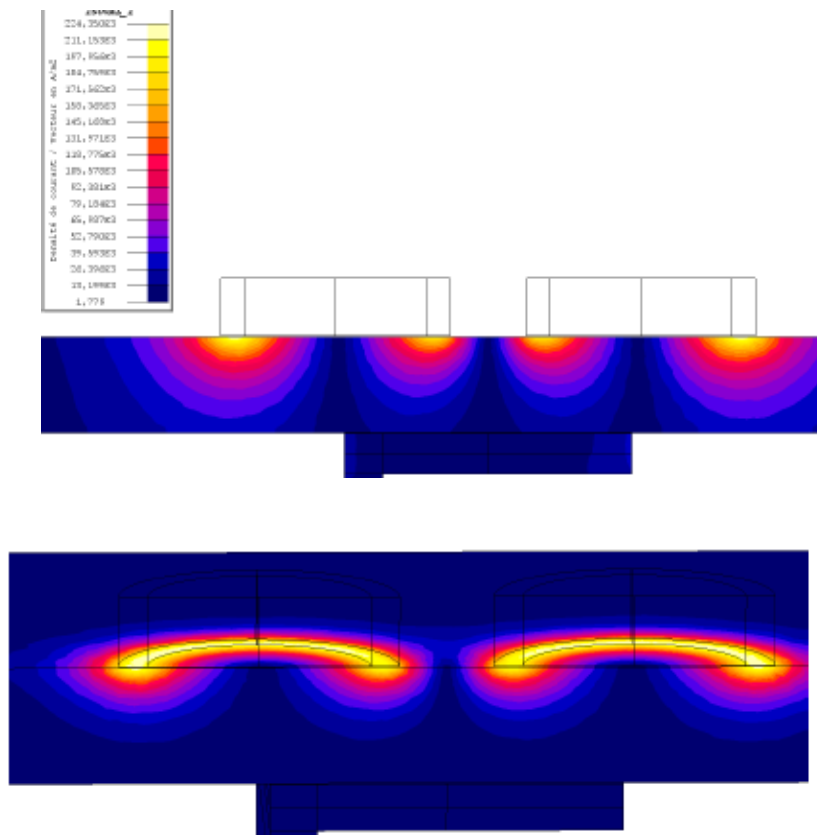


Figure 3 : Cartographie de densité de courants de Foucault en A/m² dans la pièce d'aluminium (partie supérieure d'épaisseur 10mm) à 250 Hz (en haut) et 2kHz (en bas)

Ainsi, bien que le signal de la configuration différentielle soit nettement le plus important (que les bobines soient alimentées en phase ou en opposition de phase), le contraste relevé est beaucoup plus fort dans le cas d'une mesure avec la GMR en mode absolu à l'entraxe des émetteurs avec alimentation en opposition de phase. Dans ce cas, les variations de champ dues à la cible atteignent environ 300% contre 10% dans le cas différentiel (dans l'exemple d'une plaque d'aluminium de 5 mm). Cela s'explique par le fait que lorsque les bobines sont alimentées en opposition de phase, on crée un flux soustractif à l'entraxe et donc un champ quasi nul en l'absence de cible, comme illustré dans la figure 4 ci-dessous. La présence de la cible crée alors le signal de déséquilibre. Cela permet de pouvoir utiliser un récepteur GMR évoluant en faible champ, ne nécessitant donc pas une large plage de linéarité au bénéfice de sa sensibilité. Tandis que dans la configuration différentielle, les GMR évoluent en champ fort même en l'absence de cible. A l'inverse, cela nécessiterait donc d'utiliser une GMR possédant une grande zone de linéarité (pour éviter la saturation) au détriment de sa sensibilité.

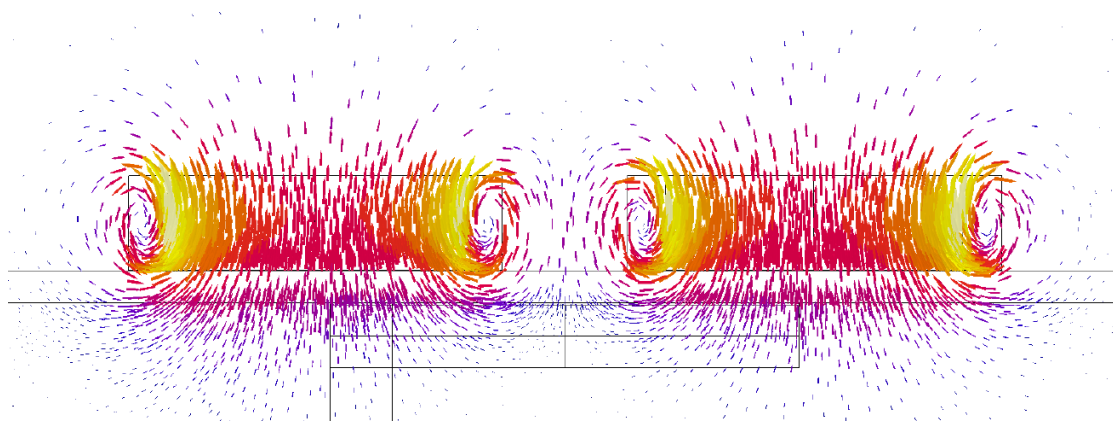


Figure 4a : Lignes de champ pour une alimentation en phase des bobines émettrices

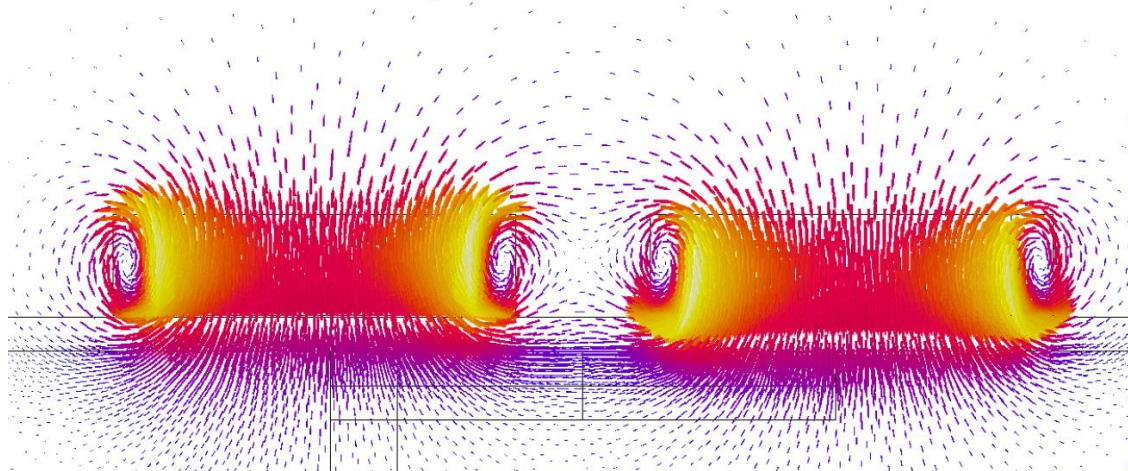


Figure 4b : Lignes de champ pour une alimentation en opposition de phase

III SIGNAUX OBTENUS

Une fois les premiers choix arrêtés à partir de l'étude par simulation, un capteur a été conçu. Le capteur a été réalisé par STATICE et a été évalué dans plusieurs configurations au CEA-LIST. Des mesures sur maquettes représentatives ont été effectuées et une comparaison a pu être faite avec la modélisation. Sur la Figure 5 sont présentés les résultats de ces comparaisons par la représentation de la partie réelle (voie X) et de la partie imaginaire (voie Y) des signaux obtenus en simulation et dans les essais expérimentaux au passage du capteur sur la plaque avec cible. On notera que l'équilibrage de ces signaux a été mené sur la plaque hors cible.

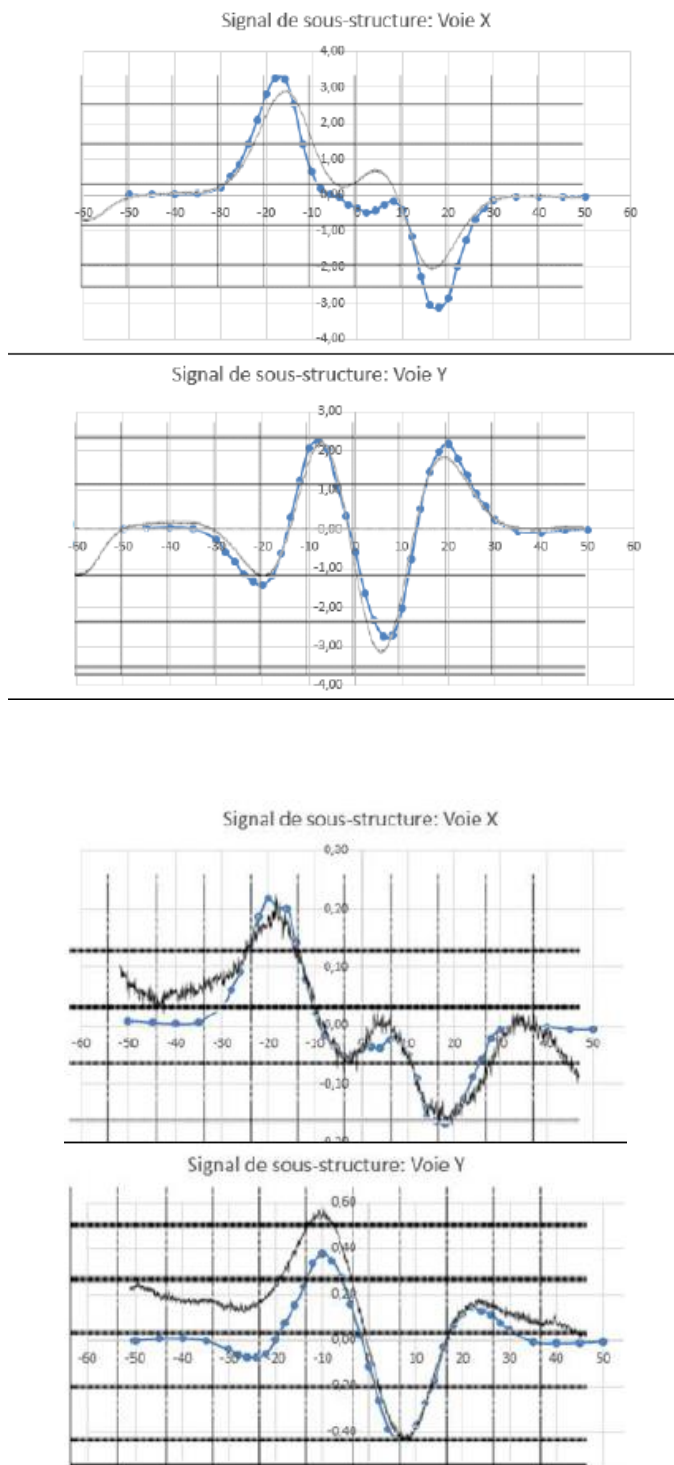


Figure 5: Signaux obtenus (Voies X et Y) pour des plaques d'épaisseur 5mm (en haut) et 12mm (en bas), comparaison des signaux expérimentaux (en gris) et des signaux simulés (en bleu)

IV ETUDE DE SENSIBILITE ET PARAMETRES INFLUENTS

Des études de sensibilités ont été menées de manière à analyser les paramètres susceptibles d'affecter les performances du capteur et ainsi guider les choix de conception et les tolérances acceptables vis-à-vis de sa mise en œuvre.

Les résultats sont affichés pour 2 épaisseurs de plaque d'aluminium (5 mm et 12 mm), et 2 fréquences d'alimentation des bobines (respectivement 500 Hz et 210 Hz). On relève une bonne correspondance des résultats de mesures (en gris) par rapport aux courbes simulées (en bleu) pour les 2 configurations, malgré une légère dérive du signal expérimental. Le Rapport Signal sur Bruit (RSB) est certes moins bon pour la plaque de 12 mm mais il reste néanmoins de +23 dB. Le signal a ensuite été calculé par simulation pour une épaisseur de 15 mm. Il présente une chute d'amplitude de 7,5 dB par rapport à l'épaisseur de 12 mm, ce qui permet de conclure encore favorablement à la détection de la cible pour cette épaisseur.

A titre de comparaison, des simulations effectuées avec un capteur inductif ont montré une chute d'amplitude d'environ 12 dB entre ces 2 épaisseurs de plaques, confirmant ainsi la meilleure sensibilité des GMR pour les détections à forte profondeur (c'est à dire, à basse fréquence). De plus, des mesures expérimentales avec le capteur GMR ont pu être faites sur des plaques de 17 mm et là encore, la cible a pu être détectée avec un Rapport Signal sur Bruit satisfaisant.

Sensibilité à l'alimentation des émettrices (étude expérimentale)

Le capteur étant constitué de 2 bobines inductrices, le montage nécessite de créer un flux magnétique équivalent avec ces 2 émetteurs en opposition de phase de façon à obtenir un champ nul « hors cible » et ainsi maximiser la détection en présence de celle-ci. Différents dispositifs d'alimentation ont été étudiés et il a notamment été comparé une alimentation en série des bobinages et une alimentation indépendante. Le signal obtenu sur une des voies de la GMR est affiché ci-dessous pour la pièce d'épaisseur 12 mm. On observe qu'avec une alimentation en série des émetteurs (donc consigne identique), les différences constitutives des enroulements entraînent de fait un mauvais équilibre du champ magnétique à l'emplacement de la GMR et en conséquence un rapport Signal sur Bruit peu favorable. A l'inverse, lorsque les 2 émetteurs sont alimentés de manière indépendante, il est possible de régler les alimentations de façon à compenser ces différences et parvenir à l'équilibre « hors cible ». Le RSB obtenu avec cette seconde solution est bien meilleure qu'avec une alimentation en série, 23 dB au lieu de 11 dB (cf. figure 6).

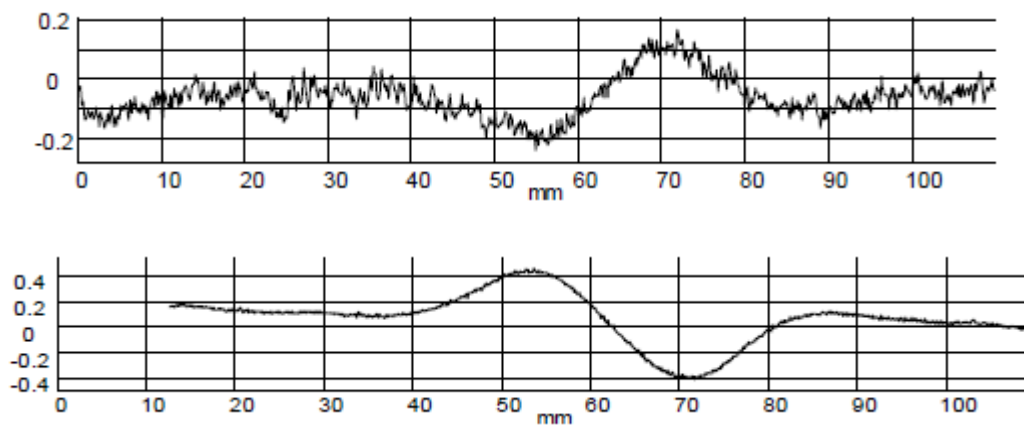
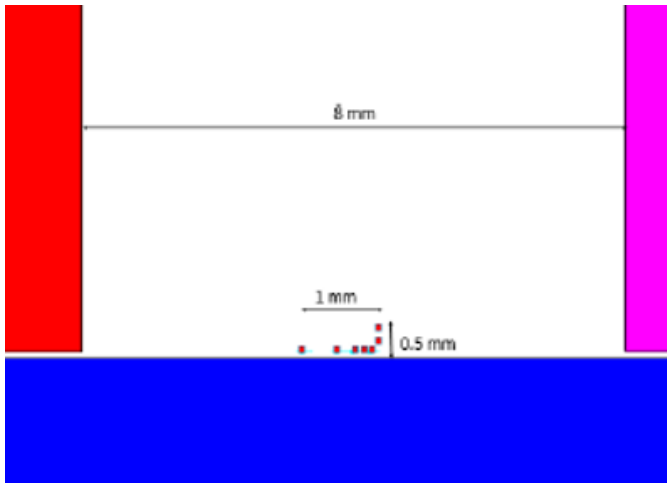


Figure 6: Signaux expérimentaux obtenus (pièce de 12 mm) avec une alimentation en série des inducteurs (en haut), puis une alimentation indépendante réglée pour atteindre l'équilibre (en bas)

Sensibilité à la position de la cellule réceptrice

Un second paramètre étudié concerne la sensibilité à la position effective de la cellule de mesure de la GMR. On peut anticiper un effet de déséquilibre induit par un excentrement de la mesure, analogue au déséquilibre observé lorsque le champ magnétique des bobines émettrices n'est pas identique. L'impact sur la sensibilité du capteur a ainsi été étudié par simulation pour différentes positions du « point de mesure » (matérialisées dans la Figure 7 par les points rouges, les bords des bobines étant en rouge et rose, et la pièce en bleu). Les points de mesure ont été excentrés jusqu'à 1 mm. L'équivalent d'une variation de lift-off (en réception) de 0.5mm a été également étudié mais les résultats ne sont pas présentés ici.



On affiche sur la Figure 8 la variation d'amplitude du signal reçu par la GMR pour différents excentrement (pour une épaisseur de pièce de 5 mm). On constate une chute rapide de la sensibilité de 2 à 3 dB, dès l'excentrement de 0.1 mm. En revanche, on constate une remontée de la sensibilité pour un excentrement de 1 mm. Cette tendance, pas nécessairement intuitive s'explique par la cartographie des lignes de champ dans l'entraxe inter-bobines.

Figure 7: Différentes positions étudiées pour la cellule de mesure (schématisés par les points rouges)

On affiche sur la Figure 9 la cartographie de l'induction « Bz » sur le dispositif puis un zoom sur cette quantité aux niveaux des points de mesures, dans une configuration « hors cible » puis « avec cible ». On constate que la différence entre le champ Bz vu par la GMR entre les configurations « avec cible » et « sans cible » est plus importante lorsqu'on s'approche des bobines, où l'on voit que les lignes de champ tendent à s'incurver lorsque la cible est présente.

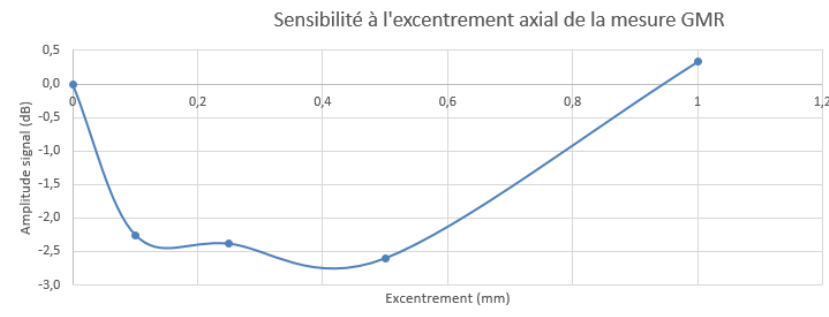


Figure 8: Impact de l'excentrement de la cellule de mesure sur l'amplitude du signal

Il a été constaté que le contraste serait d'ailleurs plus important si la cellule de mesure de la GMR était positionnée encore plus près de l'une des bobines. Néanmoins, l'impact sur la sensibilité globale est à nuancer car si l'on s'approche des bobines, l'amplitude du champ augmente fortement, il est donc probable que l'on arrive alors dans la zone de saturation de la GMR. Nous concluons donc qu'il est important de maîtriser le centrage de la position de mesure car la sensibilité chute rapidement autour de la position d'entraxe, une alternative étant peut-être de compenser le déséquilibre potentiel dû à cet excentrement en jouant sur l'alimentation des émetteurs.

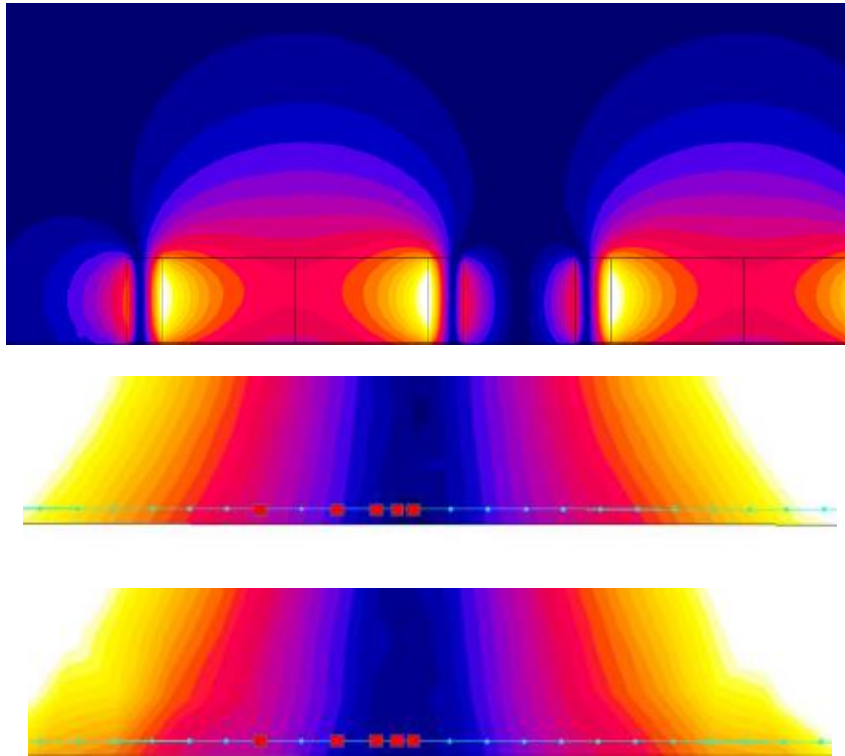
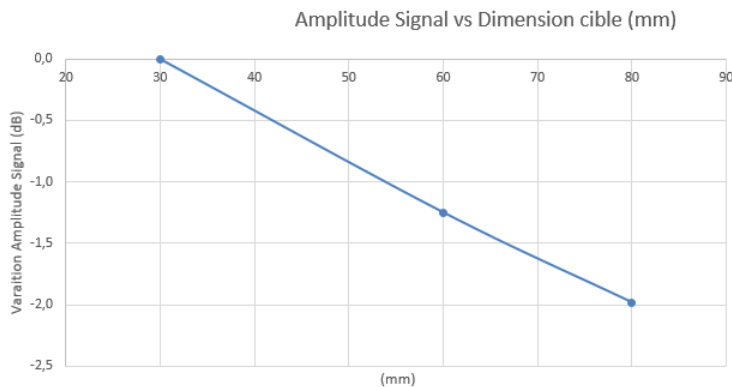


Figure 9: Cartographie de l'induction B_z sur une coupe du dispositif (en haut), puis zoom sur la zone de mesure entre les bobines (échelle de couleur contractée, maxima sur la zone en jaune, minima en, bleu) avec iso-valeurs « hors cible » (au milieu) puis iso-valeurs avec cible (en bas)

Sensibilité à la taille de la cible

L'étude a ensuite porté sur l'impact d'une augmentation de la taille de la cible située sous la plaque. On observe sur la Figure 10 la tendance pour des largeurs de 30 mm, 60 mm et 80 mm de cette cible sur l'amplitude du signal reçu par la GMR calculé par simulation. Sur cet exemple (épaisseur de pièce de 5 mm), on constate ainsi une chute d'amplitude de 2 dB entre la taille minimale et maximale de la cible. Ce phénomène peut s'apparenter à ce qui est observé pour un capteur différentiel courants de Foucault qui serait petit par rapport aux défauts à détecter : le capteur devient sensible aux bords du défaut uniquement.



L'étude de sensibilité réalisée permet d'anticiper les choix en termes de design de capteur mais également de mieux connaître la sensibilité de la méthode aux dimensions des pièces à inspecter.

Figure 10: Impact de l'augmentation de la taille de la cible sur l'amplitude du signal

V ETUDE D'OPTIMISATION

La simulation peut également s'avérer efficace en phase d'optimisation, de façon à orienter et maîtriser le développement d'un prototype. Dans cette étude, on a ainsi fait varier les dimensions des bobines émettrices et évaluer l'impact sur le résultat, en conservant les autres paramètres constants. Cette approche permet de quantifier un à un l'influence des différents paramètres sur les performances. Dans le cas de la plaque d'épaisseur 12 mm par exemple, on affiche sur la Figure 11 ci-dessous l'évolution de l'amplitude de la GMR lorsque le diamètre externe des bobines émettrices varie de 17 mm à 40 mm. On constate un impact global de +4 dB sur la sensibilité, au profit de la bobine la plus grande. Ceci s'explique par une bonne adéquation avec la taille de la cible à détecter.

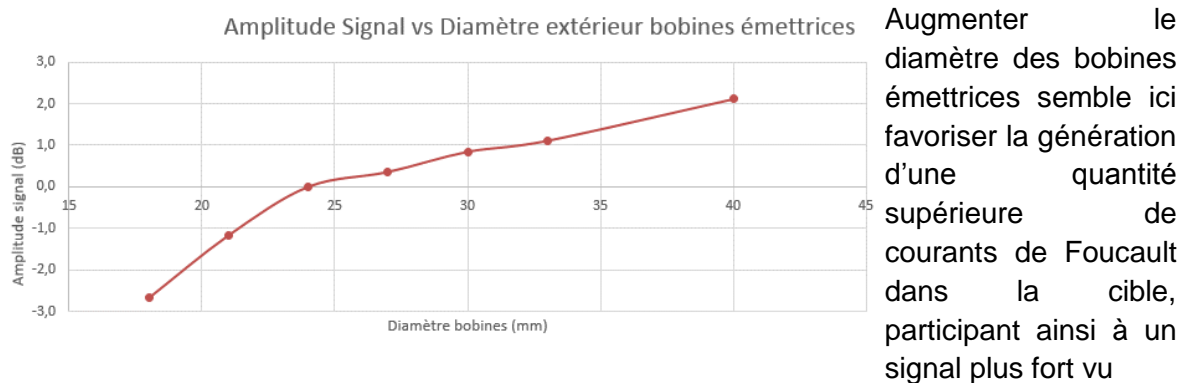


Figure 11: Impact de l'augmentation de la taille des bobines émettrices sur l'amplitude du signal

par les GMR. Sur les cartographies de la Figure 12, on illustre cela en comparant la distribution des courants de Foucault pour les cas des diamètres de bobine 24 mm et 40 mm. Avec une dimension de 40 mm, la taille de la zone où des courants induits importants sont générés (couleur rose à jaune) sous l'entraxe des bobines (où est situé la GMR) est proche de la dimension de la cible, le capteur est sensible à la taille de celle-ci et non plus simplement aux bords. La pénétration effective est également sensiblement améliorée compte-tenu de cette augmentation de diamètre.

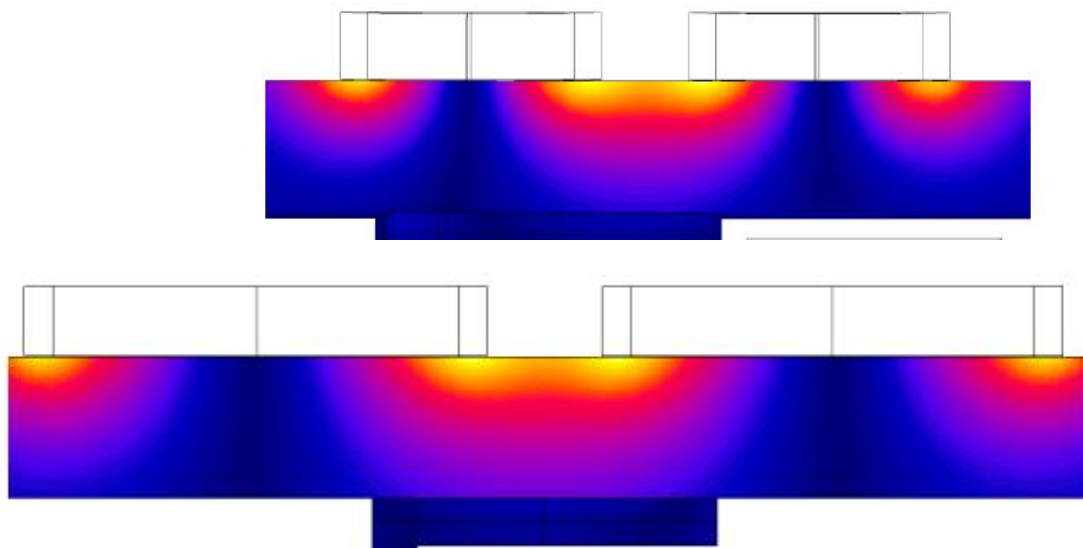
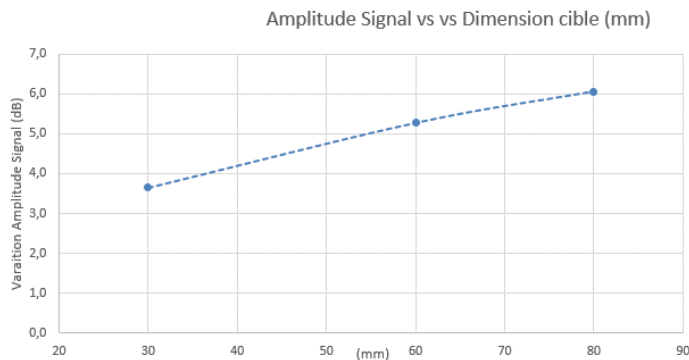


Figure 12: Impact de l'augmentation de la taille des bobines émettrices sur les courants induits dans la pièce

Le calcul a ensuite été mené avec le capteur optimisé pour des tailles de cible plus importantes, comme précédemment. On constate que cette fois-ci (cf. figure 13), le capteur optimisé permet d'obtenir un signal plus fort lorsque la taille de la cible augmente. A l'inverse, on peut s'attendre à ce que le signal soit impacté à la baisse si la cible devient trop petite par rapport à la taille du capteur. Cette optimisation est donc à mettre en regard des tailles de cible à considérer.



D'autres études d'optimisations peuvent être menées comme par exemple sur l'entraxe entre les bobines. La simulation peut ainsi être employée comme une aide au développement de capteur et de méthodes, tout en apportant compréhension et justifications aux choix qui sont faits.

Figure 13 : Impact de l'augmentation de la taille de la cible sur l'amplitude du signal avec un capteur optimisé

CONCLUSION

Cet article présente quelques extraits d'une étude réalisée pour DASSAULT AVIATION sur la mise au point d'un capteur à courants de Foucault de type GMR pour la caractérisation de pièces d'aluminium. Cette étude a permis la réalisation d'un prototype et de mesures expérimentales sur maquette. Elle a également mis en œuvre des travaux de simulation. Ces calculs et essais ont permis d'accompagner la compréhension physique du dispositif et de guider un certain nombre de choix techniques pour son développement et son optimisation (position des GMR, dimension des bobines émettrices, mode d'alimentation, etc.) et également d'étudier la sensibilité du procédé en fonction de la cible à détecter. La simulation a pu être validée par comparaison avec l'expérience sur quelques cas. La simulation contribue ainsi à l'efficacité et la maîtrise d'un développement de méthode, notamment pour des procédés innovants où le retour d'expérience est encore relativement faible.

REFERENCES

- [1] Recent Development of Multi-Sensors Eddy Current Probes, J. M. Decitre, B. Marchand and O. Casula, QNDE 2008
- [2] "Flexible and array eddy current probes for fast inspection of complex parts", B. Marchand, J. M. Decitre, and O. Casula, QNDE 2010
- [3] Les capteurs magnétiques GMR rivalisent avec l'effet Hall, Denis Stremplewski, François Mortier, mesures.com, 2002, <http://www.mesures.com/pdf/old/750solcapteursgmr.pdf>