

# **PLAYA : PROMOUVOIR LA SIMULATION DES CONTROLES NON DESTRUCTIFS PAR COURANTS DE FOUCAULT**

## ***PLAYA: PROMOTING THE SIMULATION OF NON DESTRUCTIVE EDDY CURRENT TESTING***

A. Abakar<sup>(1)</sup>, X. Brunotte<sup>(2)</sup>, F.Foucher<sup>(2)</sup>, S. Clenet<sup>(3)</sup>, G. Krebs<sup>(3)</sup>, P. Dubois<sup>(4)</sup>, G. Meunier<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> EDF R&D – 1, avenue du général de gaulle, 92141 Clamart Cedex

Tél : 01 47 65 34 67 - Fax : 01 47 65 32 51

[abakar.ali@edf.fr](mailto:abakar.ali@edf.fr)

<sup>(2)</sup> CEDRAT, Inovallée 15 chemin de malacher 38240 Meylan Cedex

[Xavier.brunotte@cedrat.com](mailto:Xavier.brunotte@cedrat.com), [Fabrice.foucher@cedrat.com](mailto:Fabrice.foucher@cedrat.com),

<sup>(3)</sup> L2EP ARTS et METIERS PARISTECH, 8, Bd Louis XIV 59046 Lille Cedex

[stephane.clenet@lille.ensam.fr](mailto:stephane.clenet@lille.ensam.fr)

<sup>(4)</sup> CEA-LIST – CEA Saclay, Bâtiment 611, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

[ph.dubois@cea.fr](mailto:ph.dubois@cea.fr)

<sup>(5)</sup> G2ELAB ENSIEG-BP 46 - 38402 - Saint Martin d'Hères – Cedex

[Gerard.Meunier@leg.ensieg.inpg.fr](mailto:Gerard.Meunier@leg.ensieg.inpg.fr)

## **RESUME**

Dans le domaine de la simulation de Contrôle Non Destructif (CND), l'association des géométries réalistes (CAO) et la possibilité de pouvoir créer la scène de contrôle entièrement dans un environnement 3D a beaucoup contribué à diffuser la modélisation des contrôles radiographiques et ultrasonores. La troisième grande technique de Contrôle Non-destructif par Courants de Foucault (CND-CF), n'a pas encore complètement franchi ce pas, malgré les progrès récents. L'expérience passée des partenaires (CEA, CEDRAT, EDF, G2ELAB, L2EP) concernant la simulation des phénomènes électromagnétiques a permis d'identifier un certain nombre de difficultés qui doivent impérativement être résolues de façon automatique pour le futur utilisateur. Plusieurs de ces difficultés concernent la modélisation, la discrétisation et les méthodes numériques : la réalisation du maillage, le traitement des problèmes de connexité, la résolution des systèmes linéaires. L'objectif du projet est de faire franchir définitivement ce pas avec comme buts industriels :

- De permettre à l'association CEA-CEDRAT avec les logiciels CIVA et FLUX d'imposer leur solution commune en CND-CF comme un leader incontestable de la modélisation en CND au niveau mondial.
- D'offrir aux utilisateurs, dont en premier lieu EDF pour la sûreté des centrales nucléaires, une solution fiable concernant la qualité des résultats, sûre et efficace dans l'utilisation, et rapide dans l'exécution.

Une description synthétique des différentes étapes de ce projet ainsi que des travaux déjà engagés est proposée dans ce document. En particulier, les étapes permettant le développement de méthodes numériques, sur l'interface homme-machine, et sur l'exploitation des développements faits dans MUTSIC (en particulier le couplage FLUX-CIVA) ainsi que leur validation.

## ABSTRACT

*In the area of simulation of Non Destructive Testing (NDT), the association of realistic geometries and the possibility of being able to create the scene entirely in a 3D environment has contributed to develop the modeling using radiographic and ultrasonic controls . The third major technique of Non-Destructive Eddy Current Testing (NDT EC) , has not yet fully taken this step, despite recent progress. Past experience of the partners (CEA CEDRAT, EDF, G2ELAB, and L2EP) in the simulation of electromagnetic phenomena identified a number of problems which must be solved in an automatic way for the future user. Many of these problems concerns modeling, discretizing fields and numerical methods: the realization of the mesh, problems of connectivity, linear solvers systems.*

*The project aims to take the final steps with these industrial purposes as: To enable the association CEA-CEDRAT with software CIVA and FLUX to impose their common solution in NDT-EC as a leader of the NDT modeling. To provide users whose first EDF for the safety of nuclear power plants, a reliable solution on the quality of results, safe and effective in use, and rapid implementation. A summary description of the different stages of this project as well as the work already started is proposed in this document. In particular, steps on the development of numerical methods, on the human-machine interface, and the exploitation of developments made in MUTSIC (especially the FLUX CIVA coupling), as well as their validation.*

## INTRODUCTION

Les avancées techniques dans la simulation numérique des méthodes de contrôle non destructif (CND), notamment pour les ultrasons mais également pour la radiographie ont permis à la simulation de prendre une place importante dans les domaines techniques concernés, aussi bien dans le nucléaire que dans l'aéronautique. Dans ces domaines, la modélisation est aujourd'hui un véritable outil, que ce soit en amont du contrôle pour la mise au point des méthodes de contrôle, la démonstration de leurs performances et même afin d'intégrer la contrôlabilité des pièces dès leur conception, ou en aval du contrôle, pour l'explication des phénomènes observés.

Plusieurs effets se sont conjugués pour permettre le transfert de la modélisation des mains des Numériciens vers les bureaux d'études des ingénieurs : il y a d'une part l'augmentation des puissances de calcul disponibles pour les micro-ordinateurs, accompagnée des progrès considérables réalisés par les modélisateurs sur le plan numérique et algorithmique, qui ont permis de rendre un calcul réaliste faisable sur une station de travail. Mais en parallèle au développement des modèles, on constate aussi que ceux-ci sont devenus plus accessibles, d'une part grâce aux progrès fait dans les interfaces homme-machine, et d'autre part grâce à une intégration des post-traitements, facilitant l'exploitation des résultats des simulations. L'association des géométries réalistes (CAO) et la possibilité de pouvoir créer la scène de contrôle entièrement dans un environnement 3D a beaucoup contribué au fait que la modélisation des contrôles en ultrasons et en radiographie est aujourd'hui considérée comme un outil de travail courant.

Malgré les progrès récents, la troisième grande technique de contrôle non-destructif par courants de Foucault (CND CF) n'ayant pas encore complètement franchi ce pas, c'est l'objectif du projet PLAYA que de parvenir à ce stade, et plus précisément :

- Offrir aux utilisateurs, dont en premier lieu EDF pour la sûreté des centrales nucléaires, une solution fiable concernant la qualité des résultats, sûre et efficace dans l'utilisation, et rapide dans l'exécution.
- Permettre à l'association CEA-CEDRAT de s'imposer au niveau mondial comme un leader incontestable de la modélisation en CND CF, à travers l'association des logiciels CIVA et FLUX.

De par l'analyse des besoins des industriels en matière de simulation des contrôles par courants de Foucault et au regard des solutions apportées par les logiciels existants, il ressort un double obstacle majeur à leur utilisation de manière plus intensive :

- L'utilisation des codes éléments finis reste difficilement accessible aux ingénieurs d'étude pour les raisons suivantes :
  - Elle requiert des compétences dans le domaine des méthodes numériques appliquées à l'électromagnétisme, en particulier liées à la compétence à développer pour obtenir un maillage adapté.
  - Les temps de calcul sont trop importants.
  - L'interface généraliste est moins facile d'utilisation qu'une interface métier (dédiée CND)
- De l'autre côté, les outils de modélisation métier dédiés CND présentent l'avantage :
  - d'être rapides en temps de calcul grâce aux développements de méthodes semi-analytiques
  - accessibles facilement par leur interface qui rend possible leur utilisation sans nécessité de pré requis particulier en électromagnétisme.
  - En revanche, comme ces méthodes ne sont pas aussi générales que celles basées sur les éléments finis, ces outils ne permettent pas toujours de modéliser des contrôles dans des situations les plus complexes.

Le projet PLAYA a pour ambition d'optimiser la modélisation des procédés par courants de Foucault dans le but d'offrir aux industriels du secteur un outil à la fois convivial ( interface métier) et performant.

Une description synthétique du projet ainsi que son état d'avancement est proposé dans cet article.

## 1. DESCRIPTION DU PROJET PLAYA

### ***Objectifs du projet***

L'objectif du projet consiste donc au développement de méthodes numériques, d'une interface homme-machine métier, de l'exploitation des développements issus du projet MUTSIC (en particulier le couplage FLUX-CIVA) ainsi que la validation des résultats de simulation.

Pour parvenir à cet objectif on s'appuie sur l'existence d'outils de simulation des CND aboutis et déjà utilisés dans l'industrie tels que les logiciels CIVA développé par le CEA-LIST et FLUX développé par CEDRAT.

### ***Les partenaires du projet***

Le projet regroupe :

- Un industriel concerné par l'exploitation des méthodes de CND, et utilisateur final de l'outil de simulation : **EDF**,
- un laboratoire universitaire du domaine de l'électromagnétisme basse fréquence (**le G2ELAB**, INPG Grenoble),
- un laboratoire universitaire du domaine de l'électromagnétisme basse fréquence (**le L2EP** de l'ENSAM et de l'université de Lille),
- un centre de recherche, développeur de modèles physiques pour le contrôle et de l'outil de simulation CIVA (**CEA-LIST**),
- une PME innovante éditeur d'un logiciel de modélisation et de simulation électromagnétique (FLUX) et distributeur de CIVA (**CEDRAT**).

### ***Les principales étapes du projet***

Le premier lot du projet concerne l'amélioration des **méthodes numériques** relatives au code par éléments finis FLUX afin d'augmenter son accessibilité. Il traite un thème générique relatif aux problèmes liés au déplacement automatisé d'une sonde par rapport à la pièce à contrôler (par exemple, un tube de générateur de vapeur). Il consiste à résoudre les difficultés numériques actuellement rencontrées lors de la prise en compte du mouvement de la sonde : choix automatique du domaine d'étude, des coupures éventuelles et du maillage à adapter en fonction de la qualité de la solution. Il s'agit là des pré-requis nécessaires pour automatiser le calcul selon une trajectoire définie dans une géométrie complexe.

Le deuxième lot concerne **l'interface homme-machine**, qui doit encapsuler les notions de maillage afin de permettre la description complète d'une situation de contrôle dans un environnement CAO. La prise en compte de la cinématique de la sonde fait intervenir un calcul de « physique réaliste » lors du passage de la sonde à travers des zones pouvant générer un basculement de la sonde, comme c'est le cas dans la zone de transition de soudage d'un tube de générateur de vapeur. Ce lot a également pour objet d'enrichir les outils de post-traitements métiers.

Le troisième lot a vocation à accroître encore la complémentarité entre les modèles éléments finis et semi-analytiques en associant CIVA et FLUX. En effet, à l'issue du projet PLAYA, les utilisateurs de la plate-forme pourront effectuer des simulations de contrôle par courants de Foucault en utilisant les modèles de CIVA ou bien FLUX. Cependant, de par l'expérience déjà acquise en la matière, il apparaît qu'il est très efficace de répartir les calculs pour une même situation de contrôle entre FLUX et CIVA-CF. Cette approche à l'avantage d'exploiter au mieux les points forts de chacune des méthodes et de proposer ainsi aux industriels un outil de simulation permettant de traiter des situations de contrôle plus complexes que celle accessible via CIVA-CF tout en bénéficiant des avantages des méthodes semi-analytiques (temps de calcul courts, aucune expertise particulière de la part de l'utilisateur). Enfin, les développements de simulation réalisés dans le cadre du projet PLAYA seront intégrés dans la plate-forme CIVA.

## 2. Les méthodes numériques

### **Maillage adaptatif et estimateurs d'erreur**

Deux stratégies d'adaptation de maillage ont été étudiées :

- Une première technique basée sur le remaillage local (logiciel HOMARD [1]) qui consiste à estimer l'erreur locale et raffiner les régions à fort taux d'erreur.
- Une seconde technique basée sur le remaillage global (technique « Bubble ») : Elle consiste à partir d'une carte de maille spatiale (2D pour un maillage 2D, 3D pour un maillage 3D) de construire un nuage de nœuds bien positionnés dans l'espace qui donneront après insertion par technique de Delaunay un maillage de très bonne qualité (forme des éléments / respect de carte de mailles). Le maillage résultat est alors utilisé pour améliorer la qualité du résultat.

Dans la première technique, plusieurs estimateurs d'erreurs ont été étudiés [2] :

► Un premier estimateur d'erreur a été proposé sur base des travaux de (C.Li, Z. Ren, A. Razek – Laboratoire de Génie Electrique de Paris) et sur la thèse de G. Marquès (L2ep). Le logiciel Carmel permet le calcul de champs à partir de deux formulations duales magnéto-harmonique en potentiels,  $A-\varphi$  et  $T-\Omega$ . Après résolution, ces deux formulations admettent des couples de champs *admissibles*  $(B, E)$  en  $A-\varphi$  et  $(H, J)$  en  $T-\Omega$  avec  $B, H, E$  et  $J$  respectivement l'induction, le champ magnétique, le champ électrique et la densité de courant. Ces couples de champs admissibles vérifient les équations de Maxwell mais pas les lois de comportement ( $B=\mu H$  et  $J=\sigma E$ ). La démarche qui a été proposée est de faire deux résolutions (une en  $A-\varphi$  puis l'autre en  $T-\Omega$  et ceci pour une position donnée de la sonde). Ayant alors quatre valeurs champs, on peut vérifier le degré de non vérification des deux lois de comportement sur chaque élément ce qui permet de constituer une carte d'erreur sur tout le domaine d'étude.

► Pour la seconde catégorie d'estimateurs d'erreur, nous partons de nouveau des champs admissibles obtenus par les deux formulations. Il s'agit ici de quantifier les discontinuités de champs. Ainsi, en formulation  $T-\Omega$ , les champs admissibles sont  $H$  et  $J$ , les champs  $B$  et  $E$  calculés à partir des lois de comportement présentent des discontinuités. Ces deux champs étant respectivement discrétisés sur les facettes et sur les arêtes, une erreur magnétique peut-être introduite en quantifiant  $B.n$  et une erreur électrique avec  $E.t$  en formulation  $T-\Omega$ . D'un point de vue dual, pour la formulation  $A-\varphi$  nous évaluons les discontinuités de  $J.n$  et de  $H.t$ . On évalue alors les discontinuités des flux  $J.n$  et de  $B.n$  traversant chaque facette et les discontinuités des circulations sur les arêtes pour  $E.t$  et  $H.t$ . La résolution d'une seule formulation est ici nécessaire contrairement à l'estimateur précédent ce qui permet de gagner en temps de calcul.

► Le troisième estimateur est proposé dans le cadre d'une adaptation de maillage en formulation  $T-\Omega$ . Il s'inspire de travaux menés G2ELAB. Dans les parties électriquement conductrices, de manière identique aux vérifications de  $J.n$  et  $B.n$ , on vient calculer les différences des flux de vecteur de Poynting sur chaque facette. Dans les parties conductrices, l'estimateur proposé revient à tester les discontinuités d'une fonction  $s$  à travers les facettes telle que :

$$s = (E \wedge H).n = E_t . H_t$$

Dans les parties non conductrices, un développement de l'énergie magnétique montre que l'on peut tester les discontinuités d'une fonction  $s$  :

$$s = \Omega (B.n) = \Omega . B_t$$

Les données exploitées dans la simulation du CND par les éléments finis, sont habituellement les variations des capteurs dues à la présence de défaut(s). Ces variations étant très faibles, elles sont *noyées* dans le bruit numérique introduit par le maillage. Dans la bibliographie, il est proposé de faire deux calculs, un calcul avec défaut puis un calcul sans défaut. On vient ainsi soustraire les flux captés calculés dans les deux cas.

Nous proposons ici, non pas de travailler sur les champs mais sur leur variation entre le cas avec et sans défaut. On peut alors utiliser les estimateurs proposés précédemment mais cette fois sur la base de la variation des champs et pas des champs eux-mêmes (Figure 1). Cette approche donne de meilleurs résultats avec un nombre d'itération moindre [2,6].

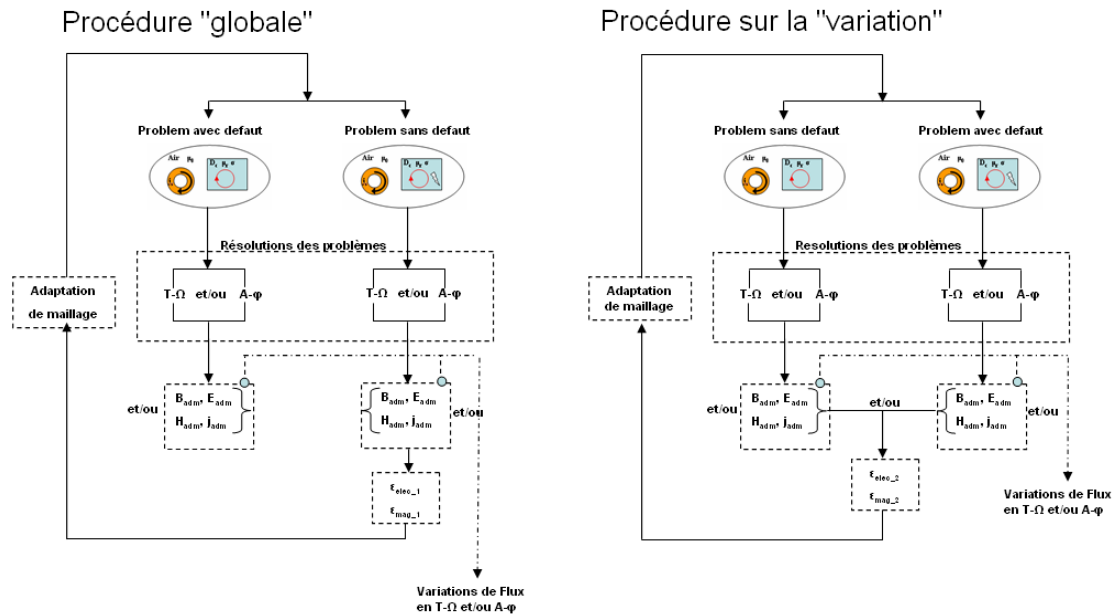


Figure 1 : Organigramme des méthodes étudiées

### Traitement automatique du problème de connexité lié aux régions conductrices trouées :

La présence de régions conductrices avec trous (cas que nous rencontrons en contrôle non destructif lors de défauts traversants voir Figure 2) introduit une difficulté supplémentaire. En effet, un courant non nul pouvant circuler autour de chaque trou, il est nécessaire de réduire le champ H par rapport à ces courants afin de respecter le théorème d'Ampère sur un chemin fermé passant par le trou (de la même façon que le champ H est réduit par rapport aux courants inducteurs des bobines). Plutôt que de boucher les trous par des matériaux faiblement conducteurs, ce qui peut conduire à des problèmes mal conditionnés, nous avons développé une formulation qui permet le calcul des courants autour des trous (et qui nécessite autant d'inconnues supplémentaires que de trous).

Cette formulation générale consiste à définir une boucle de courant (zone conductrice) autour de chaque trou, permettant de prendre en compte les inconnues supplémentaires (les courants autour de chaque trou) et les équations associées. Cette définition peut être réalisée manuellement, mais nécessite alors une intervention experte et délicate de la part de l'utilisateur, largement incompatible avec une utilisation conviviale et transparente des logiciels de simulation. Pour ces raisons, une automatisation complète de la recherche des chemins de boucle par l'intermédiaire de coupures dans le domaine conducteur a été proposée. En pratique, nous procédons en trois étapes :

- identification des problèmes de connexité, ce qui revient à déterminer automatiquement le nombre de trous présents dans la région conductrice, à partir de la connaissance de la géométrie,
- création automatique de coupures (autant de coupures que de trous) en s'appuyant sur la géométrie ou le maillage, afin de rendre la géométrie simplement connexe,
- détermination des chemins de boucle à partir de la résolution de problèmes électrocinétiques en imposant une différence de potentiel électrique sur les coupures.

Les développements effectués constituent un apport original dans le domaine de la modélisation numérique [3].

#### *Coupure automatique – Algorithme de gonflement*

L'idée de cet algorithme est de simuler le gonflement d'un ballon dans un volume. Si le volume est simplement connexe, le ballon va prendre la forme du volume et ses bords seront ceux de ce dernier. Au contraire, si le volume est non simplement connexe (fermé ou troué), le ballon va aussi prendre la forme du volume. Cependant une partie des bords du ballon sera réunie pour former l'équivalent d'un disque qui coupe le volume et qui le rend simplement connexe.

### **Accélération et amélioration du solveur FLUX**

#### **Eléments finis nodaux et d'arêtes hiérarchiques**

Si la théorie des éléments nodaux hiérarchiques est bien connue et stable, on trouve différentes théories concernant les éléments d'arêtes hiérarchiques. Une recherche

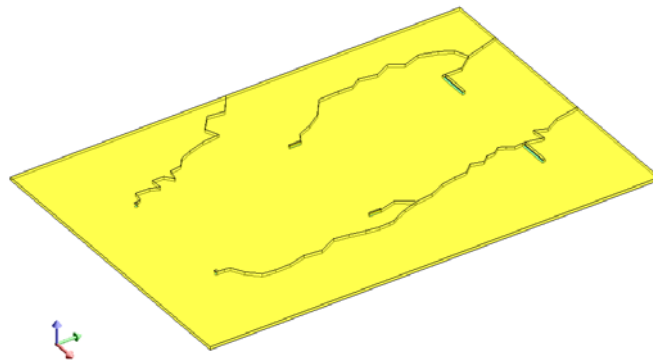


Figure 2 Coupures automatiques en T.

bibliographique fouillée a été réalisée et ces théories ont été analysées et mises en œuvre [4,5]. En particulier l'implantation dans FLUX3d un type d'éléments d'arêtes hiérarchique qui facilite grandement la stratégie « montée en ordre » dans les procédures de maillage auto adaptatif.

#### **Prise en compte de mouvements complexes**

Une méthode de prise en compte de mouvement dite "overlapping" a été étudiée. Cette méthode semble la plus adaptée aux spécificités requises par le CND et par le raffinement de maillage. Un algorithme de reconstruction de maillages a été élaboré et implanté. Ainsi, à partir de deux maillages surfaciques (pour les deux régions en mouvement relatif), projetés l'un sur l'autre, il est possible de recréer un maillage volumique composé de prismes. Dans la zone concernée par la méthode "overlapping", le traitement des fonctions de forme ne se fait pas classiquement, un second algorithme a été proposé et est en cours d'implantation. Ces

travaux nous ont permis de vérifier sur des cas test simples (recollement de maillages non réguliers) que la méthode était viable.

### 3. L'Interface Homme - Machine

Ce travail, a pour objectif de réaliser une interface :

- orientée « métier », c'est-à-dire permettant à des utilisateurs dont le **métier est le CND** de définir un contrôle et de le simuler (avec l'approche semi-analytique développée par le CEA au sein de CIVA, par éléments finis avec le code FLUX développé par CEDRAT ou par couplage des deux méthodes) sans qu'ils aient à être des spécialistes des numériques sous-jacentes.
- permettant d'aiguiller correctement les modèles selon la configuration choisie, c'est-à-dire d'automatiser le choix entre une simulation semi analytique (CIVA seul), une simulation complète par éléments finis (FLUX seul) ou partielle (couplage avec FLUX).
- permettant d'utiliser des outils d'analyse de résultats adaptés aux besoins des utilisateurs.

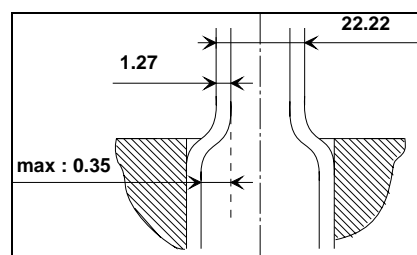
Ce lot a été découpé en sous lots, les travaux effectués dans le cadre de chacun des sous lots sont détaillés ci après :

#### **Physique réaliste du déplacement d'une sonde.**

Les cas CND qui nous intéressent sont des cas complexes dans lesquels la sonde est amenée à avoir un mouvement qui n'est ni *régulier*, ni *linéaire*.

Le cas représentatif considéré dans le cadre de ce projet est celui d'une sonde amenée à contrôler le « dudgeonnage » d'un tube de générateur de vapeur de centrale nucléaire dans la zone de la plaque tubulaire.

Le schéma de cet ensemble mécanique est donné ci après :



Les travaux menés afin d'intégrer ce cas représentatif, et au-delà des cas de mouvements sur surface non régulière, sont les suivants :

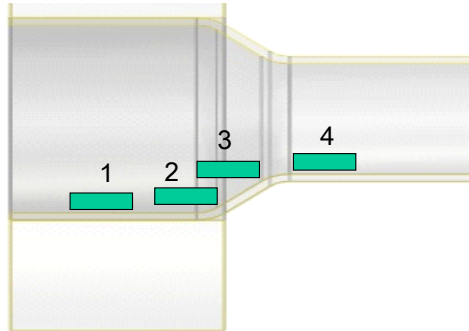
- a) Création de pièce paramétrique de type « dudgeonnage »,
- b) Mouvement des sondes,
- c) Création de nouvelles sondes,
- d) Prise en compte des singularités géométriques.



Pour cela, il est fondamental que le mouvement de la sonde sur la surface irrégulière soit pris en compte de manière réaliste.

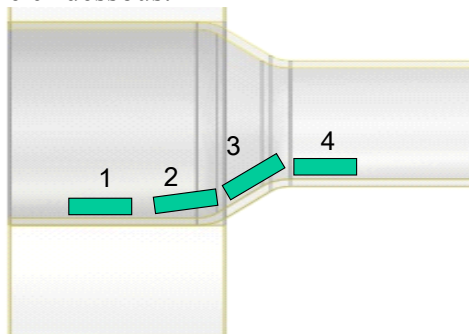
Deux cas peuvent se présenter :

- La sonde demeure horizontale malgré l'irrégularité. Le mouvement n'engendre alors pas de basculement de la sonde et seule son altitude varie au cours du déplacement. Le schéma ci-dessous illustre ce type de mouvement en représentant quatre positions consécutives du capteur.



Ce mouvement existe quand la partie active de la sonde, est enchâssée de telle façon que le seul mouvement autorisé est une translation vers l'extérieur du tube.

- La sonde effectue un mouvement de basculement lorsqu'elle aborde la zone de singularités géométriques. Ce déplacement se traduit à la fois par une variation d'altitude et d'orientation du capteur. Une illustration de ce type de mouvement est présentée sur la figure ci-dessous.



Ce mouvement existe quand deux ressorts sont appliqués à chaque extrémité de la sonde et que l'inclinaison de la partie active est possible.

Le mouvement de la sonde sera donc décrit dans ces deux cas (a minima) par une série de points (position dans le repère pièce) et de vecteurs (orientation de la partie active de la sonde notamment pour le second cas).

En préalable à ces calculs, comme on l'a vu dans la description des mouvements, il convient de tenir compte de l'aspect géométrique de l'ensemble actif en dynamique, et pas seulement des bobines constituant la sonde. La notion de « corps de sonde » (boîtier libre contenant les bobines) est inévitable afin de décrire l'ensemble mécanique complet qui va permettre la définition de la trajectoire à obtenir.

### **Choix automatique de la formulation.**

L'objectif est une intégration « transparente » pour l'utilisateur de l'utilisation des méthodes de calculs par éléments finis réalisés par FLUX dans CIVA.

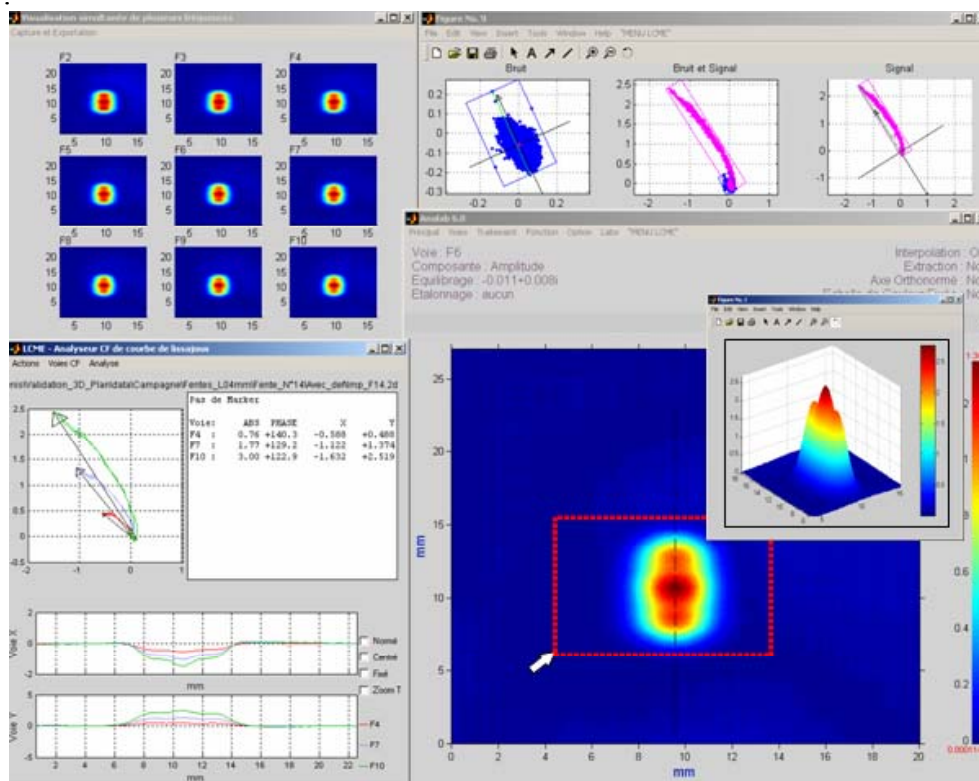
Pour guider les utilisateurs quant au meilleur choix à faire entre un calcul semi-analytique ou par éléments finis, une analyse fine de tous les cas qui peuvent être traités en semi analytique a été faite ; ceci afin d'avoir des temps de calcul le plus court possible. En final, l'utilisateur choisira dans l'interface appropriée le type de calcul souhaité, cette proposition sera initialisée en fonction de l'analyse :

Si, par exemple, CIVA ne peut traiter la configuration, mais que FLUX le peut, le choix « CIVA seul » ne sera pas possible.

Dans d'autres configurations, un calcul hybride FLUX-CIVA sera réalisé : une fois le calcul du champ primaire qui sera réalisé dans FLUX, l'importation automatique de ces données dans CIVA doit être fait afin de déterminer alors l'interaction du champ avec le défaut.

### **Intégration des post traitements métiers.**

La plupart des post traitements usuellement utilisés dans le cas de contrôles par Courants de Foucault ont été intégrés dans CIVA. On peut en voir quelques exemples dans l'image ci-dessous :



Si d'autres traitements sont nécessaires dans le cadre du projet, une fois que les utilisateurs auront pu réaliser des simulations, ils seront intégrés après spécification.

Pour une meilleure efficacité dans l'analyse des données simulées, un lien sera établi entre les curseurs de position de la sonde dans la pièce et les données simulées. La cartographie résultante des simulations sera exportée sur la face de contrôle de la pièce (mapping) et les liens entre curseurs permettront de relier la position de la sonde avec la mesure effectuée.

## **4. QUELQUES RESULTATS**

### **Validation des méthodes**

L'objectif est de pouvoir valider les différents développements réalisés sur des cas tests représentatifs de la réalité et pour lesquels des résultats expérimentaux sont connus.

Le premier cas test est issu des cas test COFREND, Il s'agit d'une plaque en inconel d'épaisseur 1.55mm et comportant 15 entailles de profondeur et de longueur variables

débouchant ou non, ce cas est issu des cas tests de la COFREND [7,8]. La figure 3 montre une illustration des résultats de simulation sur le défaut 40% interne non débouchant. D'autres cas de validation associés aux projets seront présentés.

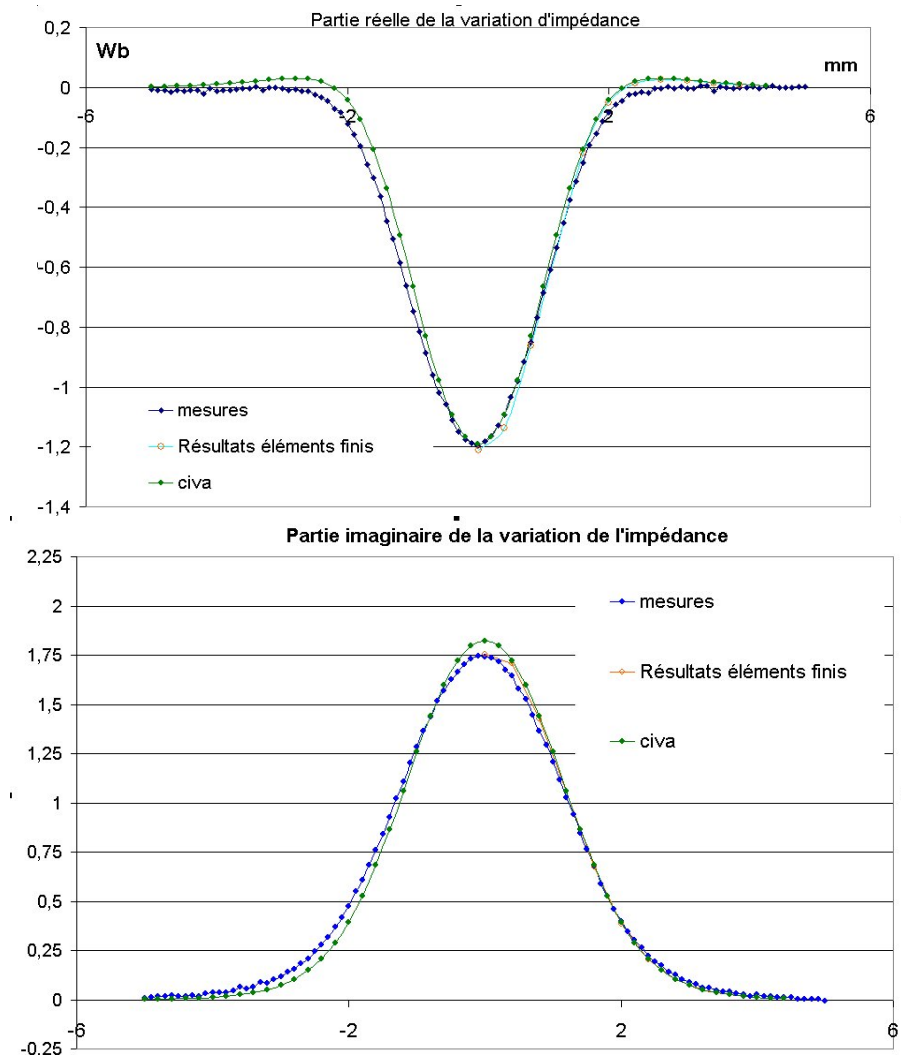


Figure 3 Parties réelle et imaginaire de la variation d'impédance

## CONCLUSION

Le projet PLAYA permettra de disposer d'un outil logiciel disponible sur la plate-forme CIVA, pour l'appui à la qualification technique des méthodes END. Ce projet, d'une durée de trois ans, a démarré début 2006, plusieurs résultats concrets ont déjà permis d'améliorer considérablement la qualité de la solution ainsi que les temps de calculs. Les travaux en cours tenteront encore de réduire ce temps pour permettre d'obtenir un scan par la méthode des éléments finis en moins d'un jour et pour prendre en compte des mouvements complexes dans des géométries tubulaires. Un des objectifs du projet est le couplage FLUX-CIVA qui permettra d'optimiser encore la qualité et le temps de calcul. Les partenaires du projet traiteront de problèmes connexes tels que la prise en compte du basculement de la sonde dans un tube à géométrie complexe.

- [1] HOMARD site internet: <http://www.code-aster.org/outils/homard/>
- [2] Krebs Guillaume, Clenet Stéphane , Abakar Ali , "**Refinement strategy using 3D-FEM in eddy current testing**" Intelligent Computer Techniques In applied Electromagnetics, Studies in computational Intelligence, Vol. 119, à paraître 4-2008;
- [3] Anh-Tuan Phung, Patrice Labie, Olivier Chadebec, Yann Le Floch and Gérard Meunier, "**On the use of Automatic Cuts Algorithm for T-T0- $\phi$  Formulation in Nondestructive Testing by Eddy Current**", Conférence ISEF'2007, Prague, Czech Republic, September 13-15, 2007;
- [4] Cédric DOUCET, Guillaume LACOMBE, Isabelle CHARPENTIER, Jean-Louis COULOMB, Christophe GUERIN, "**High performance 2D finite element modelling of rotating electrical machines**" Communication affichée, XVII International Conference on Electrical Machines (ICEM'2006), Crete Island, Greece, 2-5 September, 2006;
- [5] Cédric DOUCET, Isabelle CHARPENTIER, Jean-Louis COULOMB, Christophe GUERIN, "**An automatic strategy for solving ill-conditioned linear systems of equations resulting from a finite element method**", 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2006), Miami, FL USA, 30 avril – 3 mai 2006, p.354;
- [6] Ali Abakar, Guillaume Krebs, Stéphane Clenet " **Adaptive mesh approach in eddy current non-destructive testing** " soumis à ENDE Séoul, juin 2008 ;
- [7] Michel Mayos, Marc Lambert, " **groupe de travail cofrend sur la simulation des end par courants de foucault - bilan d'activités** " , Journées COFREND, Toulouse, Mai 2008 ;
- [8] <http://www.cofrend.com/>