

SIMULATION DU CND CF AVEC FLUX® ET CIVA® *SIMULATION OF EDDY CURRENT TESTING WITH FLUX® AND CIVA®*

F. Foucher, X. Brunotte, A. Kalai, Y. Le Floch
CEDRAT SA , 15, Chemin Malacher , ZIRST , 38246 Meylan Cedex, France
G. Pichenot, D. Prémel
CEA – LIST, bâtiment 611, 91191 Gif-sur-Yvette, France

RESUME

La simulation du contrôle non destructif par courants de Foucault a maintenant atteint une maturité industrielle à travers les produits commerciaux FLUX® et CIVA®. Ces outils complémentaires permettent de traiter la majorité des configurations de contrôle : configurations planes ou tubulaires avec le code semi-analytique CIVA®, géométries plus complexes de pièces et capteurs avec le code éléments finis FLUX®. Des cas d'applications sont présentés ainsi que des exemples de validation. Le projet MUTSIC, soutenu par le Réseau des Technologies Logicielles (RNTL), a pour objet de créer une plate-forme commune basée sur CIVA® pour l'intégration des développements en CND. Dans le cadre de ce projet, le code FLUX® sera connecté à CIVA® afin de le relier aux outils métiers du CND.

ABSTRACT

The simulation of eddy current testing is now fully developed through the commercial codes FLUX® and CIVA®. These two codes can handle, in complementary ways, a vast number of non-destructive testing (NDT) configurations. Canonical geometries such as slabs or tubes can be solved with the semi-analytical code CIVA®. More complex cases regarding to the geometry of the parts or to the probe design may be addressed with the Finite Element Model (FEM) FLUX®. Some applications and validations are presented in this paper for each code. The project MUTSIC is sponsored by the French Network on Software Technologies (RNTL) and is aimed at offering CIVA® as a common platform for the integration of developments in non-destructive testing simulation. In the framework of the MUTSIC project, the code FLUX® will be connected to CIVA® and will benefit of the numerous NDT dedicated tools already integrated within CIVA®.

1 INTRODUCTION

Les avancées techniques dans la simulation numérique des méthodes de contrôle non-destructif par ultrasons ou radiographie ont permis à la simulation de prendre une place importante, aussi bien dans le nucléaire que dans l'aéronautique. Dans ces domaines, la modélisation est aujourd'hui un outil indispensable en amont du contrôle.

Ce n'est pas encore le cas dans le domaine des courants de Foucault.

L'objectif de cet article est de montrer les nombreuses avancées sur ce sujet réalisées par CEDRAT SA et le CEA autour des logiciels CIVA® et FLUX®. Ces avancées conduisent à penser que la simulation du CND CF devient ou va devenir très rapidement aussi mature que les simulations des autres techniques de CND.

2 PRESENTATION GENERALE DES LOGICIELS CIVA® ET FLUX®

Parmi les codes présents sur le marché mondial, les deux logiciels français FLUX® et CIVA® sont techniquement parmi les plus avancés.

Les positionnements techniques et commerciaux de FLUX® et CIVA® sont différents et complémentaires. Le module CF du logiciel CIVA® est un code rapide et conçu pour être directement utilisé par un spécialiste du CND. Il traite les géométries et les capteurs les plus courants dans le CND (plaques, tubes, capteurs comportant des bobinages avec et sans ferrite).

Le logiciel FLUX® est un code éléments finis généraliste pouvant potentiellement traiter toutes les configurations de CND même les plus complexes (pas de limitations sur la forme des pièces et des capteurs).

FLUX® et CIVA® sont distribués au niveau mondial (Japon excepté) par la société CEDRAT SA (www.cedrat.com).

2.1 Le logiciel CIVA®

Le module CF du code CIVA® est fondé sur une méthode de calcul semi-analytique rapide qui traite les géométries simples les plus courantes en CND (plaques, tubes). Le code permet de définir un défaut volumique et de le positionner dans une plaque ou un tube. L'utilisateur peut construire le capteur de son choix à partir de formes paramétriques standards (bobines, noyau de ferrite) et définir le mode de fonctionnement (double fonction, fonctions séparées, mode absolu ou différentiel) ainsi que les différentes fréquences de contrôle.

Une interface graphique permet à l'utilisateur de vérifier la configuration de contrôle (vues de coté, de dessus, vues en coupe et vue en 3D) avant de lancer le calcul. Un exemple de scène de contrôle est donné en Figure 1 pour une plaque comportant un défaut parallélépipédique et un capteur composé de 3 bobinages avec noyau de ferrite.

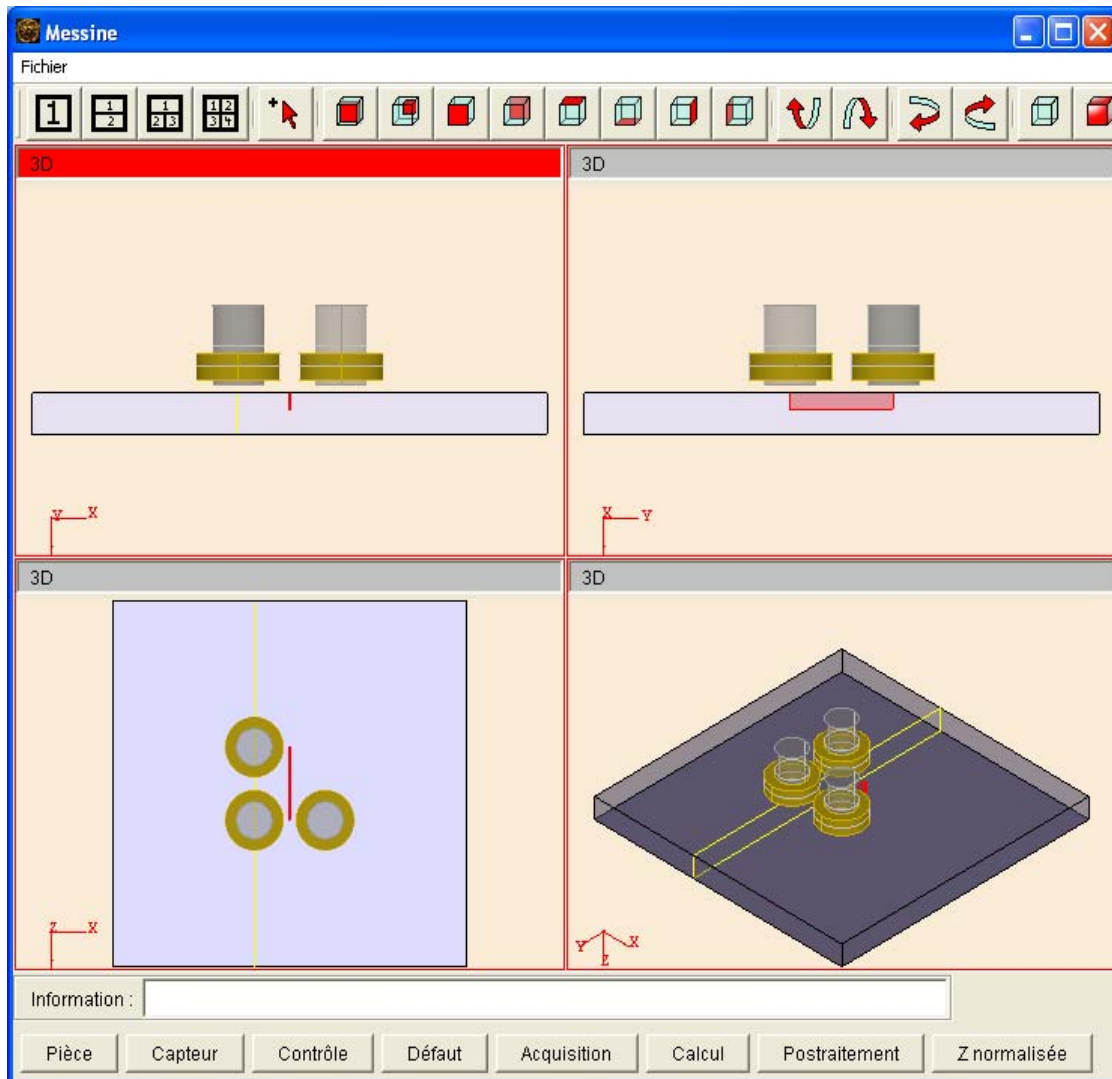


Figure 1 : Simulation d'un capteur comportant 3 bobines avec noyau de ferrite dans CIVA®

Le module CF du code CIVA® a été validé par de nombreuses comparaisons avec des données expérimentales. Un exemple de validation est donné en Figure 2. Le cas présenté correspond à un tube en Inconel 600 (conductivité 1 MS/m) de rayon interne 9,84 mm et d'épaisseur 1,27 mm. La sonde est composée de 2 bobinages identiques parcourus par un courant sinusoïdal de même phase à la fréquence de 100 kHz (flux additif). Le rayon interne des bobinages est de 7,83 mm, le rayon externe est de 8,5 mm, la hauteur est de 2 mm et le nombre de tours est de 70. La distance entre les bobinages est de 0,5 mm. Le défaut considéré est un défaut volumique externe de type prisme droit à base rectangulaire pouvant représenter une usure du tube. L'écart entre les données expérimentales et le résultat de simulation est inférieur à 5% ce qui est très satisfaisant compte tenu des incertitudes expérimentales et des exigences générales du CND.

Des informations complémentaires sur le modèle ainsi que des références documentaires sont disponibles sur le site WEB de CIVA® (<http://www-civa.cea.fr>) .

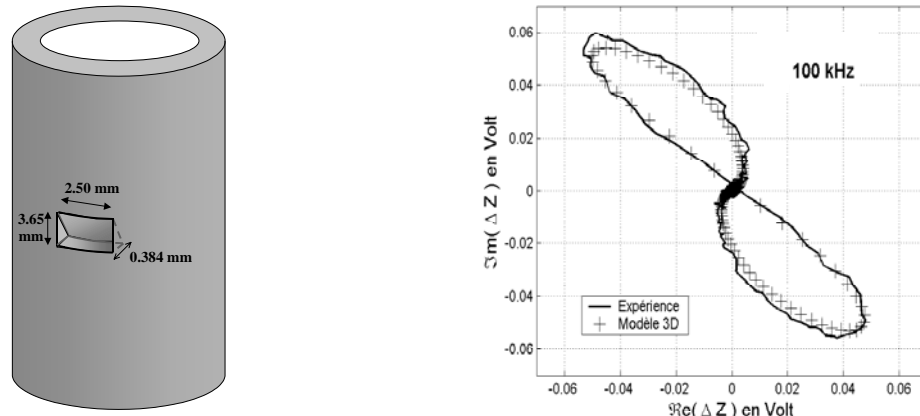


Figure 2 : Validation du code pour le cas d'un contrôle à 100 kHz par sonde axiale différentielle d'un tube comportant un défaut complexe ('_' données expérimentales, '+' résultats de simulation)

2.2 Le logiciel FLUX®

FLUX® est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur pour le génie électrique. FLUX permet la modélisation bidimensionnelle et tridimensionnelle des phénomènes électromagnétiques en basse fréquence (problèmes statiques, régime harmonique ou transitoire avec courants) et de phénomènes couplés (couplage avec équations électriques, couplage avec la thermique, prise en compte des mouvements). Sa méthode de résolution principale est la méthode des éléments finis. FLUX® permet de traiter des configurations de CND a priori sans limitation dans la complexité des pièces et des capteurs.

FLUX® est donc destiné au vaste monde du génie électrique, domaine dans lequel il est devenu une référence en conception par éléments finis. Cela se traduit par plus de 1000 références industrielles dans le monde aussi bien dans les industries, les bureaux d'études, les centres de recherche et l'enseignement. Les applications phares sont les moteurs et alternateurs, les capteurs, transformateurs, le traitement thermique, le Contrôle Non Destructif, la signature et l'enregistrement magnétique, la CEM.

FLUX® est une copropriété de CEDRAT SA d'une part et de LEG/INPG CNRS d'autre part.

3 MISE EN PLACE D'UNE METHODOLOGIE POUR LA MODELISATION DE PROBLEMES CND AVEC FLUX® : MODELISATION DU BENCHMARK 8

3.1 Présentation du problème 8

L'étude présentée est basée sur le Benchmark 8 des Team Workshop [1]. Le problème est décrit en Figure 3. Il s'agit d'un défaut parallélépipédique dans une plaque métallique. Le capteur est composé d'une bobine cylindrique émettrice et deux bobines réceptrices couplées en mode différentiel. On étudie les signaux obtenus pour un mouvement longitudinal et pour un mouvement transversal.

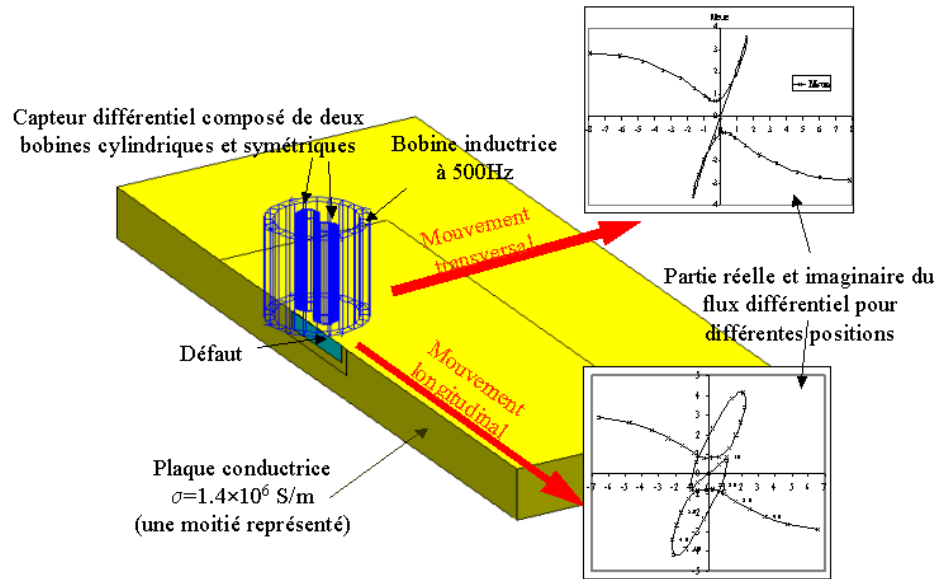


Figure 3 : Le Benchmark 8 des Team Workshop

L'objectif de l'étude réalisée en 2003 par CEDRAT à la demande d'Edf était :

- de retrouver pour les deux mouvements les deux signaux mesurés
- de mettre en place une ou des méthodologies de calcul de CND avec FLUX® permettant de qualifier FLUX® pour les applications CND

Résultats obtenus après optimisation de la méthode :

Les deux courbes ci-dessous montrent les résultats très satisfaisants obtenus après détermination de la méthode de modélisation décrite dans les paragraphes suivants.

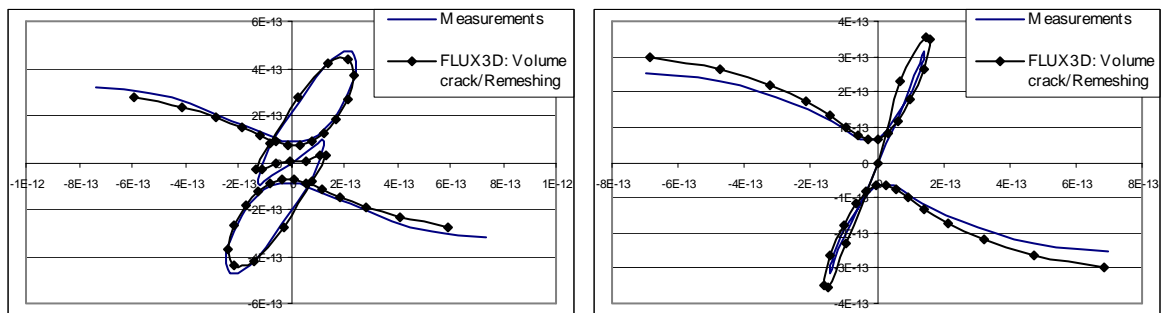


Figure 4 : Comparaison calculs/mesures → résultats finaux obtenus

3.2 Principe, Méthodologie, et paramètres sensibles

Le principe fondamental utilisé lors de cette étude est déduit des faits suivants :

- FLUX® est basé sur la méthode des éléments finis qui est une méthode numérique
- FLUX® donne donc des résultats entachés d'une certaine erreur numérique.

- Les erreurs numériques inhérentes à la méthode des éléments finis sont le plus souvent dues au maillage.
- Le signal recherché est la différence entre deux signaux (le flux dans les bobines) pour différentes positions du capteur par rapport au défaut.
- Calculer le flux pour différentes positions conduit naturellement et quasi nécessairement à différents maillages alors que le maillage est la source première probable des imprécisions

Dans la mise à place d'une méthodologie de calcul, cela nous a conduit à retenir dès le départ les principes suivants :

- Le maillage dans les deux bobines réceptrices doit être identique (symétrique) de façon à ce que le bruit de maillage d'une bobine soit identique au bruit de maillage (soustraction et non-addition du bruit). Nous l'avons grâce à l'utilisation de mailleurs extrusifs et « copie » (cf Figure 5)
- Le flux dans les bobines réceptrices doit être calculé avec un maillage constant non dépendant de la position du capteur par rapport au défaut et réciproquement le maillage de la plaque et du défaut ne doit pas dépendre de la position du capteur. Pour prendre en compte le mouvement, cela nous a conduit à tester et utiliser pour le CND les deux techniques développées [2] pour la modélisation par FLUX® de la dynamique des actionneurs, à savoir
 - la technique dite de glissement de maillage
 - la technique dite de remaillage partiel

Par ailleurs, nous avons réalisé les études complémentaires suivantes :

- Sensibilité à la densité de maillage et en particulier au maillage de la plaque et du défaut : un maillage suffisamment dense est nécessaire sans que l'on puisse aujourd'hui en déduire une règle générique.
- Modélisation volumique ou surfacique du défaut.

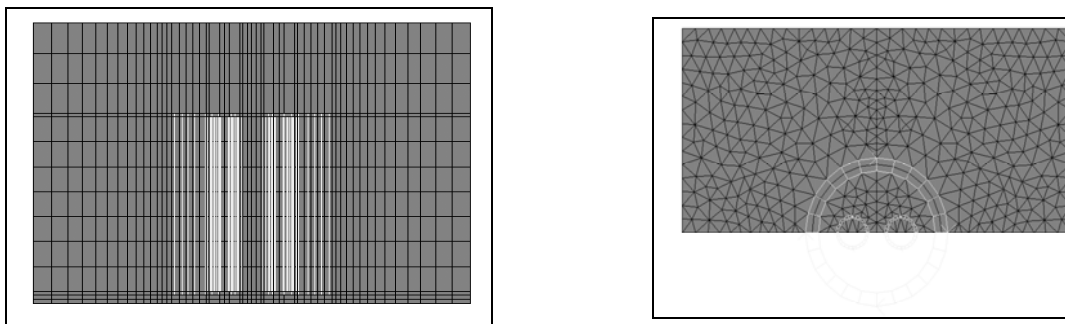


Figure 5 : Maillage extrusif des bobines, maillage symétrique des bobines réceptrices

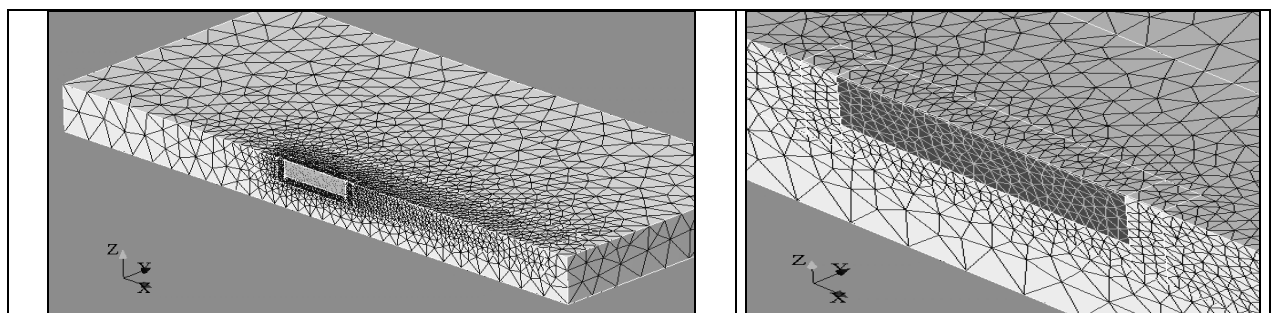
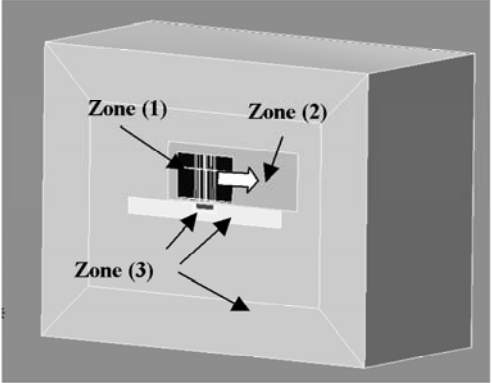
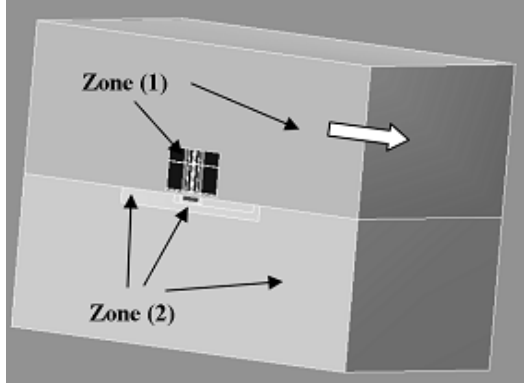
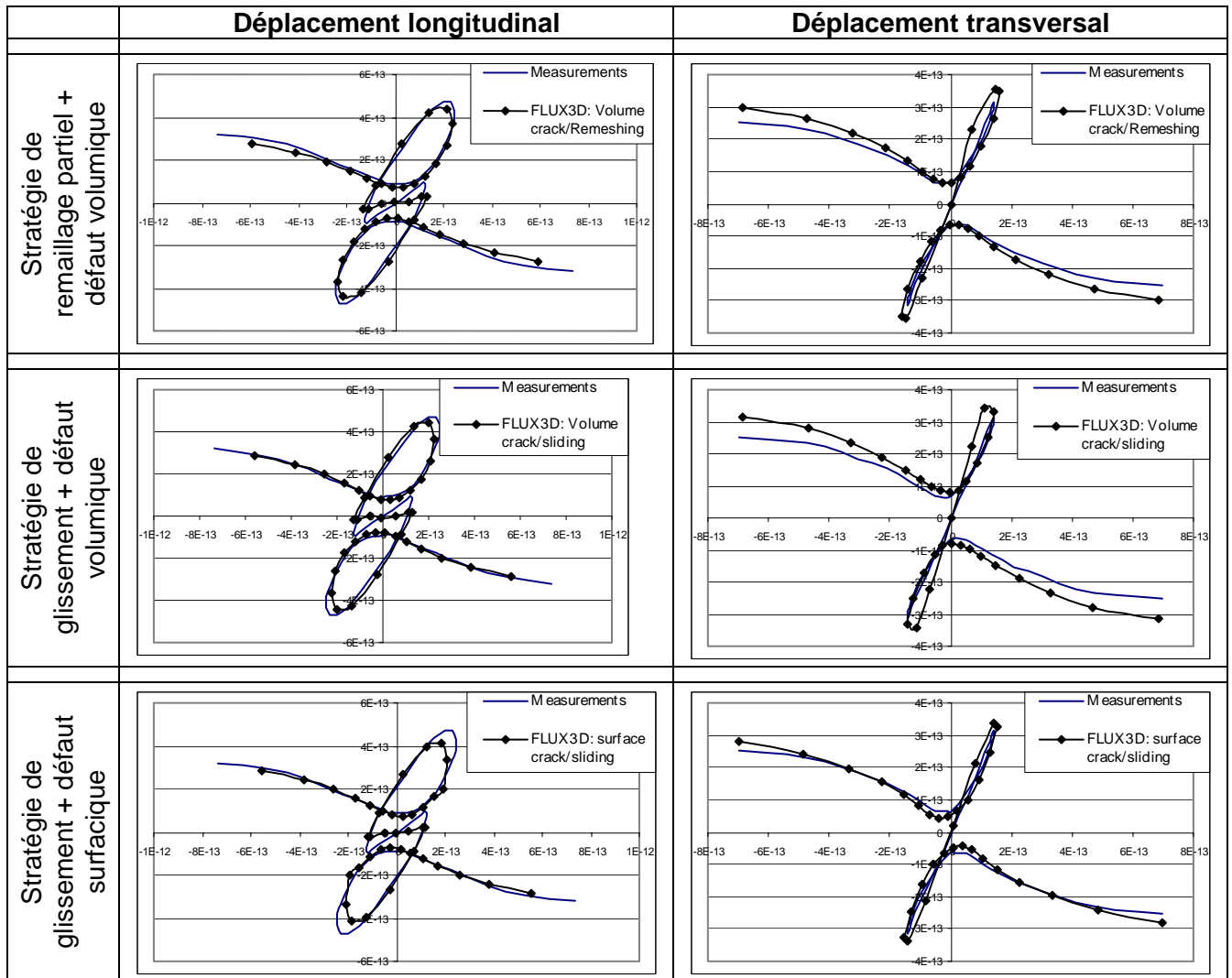


Figure 6 : Maillage de la plaque et du défaut

3.3 Prise en compte du mouvement avec la technique de glissement ou de remaillage partiel

| | Stratégie avec la technique de remaillage partiel | Stratégie avec la technique de glissement |
|--------------------------------|---|---|
| |  <p>Figure 7 : Les 3 zones pour stratégie avec remaillage partiel</p> |  <p>Figure 8 : Les 2 zones pour stratégie avec glissement</p> |
| Description | <p>Dans la stratégie de remaillage partiel, le domaine éléments finis est divisé en 3 grandes zones</p> <p>Zone 1 : Comprend le capteur et une zone d'air autour. La géométrie et le maillage sont déplacés au cours de l'étude en position</p> <p>Zone 2 : Zone compressible remaillée pour chaque position du capteur (Zone 1)</p> <p>Zone 3 : Plaque + défaut + air ne faisant pas partie de la zone 2 et 3.</p> <p>Note : Ici la zone 2 compressible est petite. Elle pourrait être agrandie à l'ensemble de l'air ne faisant pas partie de la zone 1</p> | <p>Dans la stratégie de glissement, le domaine éléments finis est divisé en deux grandes zones :</p> <p>Zone 1 : Comprend le capteur et moitié « supérieur » de l'air. La géométrie et le maillage de cette zone sont déplacés au cours de l'étude en position</p> <p>Zone 2 : Plaque + défaut + moitié « inférieur » de l'air</p> <p>La zone 1 « glisse » sur la zone 2. Le maillage est alors localement non conforme</p> |
| Avantage / inconvénient | <ul style="list-style-type: none"> • La description est très naturelle avec la Zone « capteur », la zone « plaque + défaut », et la zone air « à remailler ». • Elle s'est avérée plus précise dans une étude réalisée ultérieurement [3] | <p>Peu d'avantages en final. On l'imaginait plus précise et elle s'est avérée ultérieurement moins précise.</p> |

3.4 Ensemble des résultats obtenus



4 ROBUSTESSE DE LA METHODE : AUTRES VALIDATIONS

Cette méthode étant déterminée, il était important d'éprouver sa robustesse en l'appliquant à d'autres cas de validation.

4.1 Défauts Canoniques

Un certain nombre de cas de validation mettant en jeu divers défauts canoniques ont ainsi été traités par FLUX® :

Défauts :

- Plaque en Inconel 600 avec défauts volumiques de forme rectangulaire: (défauts débouchants non traversants et traversants)
- Plaque en Inox304L avec défauts volumiques de forme rectangulaire et triangulaire

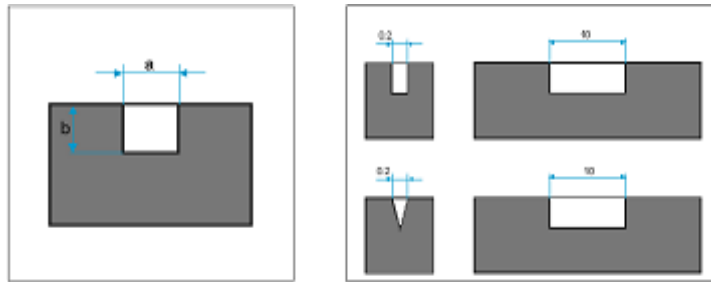


Figure 9: Plaques et défauts canoniques

Capteurs :

- Capteur 1 : Capteur à double fonction ; mode absolu
- Capteur 2 : Capteur à double fonction avec noyau de ferrite ; mode absolu

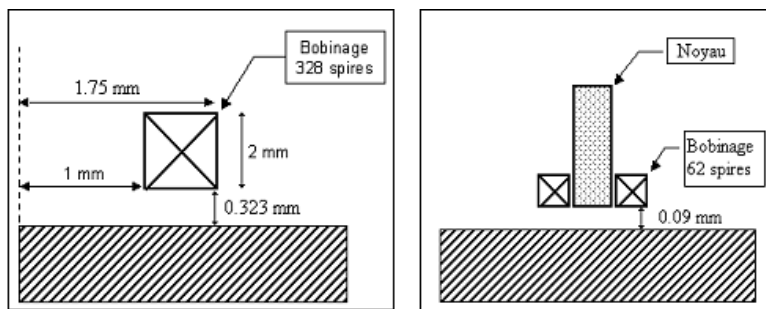


Figure 10 : Schéma des capteurs 1 et 2

Configurations étudiées :

| Défauts | Plaque | Capteur |
|------------------------------|-------------|-----------|
| Rectangulaire non traversant | Inconel 600 | Capteur 1 |
| Rectangulaire traversant | Inconel 600 | Capteur 1 |
| Triangulaire | Inox 304L | Capteur 2 |
| Rectangulaire | Inox 304L | Capteur 2 |

Pour traiter ces cas, on s'est attaché à suivre les mêmes règles de modélisation :

- maillage constant dans la zone de calcul du flux quelque soit la position considérée,
- maillage régulier et symétrique du capteur,
- densité de maillage adaptée à la variance des CF autour du défaut.

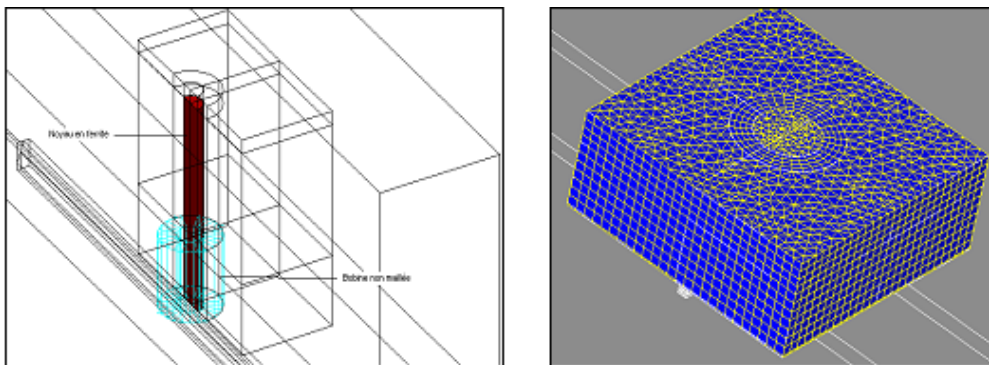


Figure 11 : Géométrie du capteur et vue externe du maillage dans la zone de calcul du flux

Spécificité du mode absolu :

En mode absolu, on doit réaliser deux simulations : une première en configuration avec défaut et une seconde sans défaut. Cependant, on conserve exactement la même géométrie et le même maillage, seul le matériau de la zone «défaut» diffère entre les deux simulations. La différence des deux résultats nous permet d'accéder directement au signal utile, à savoir la variation d'impédance du capteur due au défaut, tout en éliminant une part importante du bruit numérique de maillage (naturellement éliminé en mode différentiel).

Résultats :

Les résultats obtenus sont tout à fait satisfaisants :

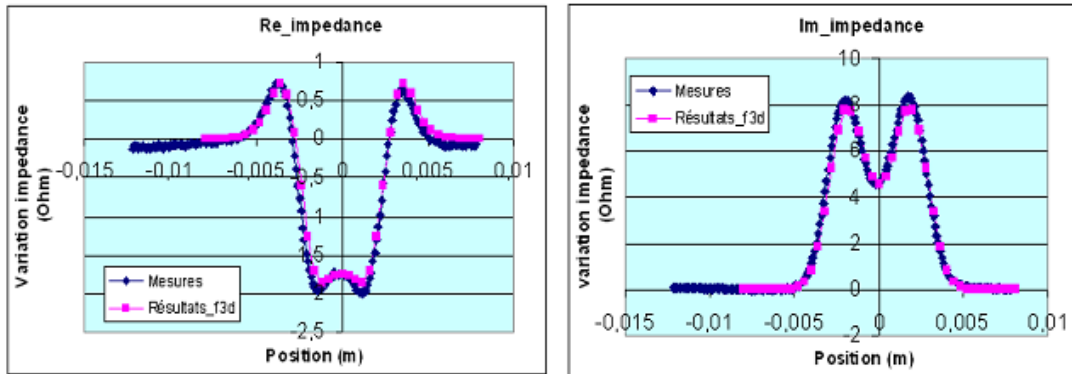


Figure 12 : Variation d'impédance due au défaut traversant (Capteur 1)

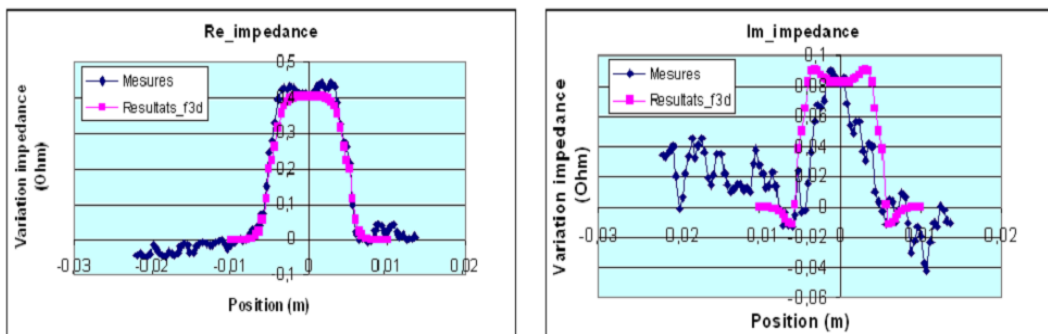


Figure 13 : Variation d'impédance due au défaut rectangulaire (Capteur 2)

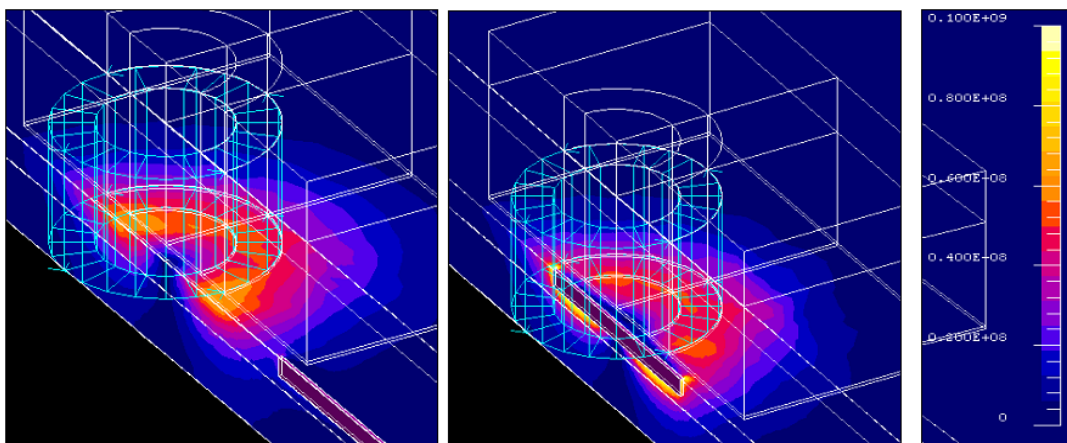


Figure 14 : Influence du défaut sur les densités de courant de Foucault(capteur 1)

4.2 Sonde STT

La sonde transverse tournante (STT) est un capteur industriel utilisé par Edf pour la détection des défauts circonférentiels sur les tubes des générateurs de vapeur . En terme de modélisation, cette sonde présente divers paramètres nouveaux par rapport aux cas de validation précédents (hautes fréquences, présence d'un anneau de cuivre, entrefer réduit, etc.) élargissant ainsi le champ des validations réalisées sous FLUX®. La réussite de cette étude témoigne de la robustesse de la méthode et permet d'envisager une bonne adaptabilité de FLUX® aux différents problèmes de CND par courants de Foucault, y compris sur des configurations industrielles complexes.

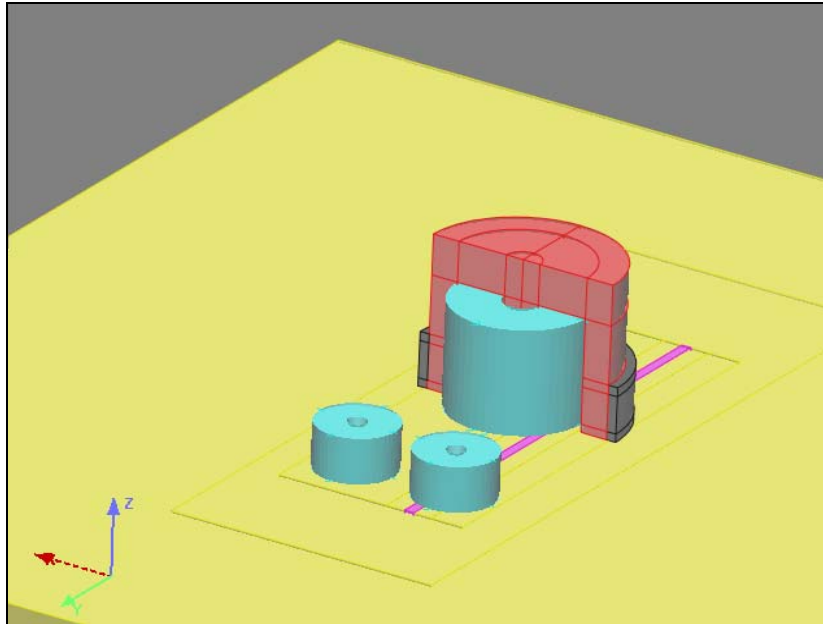


Figure 15 : Sonde Transverse Tournante modélisée dans FLUX® (bobines en turquoise, pot de ferrite en rouge, anneau de cuivre en noir)

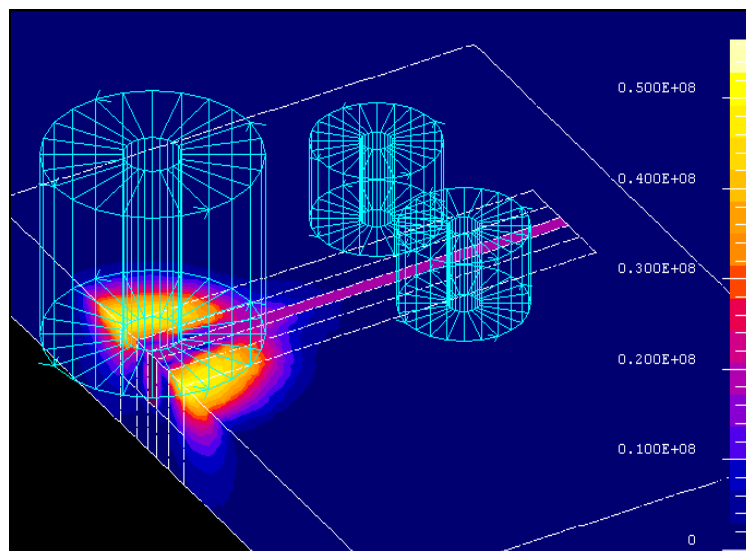


Figure 16 : Dégradé des courants de Foucault avec STT sur défaut

Ce présent cas d'étude est présenté en détail dans l'article cité en référence[3].

CONCLUSION

Les codes CIVA® et FLUX® ont l'ambition commune de proposer aux spécialistes du CND un outil de simulation efficace et accessible pour la conception de capteurs, la définition de procédés de contrôle et leur qualification. Une étape importante dans le déploiement industriel des ces outils passe par une phase de validation par comparaison à des données expérimentales. Les résultats obtenus actuellement et présentés dans ce document montrent que cette étape est franchie pour des configurations relativement simples. La prochaine étape traitera de situations plus complexes et plus proches des problématiques industrielles.

Les codes CIVA® et FLUX® apportent deux approches complémentaires au CND : bonne adaptation de CIVA® aux études paramétriques de part sa facilité d'utilisation et sa grande vitesse d'exécution, bonne adaptation de FLUX® aux configurations industrielles complexes de part son approche généraliste. Les perspectives d'un couplage des deux codes pour le CND sont extrêmement attrayantes. Des premiers essais de couplage entre FLUX® et CIVA® ont été réalisés et montrent qu'il est possible de traiter une situation complexe en conservant une grande vitesse de calcul. Les futurs développements des ces outils tireront partie de cette complémentarité ainsi que de la mise en commun des outils d'analyse métier de la plate-forme CIVA (Lissajous, cartographie, étalonnage, combinaisons de fréquence).

Remerciements

L'étude du benchmark n°8 du team Workshop et de la sonde STT ont pu être réalisées grâce au concours d'Edf.

Le cas de validation présenté pour CIVA® a été obtenu dans le cadre d'une action de recherche coopérative entre le CEA et l'IRSN.

Références bibliographiques

- [1] J.C. Verite : "A coil over a crack. (Results for benchmark problem 8 of Team Workshop)". COMPEL, Vol.9, n°3, pp. 155-167, 1990
- [2] C. Guérin, R. Ruiz, V. Leconte, C. Bataille, P. Wendling , "3D Finite Element Modeling of Magnetic Actuators with Motion". CEFC 2004
- [3] A.Schumm, G. Pichenot, M; Mayos : « Une démarche de validation et comparaison des codes de modélisation en courants de Foucault » . Journées COFREND 2005, Beaune