

# Institut Farman FR 3311 : appel à projets AAP 2015

## Proposition de projet Farman – Volet scientifique

### INVERSYM 2

### Caractérisation de fissures par imagerie courants de Foucault et inversion de données

#### SATIE-CMLA

**Intitulé du projet (acronyme ou autre) :** INVERSYM 2

**Titre explicite :** Caractérisation de fissures par imagerie courants de Foucault et inversion de données

**Version :** Standard

**Responsables scientifiques :**

Eric Vourc'h, SATIE, tel : 01 47 40 55 90, mel : [eric.vourch@satie.ens-cachan.fr](mailto:eric.vourch@satie.ens-cachan.fr)

Mila Nikolova, CMLA, tel : 01 47 40 59 01, mel : [Mila.Nikolova@cmla.ens-cachan.fr](mailto:Mila.Nikolova@cmla.ens-cachan.fr)

**Durée du projet :** 24 mois

**Membres pressentis de l'équipe-projet :**

<i>Nom</i>	<i>Fonction</i>	<i>Laboratoires</i>	
Eric VOURC'H	MCF	SATIE	15% (~3,5 pers.mois)
Mila NIKOLOVA	DR	CMLA	10% (~2.2 pers.mois)
A recruter	1 Stage M2R	CMLA - SATIE	100% (6 pers.mois)

#### Résumé du projet :

Le projet est de reconstruire le profil 3D de fissures présentes dans des structures métalliques à partir d'images synthétiques ou expérimentales correspondant à des mesures par courants de Foucault (CF). La méthode envisagée consiste à inverser les données CF par application d'un modèle direct, implémenté dans un algorithme faisant appel à un critère de comparaison d'images CF (fissures testées / fissure recherchée). Le modèle considéré est semi-analytique, basé sur la méthode des points source distribués (DPSM). Son intérêt est de rendre rapide, autant que précis, le calcul d'images CF. Des méthodes de traitement d'images seront quant à elles considérées afin d'établir des critères de comparaison sensibles aux caractéristiques 3D de fissures, et par suite de permettre de les reconstruire par exploitation du modèle direct. Une comparaison de l'approche proposée à une approche par régularisation pourra également être envisagée.

#### Description scientifique du projet

##### 1. Introduction

Les secteurs industriels soumis à de lourds impératifs de sécurité de fonctionnement (nucléaire, aéronautique et c.) recourent à des techniques d'évaluation non destructive (END) pour s'assurer du bon état de leurs matériels. Parmi les techniques possibles, celles dites à courants de Foucault (CF) sont très répandues en raison de leur facilité de mise en œuvre, de leur faible coût et de leur caractère non polluant (par opposition à la technique « chimique » de ressuage). Elles sont réservées aux pièces électriquement conductrices dans lesquelles elles permettent de détecter la présence d'anomalies (fissures, corrosion...). Les techniques d'END par CF font appel à des systèmes d'émission/réception que l'on vient placer à proximité des structures à examiner et qui réalisent des mesures, éventuellement sous forme

d'images, dont l'analyse doit permettre d'effectuer un diagnostic, c'est à dire de détecter les éventuelles anomalies et de déterminer leur forme et leurs dimensions, et par suite, au besoin, d'effectuer les réparations qu'il convient. On voit que les techniques CF, à l'instar des autres techniques d'END (ultrasons, rayons X...), associent système de mesure et d'instrumentation et méthodes de traitement du signal et de traitement des données (pour le diagnostic...). En d'autres termes elles nécessitent d'associer des compétences pouvant aller du génie électrique aux mathématiques. Le présent projet porte sur la reconstruction de fissures 3D à partir d'images CF obtenues au moyen de systèmes d'instrumentation à *émission globale*. L'approche envisagée consiste à associer une modélisation CF semi-analytique rapide et des méthodes de traitement d'image en s'appuyant sur des compétences développées au SATIE sur les CF d'une part et au CMLA en matière de méthodes numériques et de robustesse d'autre part.

## 2. Evaluation non destructive par la méthode des courants de Foucault

**L'évaluation non-destructive par courants de Foucault** s'appuie sur l'observation des variations du champ magnétique résultant de la circulation des CF induits dans la structure à évaluer par un « capteur » CF, servant à la fois d'émetteur et de récepteur. Dans ce domaine, le laboratoire SATIE s'intéresse depuis plusieurs années à la modélisation des phénomènes physiques mis en jeu [Pla 07], à la mise en œuvre expérimentale de la technique CF [Jou 12], ou encore à la résolution du problème inverse qui consiste à remonter aux propriétés de la structure testée à partir des données fournies par des capteurs CF [Bau 11],[Cun 11]. Le CMLA possède quant à lui une expertise en matière de méthodes numériques et des compétences dont certaines touchent précisément aux applications CF [Nik 95, Nik 98, Nik 2000, Zorh 96] et qu'il est intéressant de conjuguer aux précédentes.

Le problème de l'estimation des paramètres d'une structure inspectée par la technique des CF est non trivial car « mal posé ». En effet, étant donné que la mesure ne peut se faire qu'à la surface de la pièce à évaluer, seul un jeu de données relativement réduit est disponible pour estimer des paramètres relatifs à l'ensemble de son volume. En outre, les phénomènes de diffusion de l'onde dans le milieu et la présence des interfaces capteur / structure (et éventuellement des interfaces entre éléments dans la structure) limitent la sensibilité de la méthode et rendent la modélisation, et *a fortiori* l'inversion du problème physique d'autant plus difficile.

**Les différentes approches pour résoudre ce type de problème** : l'approche classique consiste à mettre en œuvre une technique d'optimisation, dans laquelle un algorithme de minimisation est utilisé pour minimiser une « distance » entre les données CF mesurées et les données calculées à l'aide d'un modèle représentant les interactions capteur / structure à évaluer. Les paramètres de la structure, qui, injectés en entrée du modèle, qui conduisent à la minimisation du critère utilisé, constituent alors l'estimée recherchée. Cette approche est exploitée avec succès dans des domaines tels que l'imagerie radar, sonar ou médicale, ou encore la tomographie X pour l'END. En tomographie X par exemple, il est possible de reconstruire l'objet d'intérêt à partir de la mesure de l'atténuation d'une l'onde ayant traversé l'objet. L'observation faite sous plusieurs angles d'observation permet d'enrichir l'estimation des paramètres recherchés. Dans le domaine des CF, les interactions entre l'onde émise par le capteur CF et la cible observée sont plus complexes, notamment à cause de la diffusion de l'onde dans le milieu et de la présence des interfaces. En outre, la résolution du problème inverse n'est pas triviale, en particulier à cause des lacunes des données [Yus 07], [Pàv 07], d'autant plus qu'en pratique, on ne dispose généralement que d'une seule composante de champ magnétique mesurée. Face à ce problème, différentes approches ont été proposées : des méthodes itératives, combinant la modélisation des interactions structure / capteur CF à une connaissance *a priori*, pour pallier le manque d'information de la mesure [Pré 02], [Baus 11]; des bases de données inverses, pour accélérer les calculs d'inversion [Pàv 07] ou pour ramener le problème inverse à une reconnaissance de classes de solutions [Lin 00], [Smid 05], [Led 09]. Ces méthodes sont toutefois généralement difficiles à mettre en œuvre de manière industrielle, à cause des temps de calcul et du manque de robustesse.

Afin de simplifier la résolution du problème, éventuellement au prix d'un domaine de validité restreint, d'autres approches dites comportementales existent. Elles nécessitent l'élaboration d'un modèle de connaissance « externe » des phénomènes électromagnétiques mis en jeu. Ce modèle est élaboré à partir de données d'apprentissage obtenues par la mise en œuvre d'un capteur CF dans des situations de référence (cibles de propriétés connues). Le modèle élaboré peut alors être mis en œuvre dans des cas inconnus par généralisation. En pratique, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont particulièrement bien adaptés pour mettre en œuvre cette approche [Rek 97, Cun 11]. Toutefois, l'approche comportementale nécessite de disposer d'une base d'apprentissage qui, en pratique, ne s'avère pas nécessairement suffisante pour être facilement généralisée, voire qui n'est pas disponible.

**La voie que nous proposons de suivre ici** consiste à inverser les données CF par application d'un modèle direct, implémenté dans un algorithme faisant appel à un critère de comparaison d'images CF (fissures testées / fissure recherchée). Le principe étant de s'appuyer sur un modèle semi-analytique rapide afin que le temps de calcul reste raisonnable. Une originalité du projet tient au modèle considéré, lequel est basé sur la méthode des points source distribués (DPSM) développé depuis plusieurs années au laboratoire SATIE. Un autre point essentiel sera le développement de critères de comparaison d'images CF sensibles aux caractéristiques 3D de fissures, grâce à l'expertise du CMLA.

Cette approche a pour but d'obtenir des résultats robustes, et ce de manière efficace d'un point de vue calculatoire. Sa confrontation à une approche du problème inverse par régularisation pourra par ailleurs être envisagée.

### 3. Projet et approche scientifique proposés

#### 3.1. Cas étudié

Dans ce projet, nous nous intéressons la reconstruction 3D de fissures dans des assemblages métalliques multicouches. Les fissures considérées pouvant affleurer ou être enfouies. Il s'agit d'en déterminer les position et dimensions. Cette problématique se rencontre dans de nombreuses applications, telles que le contrôle des assemblages en aéronautique [Cun 11] ou encore le diagnostic de vieillissement de composants électroniques à semi-conducteurs en électronique de puissance [Ngu 11].

#### 3.2. Modèle direct

Afin de représenter les phénomènes CF nous exploiterons un modèle semi-analytique original développé au SATIE, dit à sources ponctuelles réparties (DPSM, [Pla 07]). Son principe consiste à modéliser les sources actives présentes dans l'espace de travail à l'aide d'un ensemble discret de sources élémentaires.

La grandeur d'intérêt que l'on cherche à déterminer dans tout l'espace de travail (ici la distribution du champ magnétique en surface d'une *cible*) résulte de la présence de l'ensemble de ces sources actives discrètes, dont le rayonnement s'exprime de manière analytique. La méthode DPSM permet également de prendre en compte des interfaces de géométrie quelconque séparant des milieux de natures différentes, par l'utilisation d'un second jeu de sources discrètes, dites « virtuelles », qui rendent compte des conditions aux limites aux interfaces. La méthode DPSM présente l'avantage d'être générique, versatile, et économe en ressources informatique, dans la mesure où seules les sources actives et virtuelles nécessitent un maillage dans l'espace de travail, contrairement à une méthode numérique à éléments finis par exemple. En outre, elle se prête particulièrement bien à la modélisation de champs magnétiques rayonnés par une circulation de courant [Tho 10].

Différents types de systèmes d'émission CF existent. Nous circonscrivons notre étude à ceux que l'on peut désigner comme à « émission globale », c'est à dire pour lesquels une nappe de CF uniforme circule dans la cible inspectée. C'est une configuration favorable à l'END de fissures, à condition que la nappe de CF vienne en frapper la face la plus importante (un maximum de champ magnétique est alors généré à la verticale de la cible). Du point de vue de la modélisation ce cas de figure (qui reste relativement vaste) est intéressant car il autorise certaines simplifications : les CF, qui circulent autour de la fissure, créent un champ magnétique similaire à celui que créeraient des CF virtuels qui circuleraient dans son volume.

C'est ce modèle semi-analytique simplifié (figure 1) basé sur la méthode DPSM que nous nous proposons d'utiliser en vue de développer une méthode de reconstruction 3D de fissures dont le temps de calcul soit raisonnable.

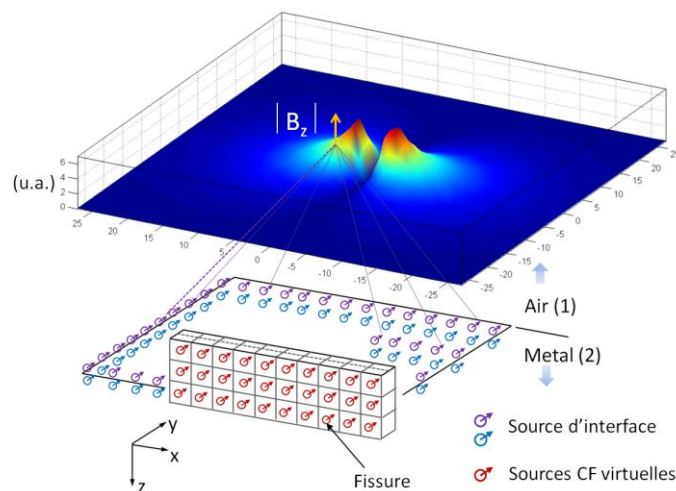
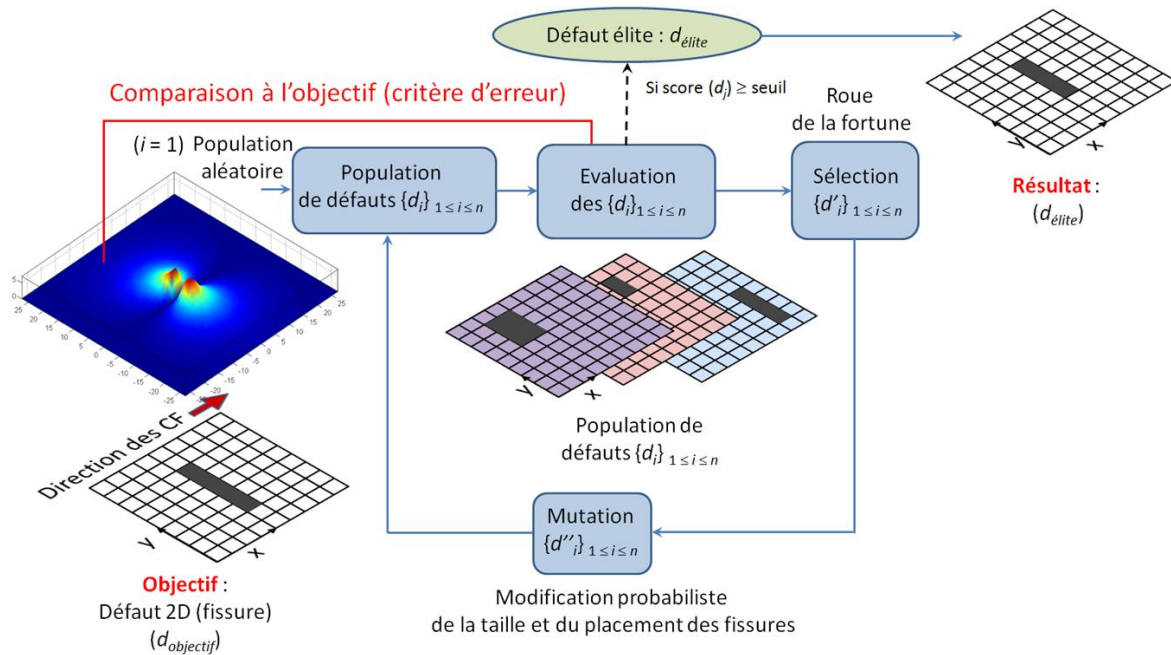


Figure 1 : Simulation par modèle DPSM simplifié de l'image CF d'une fissure dans une plaque métallique.

#### 3.3. Méthode de résolution du problème inverse envisagée et méthodologie

Les méthodes de type Gauss-Newton, éventuellement appliquées dans un cadre régularisé [Bau 11] nécessitant un temps de calcul considérable, nous avons opté pour une approche qui consiste à exploiter un modèle CF direct des interactions capteur/cible. Partant de l'image CF (cartographie de champ magnétique en surface) d'une cible fissurée (objectif), il s'agit d'exploiter le modèle direct pour retrouver la fissure en question (ses position et dimensions).

Lors d'un précédent projet Farman (INVERSYM) nous avons posé les bases d'une telle méthode en considérant uniquement des fissures 2D (rayures). Un algorithme génétique (figure 2) a été développé qui a fait évoluer une population de fissures jusqu'à s'approcher d'une fissure *objectif*. A chaque itération de l'algorithme, les images CF obtenues au moyen du modèle décrit plus haut, sont comparées à celle de la fissure *objectif*. En fonction de leur adéquation avec l'objectif, les individus (fissures de la population) sont sélectionnés ou non et subissent des mutations (variations de position et de dimension des fissures).



**Figure 2 : Illustration du principe de l'inversion de données CF par application d'un modèle direct, implémenté dans un algorithme (exemple d'un algorithme génétique appliqué à la reconstruction de fissures 2D) faisant appel à un critère de comparaison d'images CF.**

Un tel algorithme a permis de converger rapidement vers le bon résultat. Toutefois ses performances (notamment sa rapidité de convergence) se dégradent lorsque le rapport signal sur bruit des images se diminue. Cette étude constitue un premier pas. La pertinence du modèle direct simplifié proposé a été vérifiée et des résultats encourageants en matière de reconstruction de fissures 2D ont été obtenus.

### 3.4 Déroulement du projet :

La méthode reste à développer dans un cadre 3D, à optimiser et à évaluer en termes de robustesse et de temps de calcul. Un point clef de l'approche par modèle direct est la détermination de critères de comparaisons d'images qui soient sensibles aux paramètres recherchés (position et dimensions de fissures).

Etape 1 : le projet passera donc par une étude de sensibilité de critères de comparaison d'images (erreur quadratique moyenne (EQM), EQM pondérée, corrélation, énergie...) vis à vis des paramètres des fissures. Cette étude devra être faite pour différents rapports signal sur bruit (RSB). Elle devra aussi être multifréquence. En effet, la pénétration des CF dans une cible conductrice est sujette à l'effet de peau. Elle dépend de leur fréquence. La mise au point d'un algorithme exploitant des images multifréquence paraît donc pertinente, voire indispensable, pour la reconstruction de fissure 3D compte-tenu du caractère discriminant de la fréquence vis-à-vis d'une caractérisation en profondeur.

Etape 2 : Au vu des résultats de l'étude de sensibilité, des conclusions pourront être tirées quant au type d'algorithme de reconstruction (gradient, algorithme génétique, combinaison de ces méthodes...) exploitant le modèle direct. Par ailleurs il s'agira également de mettre au point l'algorithme de manière à tirer au mieux parti de l'utilisation d'images multifréquence pour la reconstruction de fissures en profondeur.

Etape 3 : Les performances de la ou des solutions algorithmiques proposées devront être caractérisées en termes de précision d'estimation des paramètres des fissures et en termes de robustesse (influence du bruit).

Etape 4 : La conception et la validation d'algorithme(s) (étapes 1 à 3) à partir d'images CF synthétiques pourra être suivie d'une mise en œuvre et d'une validation sur des données expérimentales qui pourront être obtenues sur des maquettes présentant des fissures calibrées.

Par ailleurs, la confrontation des méthodes de reconstruction s'appuyant sur un modèle direct avec des méthodes d'inversion de type Gauss-Newton régularisées [Nik 2000] est un point qui mériterait également d'être investigué. Toutefois c'est un travail dont la réalisation est susceptible de porter le projet au-delà du cadre de deux ans considéré ici.

#### 4. Bibliographie

- [Abs 08] Abascal, J. F. and Lambert, M. and Lesselier, D. and Dorn, O., *3D eddy-current imaging of metal tubes by gradient-based, controlled evolution of level sets*, IEEE Trans. Magn., 2008, 44, 12, 4721-4729, décembre
- [Bau 11] S. Bausson, V. Thomas, P.-Y. Joubert, L. Blanc-Féraud, J. Darbon, G. Aubert, Regularized inversion of a distributed point source model for the reconstruction of defects in eddy currents imaging, COMPEL Vol. 30 No. 6, 2011, pp. 1777-1791.
- [Cun 11] T. L. Cung, P.-Y. Joubert, E. Vourc'h, P. Larzabal, Evaluation of Loose Assemblies Using Multi-frequency Eddy Currents and Neural Networks, JSAEM Studies in Electromagnetics and Mechanics. 14, Applied Electromagnetics and Mechanics, proceedings of 15th ISEM 2011, 7-9 September 2011, Naples, Italy, pp 305-306.
- [Cun 12] Cung T. L., Thèse de doctorat, ENS Cachan, juin 2012, Techniques Courants de Foucault multifréquences pour l'évaluation non destructive en aéronautique.
- [Fel 12] G. Feld, L. Fribourg, D. Labrousse, B. Revol and R. Soulat. « Numerical simulation and physical experimentation of a 5-level and 7-level power converter under a control designed by a formal method » Research Report LSV-12-16, Laboratoire Spécification et Vérification, ENS Cachan, France, July 2012. 18 pages.
- [Jau 01] L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit, E. Walter. E. Applied Interval Analysis. Springer-Verlag (2001).
- [Jou 12] P.-Y. Joubert – E. Vourc'h – V. Thomas, Experimental validation of an eddy current probe dedicated to the multi-frequency imaging of bore holes, Sensors and Actuators A: Physical Volume 185, October 2012, Pages 132–138
- [Led 09] Y. Le Diraison, P.-Y. Joubert, D. Placko. Characterization of subsurface defects in aeronautical riveted lap-joints using multi-frequency eddy current imaging, NDT&E Int 2009;40:133–140.
- [Leb 03] Le Bihan Y.: 'Study on the transformer equivalent circuit of eddy current nondestructive evaluation'. NDT&E International 36 (2003) 297–302.
- [Les 02] Lesselier D, Bowler J, et al. Inverse Problems, 2002;18:1733–963.
- [Lin 00] F. Lingvall and T. Stepinski. Automatic detecting and classifying defects during eddy current inspection of riveted lap joints. NDT&E Int 2000;33(1): 47–55.
- [Moo 66] R.E. Moore. Interval Analysis. Prentice-Hall (1966).
- [Nik 95] Nikolova, Mila. "Parameter selection for a Markovian signal reconstruction with edge detection." Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1995. ICASSP-95., 1995 International Conference on. Vol. 3. IEEE, 1995.
- [Nik 98] Nikolova, Mila. Estimation of binary images by minimizing convex criteria. In : Image Processing, 1998. ICIP 98. Proceedings. 1998 International Conference on. IEEE, 1998. p. 108-112.
- [Nik 2000] Nikolova, Mila. "Thresholding implied by truncated quadratic regularization." Signal Processing, IEEE Transactions on 48.12 (2000): 3437-3450.
- [Ngu 11] N'guyen T.A., P.-Y. Joubert, S. Lefebvre, G. Chaplier, L. Rousseau, Study for the characterisation of ageing power electronics semiconductor components using the eddy current technique. Microelectronics Reliability 51 (2011) 1127–1135.
- [Pav 07] Pavo' J, Gyimothy S. Adaptive inversion database for electromagnetic nondestructive evaluation. NDT & E International 2007;40:192–202.
- [Pla 07] D. Placko, T. Kundu. DPSM for modeling engineering problems. John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2007.
- [Pre 02] D. Prémel and P. Baussard. Eddy current evaluation of 3D flaws in flat conductive materials using a bayesian approach. Inverse Problems, 2002;18:1873–1889.
- [Rek 97] I.T. Renakos, T.P. Theodoulidis, S.M. Panas, T.D. Tsiboukis, Impedance inversion in eddy current testing of layered planar structures via neural networks, NDT&E Int. 30 (1997) 69–74.
- [Pet 10] S.I. Petrova. « Topology Optimization of Eddy Current Systems by Level-Set and Primal-Dual Methods », Proc. Intl. MultiConf. Engineers and Computer Scientists 2010 Vol. 1 (IMECS 2010)
- [San 96] F. Santosa. « A level set approach for inverse problems involving obstacles », Control Optimizat. Calculus Variat 1996;1:17-33.
- [Set 99] J.A. Sethian. « Level Sets Methods and fast marching : evolving interfaces in computational geometry », Cambridge University Press, 1999.
- [Smi 05] R. Smid, A Docekal, M Kreidl. Automated classification of eddy current signatures during manual inspection, NDT&E Int 2005;38:462–470
- [Tho 10] V. Thomas, P.-Y. Joubert, E. Vourc'h, D. Placko, A novel modeling of surface breaking defects for eddy current quantitative imaging, IEEE Sensors Applications Symposium 2010, 23-25 February 2010, Limerick, Ireland.
- [Yus 07] Yusa N, Huang H, Miya K. Numerical evaluation of the ill-posedness of eddy current problems to size real cracks. NDT & E International 2007;40: 185–91.
- [Zorg 96] Zorgati R. and M. Nikolova, "Eddy Current Imaging: An Overview", in Studies in Applied Electromagnetics and Magnetics 9, Non-Destructive Testing of Materials, Kenzomiya et al. eds., IOS Press., 1996, 8 p.

#### Originalité du projet

La méthode des points sources distribués, développée depuis une dizaine d'années au SATIE est une méthode semi-analytique originale qui permet de simuler des problèmes de différentes natures (ultrasons, mécanique des fluides, électromagnétique...) avec un temps de calcul raisonnable (comparé par exemple aux méthodes numériques de type éléments finis). Ceci est également vrai dans le domaine de l'imagerie par courants de Foucault. L'idée originale du projet consiste donc à s'appuyer sur cette méthode (avec du reste une hypothèse simplificatrice décrite plus haut) pour résoudre certains problèmes inverses CF en se servant d'un modèle direct rapide.

### **Valeur ajoutée des différents partenaires à la réalisation du projet**

La conception d'une telle méthode nécessite de s'appuyer sur deux expertises : l'une concerne la modélisation des problèmes CF s'appuyant sur la méthode DPSM, la seconde touche à la conception de méthodes numériques et à leur robustesse (notamment au « scientific computing » et aux propriétés des solutions de problèmes d'optimisation). Ce sont ces deux compétences qui sont réunies par les partenaires du projet appartenant respectivement au SATIE et au CMLA.

### **Publication du publication du projet scientifique sur site web Farman**

Acceptez-vous la publication de ce projet scientifique sur le site web Farman ? O