

MODÉLISATION DU CONTRÔLE PAR COURANTS DE FOUCAULT DE TUBES FERROMAGNÉTIQUES

EDDY CURRENT MODELING OF FERROMAGNETIC TUBE INSPECTION

A. Skarlatos⁽¹⁾, G. Pichenot⁽¹⁾, D. Lesselier⁽²⁾, B. Duchêne⁽²⁾, M. Lambert⁽²⁾

⁽¹⁾ CEA-LIST – CEA Saclay, Bâtiment 611, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél : 01 69 08 44 93 - Fax : 01 69 08 75 97

anastassios.skarlatos@cea.fr

⁽²⁾ CNRS-Supélec-UPS – 3, rue Joliot-Curie, 91191 Gif-sur-Yvette
Tél : 01 69 85 15 61 - Fax : 01 69 85 17 65

Résumé

Le contrôle non destructif (CND) des tubes ferromagnétiques par courants de Foucault (CF) est couramment utilisé dans de nombreux secteurs industriels : industrie pétrolière, nucléaire (condenseurs, filière neutrons rapides) ou la métallurgie. La méthode des champs lointains (RFEC : Remote Field Eddy Current) est souvent employée du fait de la faible pénétration des CF dans les matériaux ferromagnétiques. Afin de disposer d'outils de simulation permettant d'optimiser, de qualifier ou de prédire les performances de ces contrôles, un modèle basé sur une méthode en intégrale de volume et utilisant les dyades de Green a été développé. Cette approche, déjà mise en œuvre pour les tubes non magnétiques, est à la base des modules CF implémentés dans la plateforme CIVA. Cette contribution présente les travaux menés pour simuler les contrôles des tubes magnétiques, notamment en RFEC. La prise en compte des variations locales de conductivité et de perméabilité dues à un défaut conduit à deux équations d'état gouvernant les champs électrique et magnétique. La résolution de ce système d'équations, via la méthode des moments, permet d'obtenir ces champs dans un domaine contenant le défaut. Enfin, l'application du théorème de réciprocité permet de prédire les variations du signal CF dues au défaut. Le modèle, validé avec succès avec des données expérimentales et comparé avec des résultats en éléments finis, a été implémenté dans CIVA.

Abstract

Eddy current (EC) Nondestructive Evaluation (NDE) of ferromagnetic tubes is being currently applied in many industrial domains: petrol industry, nuclear energy (condensers of fast neutron reactors) or the steel production. The Remote Field Eddy Current (RFEC) technique is usually employed in such applications due to the small penetration depth inside ferromagnetic materials. In order to extend the simulation tools allowing the optimisation, qualification and validation of these controls, a method based on the volume integral formulation involving the Green's dyads has been developed. This approach which has already been applied in the inspection of nonmagnetic tubes is based on the eddy current models implemented in the CIVA platform. This contribution presents the work concerning the extension of the model for the simulation of NDE in ferromagnetic tubes with specific attention given in RFEC inspection. The simultaneous local variation of both conductivity and permeability caused by material defects leads to a system of two state equations one for the electric and one for the magnetic field. The solution of this system of equations via the Method of Moments (MoM) provides the electric and magnetic field distribution inside a domain containing the flaw. Finally, by applying the reciprocity theorem the variation of the eddy current signals produced by the flaw is obtained. The model, which has been validated using experimental data and compared with Finite Elements Method (FEM) simulation results, has been integrated into CIVA.

INTRODUCTION

Le contrôle non destructif (CND) des tubes ferromagnétiques par courants de Foucault (CF) a fait l'objet de nombreux développements pendant les dernières décennies et est actuellement une technique de contrôle couramment utilisée dans de nombreuses applications industrielles. Dans le nucléaire, il concerne en particulier le contrôle des circuits de condenseurs des réacteurs à neutrons rapides utilisant le sodium liquide. La méthode des champs lointains (RFEC: Remote Field Eddy Current) est probablement la méthode la plus utilisée dans ces applications.

Bien que cette technique soit utilisée depuis longtemps, on ne disposait pas encore d'outils de simulation précis et pleinement efficace permettant de modéliser ce type de contrôle. En effet, le principal outil disponible jusqu'à présent pour la modélisation des inspections des matériaux ferromagnétiques était la méthode des éléments finis. Toutefois, ce type d'approche présente un certain nombre d'inconvénients quand elle est appliquée à des problèmes de CND. En particulier, elle nécessite en général de discrétiser un domaine spatial étendu même pour des petits défauts et de résoudre entièrement le problème pour chaque position de la sonde. De ce fait, la méthode en intégrale de volume peut être considérée comme une alternative intéressante pour la modélisation des problèmes de CND.

Le module CF du logiciel CIVA (plateforme multi-techniques pour la simulation en CND incluant des modules en CF, en ultrasons et en radiographie) est basé sur cette formulation [1]. Celle-ci a déjà été mise en œuvre dans CIVA pour le CND de tubes non magnétiques [2,3] et la présente contribution concerne son extension aux cas des tubes ferromagnétiques. Dans ce cadre, la présence des défauts nécessite d'introduire également une variation locale de la perméabilité qui s'ajoute à la variation de la conductivité rencontrée dans les matériaux non magnétiques. Ainsi, l'équation intégrale relative au champ électrique doit être étendue et combinée à une seconde équation intégrale concernant cette fois-ci le champ magnétique afin d'obtenir un système complet d'équations. Ce système fait alors intervenir toute la famille des dyades de Green, ce qui conduit à un effort de calcul un peu plus important. Bien que la formulation théorique employée soit générique et non dédiée à une méthode de contrôle spécifique, une attention toute particulière a été portée à la technique du champ lointain compte tenu de son utilisation fréquente pour inspecter les tubes ferromagnétiques.

Après une courte description de la formulation théorique utilisée, des résultats de validation du modèle développé par rapport à des données expérimentales sont présentés ainsi que des comparaisons à des simulations obtenus par éléments finis.

FORMULATION DU PROBLEME

On considère un tube ferromagnétique de conductivité σ_2 et de perméabilité μ_2 . Du point de vue de la formulation mathématique, il s'agit d'un problème cylindrique multicouche, où l'intérieur du tube est considéré comme la première couche du milieu, la paroi du tube comme la seconde et la troisième couche est attribuée à l'extérieur du tube. La présence d'un défaut dans la paroi du tube se traduit par une variation locale de la conductivité et/ou de la perméabilité du matériau, selon le type de défaut. En ce qui concerne les applications en CND, les défauts que l'on souhaite traiter sont, dans la plupart des cas, des défauts de type corrosion, c'est-à-dire que la conductivité et la perméabilité sont toutes deux modifiées. On appelle $\delta\sigma_2(r')$ et $\delta\mu_2(r')$ les variations respectives de la conductivité et de la perméabilité dans le domaine du défaut par rapport à leurs valeurs dans le matériau sain. Les champs électrique et magnétique peuvent être représentés par les équations intégrales suivantes (on considère la convention $e^{-j\omega t}$ pour la variation temporelle des champs) :

$$\vec{E}_2(\vec{r}) = \vec{E}_2^{inc}(\vec{r}) + j\omega\mu_2 \int_{V_f} \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{22}^{(ee)}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \delta\sigma_2(\vec{r}') \vec{E}_2(\vec{r}') dV' + j\omega \int_{V_f} \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{22}^{(em)}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \delta\mu_2(\vec{r}') \vec{H}_2(\vec{r}') dV' \quad (1)$$

$$\vec{H}_2(\vec{r}) = \vec{H}_2^{inc}(\vec{r}) + \int_{V_f} \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{22}^{(me)}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \delta\sigma_2(\vec{r}') \vec{E}_2(\vec{r}') dV' + \omega^2 \tilde{\epsilon}_2 \int_{V_f} \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{22}^{(em)}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \delta\mu_2(\vec{r}') \vec{H}_2(\vec{r}') dV'. \quad (2)$$

$\vec{E}_2^{inc}, \vec{H}_2^{inc}$, sont les champs électrique et magnétique primaires, c'est-à-dire les champs induits dans le tube en absence du défaut, et $\overline{\overline{\mathbf{G}}}_{22}^{(ee)}, \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{22}^{(em)}, \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{22}^{(me)}, \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{22}^{(mm)}$ sont les dyades de Green pour le milieu cylindrique stratifié. Ce système d'équations intégrales fournit une description complète du problème et elles sont résolues en utilisant la méthode des moments (MoM). Une fois les champs dans le domaine du défaut calculés, la variation de l'impédance de la sonde, qui est la grandeur mesurée, peut être facilement déterminée en appliquant le théorème de réciprocité :

$$\Delta Z_{12} = -\frac{1}{I_1 I_2} \int_{V_f} [\delta\sigma_2(\vec{r}') \vec{E}_{2Rx}^{inc}(\vec{r}') \cdot \vec{E}_2(\vec{r}') + j\omega\delta\mu_2(\vec{r}') \vec{H}_{2Rx}^{inc}(\vec{r}') \cdot \vec{H}_2(\vec{r}')] dV'. \quad (3)$$

IMPLEMENTATION NUMERIQUE

L'algorithme associé au modèle présenté précédemment se compose de quatre étapes. En premier lieu, les champs primaires sont calculés et discrétisés. Une attention toute particulière a été portée sur cette étape afin d'éviter des difficultés numériques lorsque les champs doivent être évalués à grande distance, ce qui est le cas pour les applications en champ lointain. Dans une deuxième étape, les dyades de Green qui apparaissent dans les équations (1) et (2) sont numériquement évalués pour résoudre ensuite le système linéaire associé à la méthode des moments. Cette résolution permet de calculer les champs électrique et magnétique dans le défaut. Enfin, le théorème de réciprocité est appliqué afin d'obtenir les variations de mutuelle et d'impédance.

VALIDATION

La formulation intégrale proposée a été validée avec des données expérimentales acquises dans deux configurations de contrôle. La première configuration considérée (figure 1) porte sur un tube de diamètres interne de 14 mm et externe de 18 mm, inspecté par une sonde en champ lointain à une fréquence de 250 Hz. La conductivité et la perméabilité relative du tube ont été mesurées à 6.25 MS/m et 210 respectivement. La sonde se compose de deux bobines émettrices (T1, T2), connectées en flux additif, et deux bobines réceptrices (R1, R2) connectées en mode différentiel.

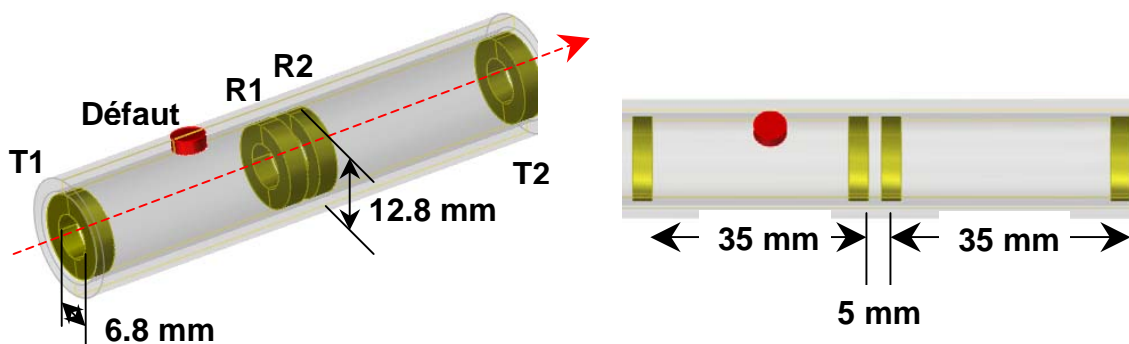


Figure 1 : Schéma de la première configuration de contrôle. Les traits pointillés correspondent au déplacement de la sonde.

Dans la deuxième configuration (figure 2), les diamètres interne et externe du tube utilisé sont de 23.3 mm et 31.9 mm respectivement. Le contrôle est effectué à une fréquence de 150 Hz avec une bobine émettrice (T) et deux bobine réceptrices fonctionnant en mode différentiel. Les valeurs de conductivité et de perméabilité du tube sont respectivement de 3.5 MS/m et 100. Les données expérimentales et les résultats de simulation calculés par éléments finis (EF) pour cette configuration ont été fournis par Chen et al. [4, 5].

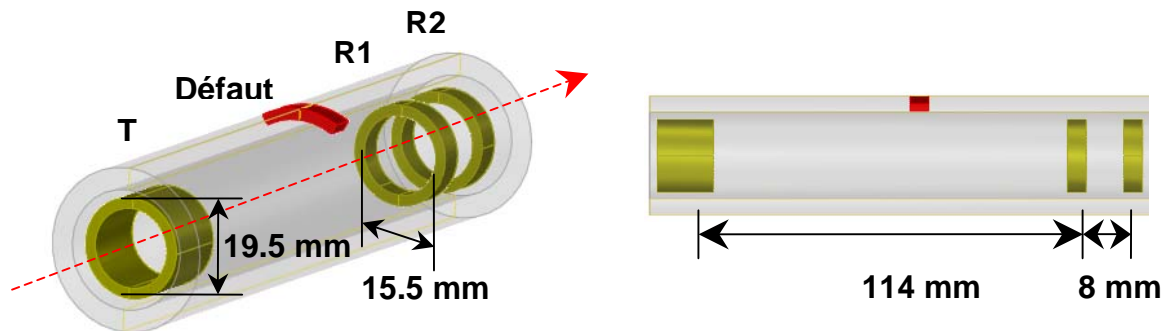


Figure 2 :Schéma de la deuxième configuration de contrôle. Les traits pointillés correspondent au déplacement de la sonde.

La figure 3 présente les réponses expérimentales et simulées pour la première configuration, correspondant à deux défauts (gorges externes) de 3 mm d'ouverture, et de profondeur (relativement à l'épaisseur du tube) de 20% et 70%. Les signaux ont été étalonnés de telle sorte à avoir 5mV et 0° sur une gorge externe de 3 mm d'ouverture et 40% de profondeur. La comparaison en amplitude et en phase des signaux calculés et mesurés, pour ces deux défauts ainsi qu'une autre gorge externe (de 60% de profondeur) est présentée dans le Tableau 1. On constate un bon accord entre simulation et expérience pour ces trois défauts.

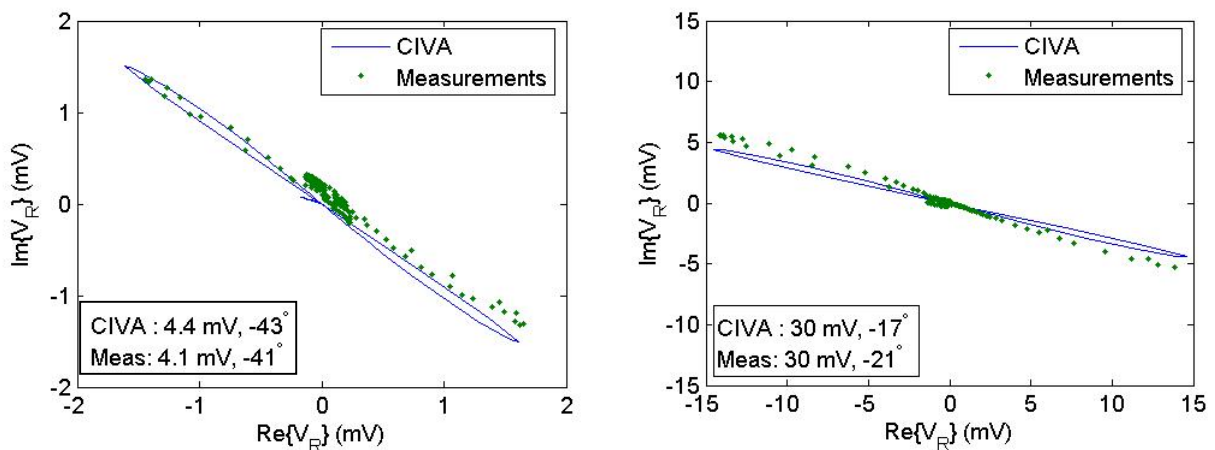


Figure 3 :Courbes Lissajous simulées et expérimentales pour deux gorges externes de profondeur 20% et 70% (1^{ère} configuration).

Flaw	Amplitude		Phase	
	CIVA	Mesure	CIVA	Mesure
Gorge externe (20%) (1 ^{ère} exp)	4.4 mV	4.1 mV	-43°	-41°
Gorge externe (60%) (1 ^{ère} exp)	22 mV	21 mV	-21°	-24°
Gorge externe (70%) (1 ^{ère} exp)	30 mV	30 mV	-17°	-21°
Gorge externe (50%) (2 ^{ème} exp)	18 mV	16 mV	11°	15°

Tableau 1 : Comparaison des simulations CIVA et des essais expérimentaux (gorges externes).

La figure 4 présente la comparaison de réponses expérimentales et simulées portant cette fois sur des défauts 3D (et non plus axisymétriques comme les gorges): un trou cylindrique traversant de diamètre 5 mm (dans la première configuration), et une entaille externe circonférentielle d'ouverture 5 mm, de profondeur 50% et d'extension angulaire 60° (dans la seconde configuration). Pour ce dernier cas, des résultats EF sont également disponibles [4,5].

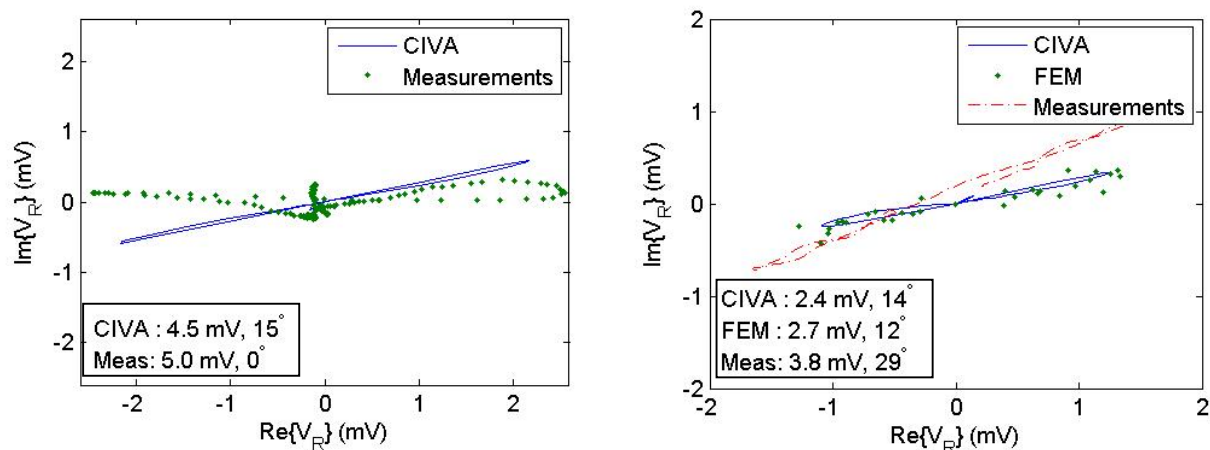


Figure 4 : Lissajous expérimentales et simulées pour un trou traversant de 5mm (1^{ère} configuration) et une entaille externe de 3 mm d'ouverture, d'extension 60° et de profondeur 50% (2^{ème} configuration). La comparaison quantitative des réponses simulées (avec CIVA, et en EF pour l'entaille), et expérimentales est présentée dans le Tableau 2. On peut observer des déviations, notamment en phase, sur ces deux défauts.

Défaut	Amplitude			Phase		
	CIVA	FEM	Mes.	CIVA	FEM	Mes.
Trou traversant (1 ^{ère} exp)	4.5 mV		5 mV	15°		0°
Gorge externe (50%) (2 ^{ème} exp)	2.4 mV	2.7 mV	3.8 mV	14°	11.9°	29°

Tableau 2 : Comparaison des simulations CIVA avec des calculs EF et des mesures expérimentales pour un trou cylindrique traversant et une entaille externe de 50%.

Toutefois, les valeurs d'amplitude et phase pour le même défaut mais réalisé selon deux procédés différents (électro-érosion et perçage) dans le tube de la première configuration sont reportés dans le tableau 3.

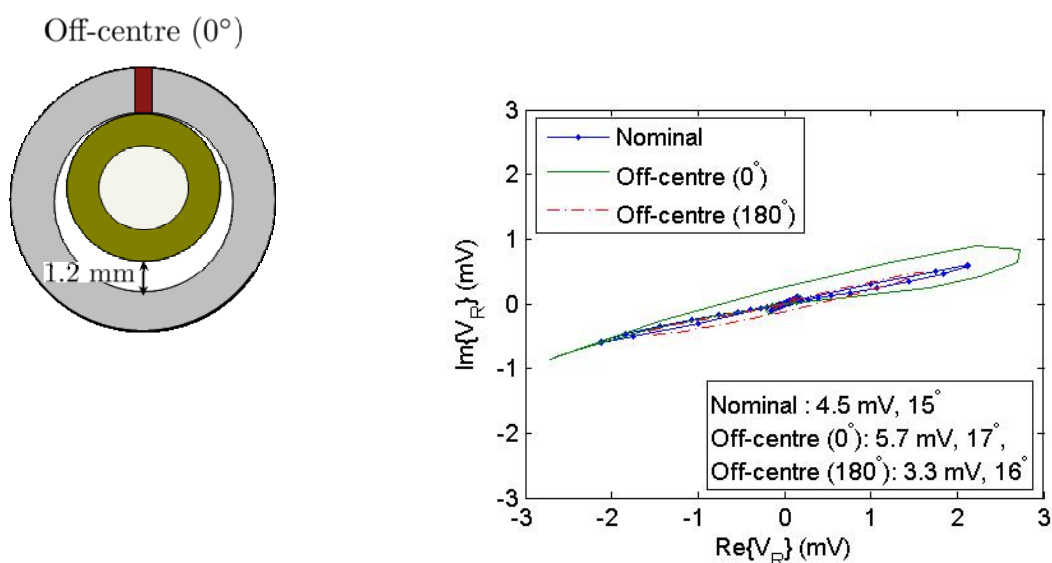
Défaut	Amplitude	Phase
Défaut électro-érodé (1 ^{ère} configuration)	5 mV	6°
Défaut usiné (1 ^{ère} configuration)	4.2 mV	0°

Tableau 3 : Comparaison de la réponse de deux trous cylindriques traversant identiques mais réalisés selon deux techniques différentes.

On peut noter que ces deux défauts conduisent à des mesures sensiblement différentes (écarts de 6° en phase et 20% en amplitude). Par ailleurs, les résultats obtenus avec CIVA et en EF sont très proches en amplitude et en phase, et présentent sensiblement le même écart par rapport à l'expérience (cf. la figure 4 à droite) alors que les modèles sous-jacents reposent sur des approches totalement différentes. On peut donc raisonnablement suspecter que l'écart avec l'expérience provient du procédé de fabrication du défaut. En effet, ces procédés créent inévitablement des contraintes (mécaniques, thermiques etc.) dans le tube au voisinage du défaut auxquelles la perméabilité est particulièrement sensible (phénomène d'écrouissage).

AUTRES CAS D'APPLICATION EN SIMULATION

Les effets de décentrage de la sonde peuvent également être pris en compte dans le calcul avec CIVA. La figure 5 présente les simulations de la réponse d'un défaut en fonction du décentrage de la sonde correspondant aux deux cas extrêmes (distance minimale ou maximale de la sonde par rapport au défaut), ainsi que le cas nominal correspondant à la sonde centrée. La méthode des champs lointains (RFEC) est la technique la plus utilisée pour le contrôle de tubes magnétiques. Ceci est essentiellement dû à la très faible pénétration des champs dans les tubes ferromagnétiques. Cependant, il existe des cas pour lesquels d'autres configurations de sondes peuvent être plus efficaces. La formule d'équation intégrale n'est pas restreinte au cas des applications RFEC, elle s'applique aussi à d'autres configurations de contrôle. Certaines de ces applications sont illustrées sur la figure 6. Les bobines réceptrices peuvent être situées à proximité de la sonde émettrice (couplage direct au lieu d'un couplage en champ lointain). La sonde entière peut être située à l'extérieur du tube, ce qui peut s'avérer nécessaire lorsque l'accès interne n'est pas aisé. Enfin, on peut définir des sondes multiples en paroi interne, ce qui peut fournir des informations sur la position angulaire des défauts.



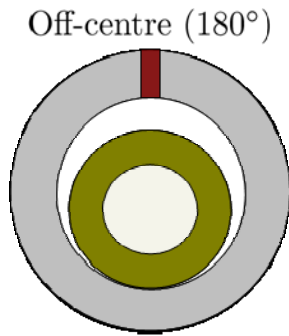


Figure 5 : Comparaison des signaux obtenus avec une sonde décentrée (cas extrêmes de distance entre la sonde et le défaut) et avec le cas de la sonde centrée

Par ailleurs, le modèle permet de prendre en compte des défauts de type inclusions définis par leur conductivité et perméabilité (en d'autres termes, le défaut peut avoir une conductivité et une perméabilité différentes de l'air). De tels défauts peuvent être intéressants pour simuler les effets de dépôts métalliques à l'intérieur des régions corrodées du tube.

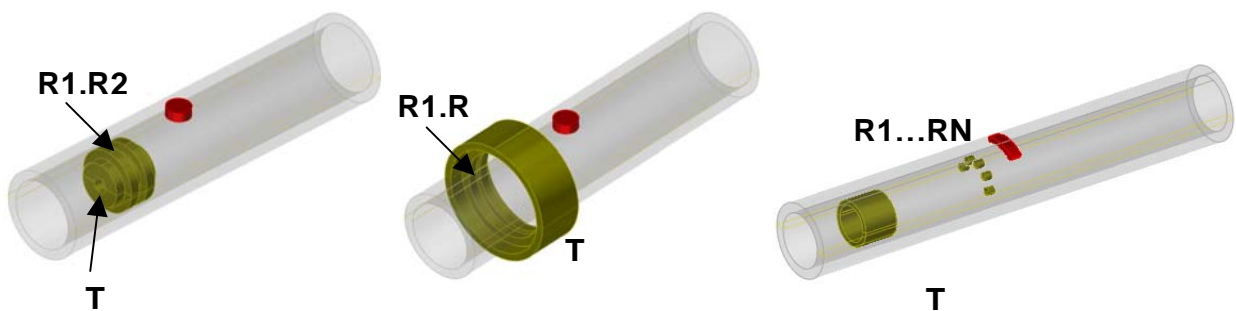


Figure 6 : Autres configurations de sondes accessibles dans CIVA : sonde axiale en champ proche, sonde à l'extérieur du tube et sondes multiples selon la circonférence pour déterminer la position angulaire du défaut.

CONCLUSIONS

Un modèle basé sur un formalisme en intégrale de volume a été développé pour l'inspection de tubes ferromagnétiques et a été implémenté dans la plateforme CIVA (version CIVA 9.0). Les résultats de ce modèle ont été confrontés à des données expérimentales et un bon accord a été globalement observé entre la simulation et l'expérience bien que des difficultés liées vraisemblablement aux procédés de fabrication des défauts artificiels aient été constatées. Enfin, il convient de souligner que ce modèle est particulièrement efficace en terme de temps de calcul pour la simulation d'applications en CND car notamment, il dépend faiblement du nombre de positions de la sonde considérées lors du contrôle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] www-civa.cea.fr
- [2] Monebhurrun V., Lesselier D., Duchêne B., Evaluation of a 3-D bounded defect in the wall of a metal tube at eddy current frequencies: the direct problem, Journal of Electromagnetic and Waves Applications, 1998, Vol. 12, pp. 315-347.

- [3] Pichenot G., Lesselier D., Sollier T., Maillot V., Development of a 3D electromagnetic model for eddy current tubing inspection: Application to steam generator tubing, *Revue of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2005, Vol. 16, pp. 79-100.
- [4] Rebican M., Chen Z., Yusa N., Miya K., Uchimoto T., Tagaki T., Investigation of numerical precision of 3-D RFECT signal simulations, *IEEE Transaction on Magnetics*, 2005, Vol. 41, pp. 1968-1971.
- [5] Chen Z., Rebican M., Miya K., Takagi T., Three-dimensional simulation of remote field ECT using the Ar method and a new formula for signal calculation, *Research in Nondestructive Evaluation*, 2005, Vol. 16, pp. 35-53.