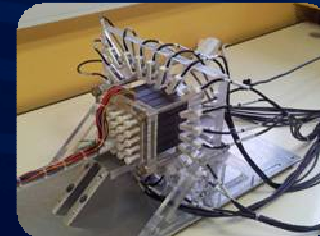
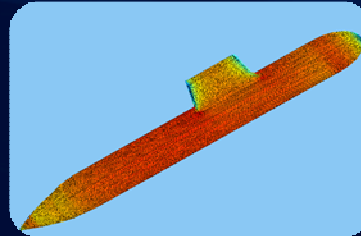
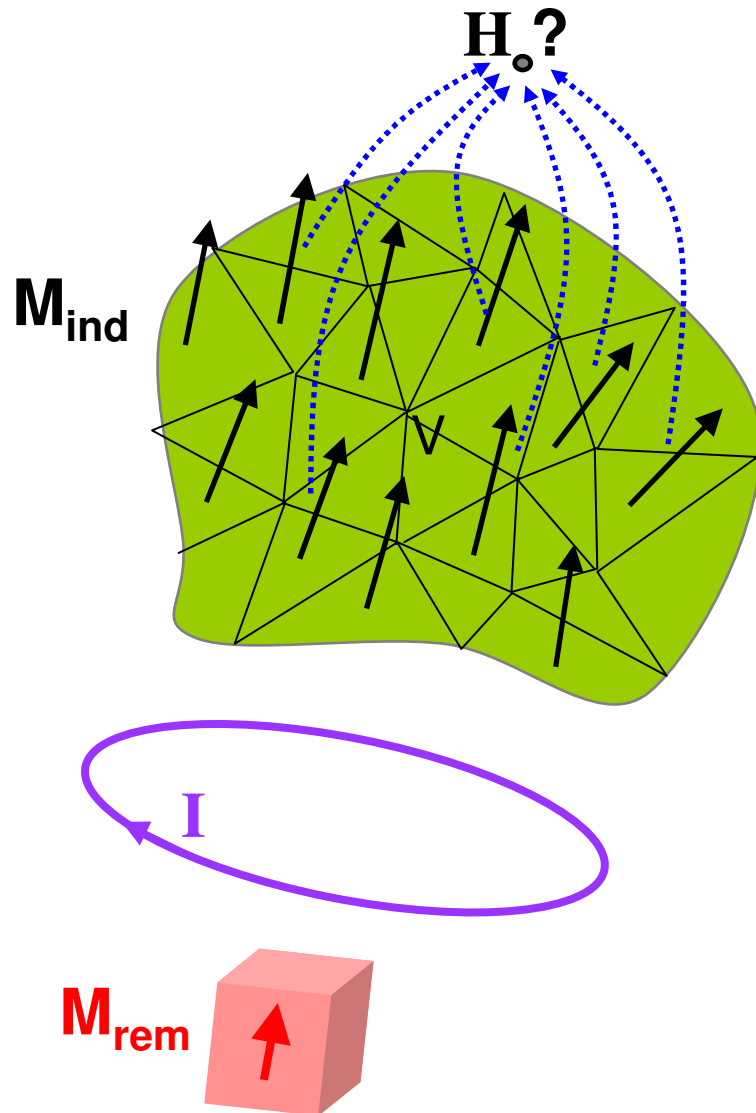


Modélisation électromagnétique basse fréquence, identification de sources équivalentes et métrologie en champs magnétiques faibles

Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université de Grenoble



Olivier CHADEBEC
Chargé de recherche CNRS



■ **Le champ magnétique est la somme**

- du champ créé par les inducteurs
- du champ créé par les aimantations
 - rémanentes (aimants)
 - induites

■ **Equation intégrale du champ**

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 - \frac{1}{4\pi} \nabla \int_V \mathbf{M} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dV$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \left[\mathbf{G} \right] \left[\mathbf{m}_{\text{rem}} \right] + \left[\mathbf{F} \right] \left[\mathbf{m}_{\text{ind}} \right]$$

Introduction

Loi d'aimantation linéaire

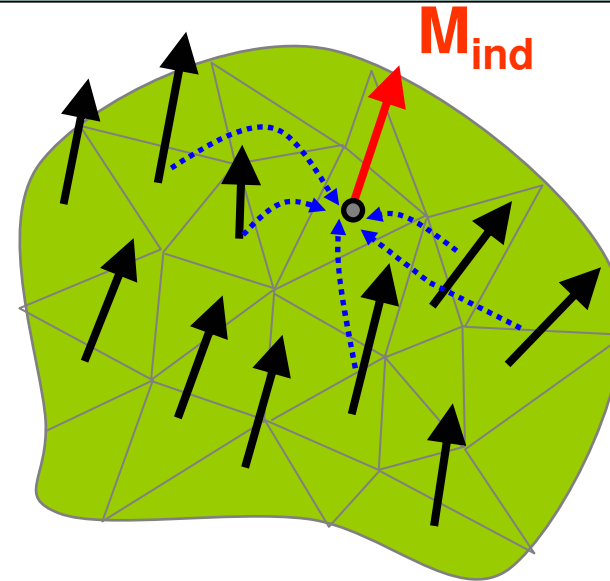
$$\mathbf{M}_{\text{ind}} = (\mu_r - 1) \left(\mathbf{H}_0 - \frac{1}{4\pi} \nabla \int_V \mathbf{M}_{\text{ind}} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dV \right)$$

Approche par collocation

- Ecriture de l'équation au barycentre

Méthode des Moments Magnétiques

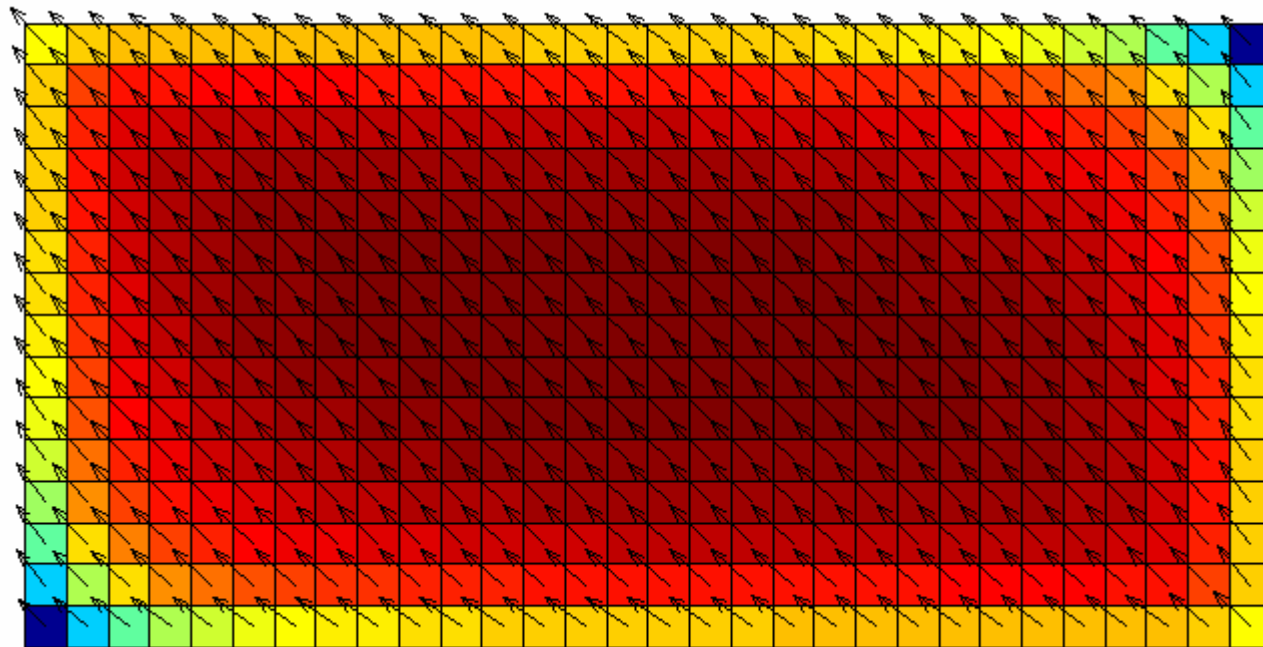
- Méthode intégrale très simple
- Obtention d'un système plein
- Résolution par un solveur direct



$$\left(\begin{array}{c} \text{Matrix with } I_d \text{ on diagonal} \\ - (\mu_r - 1) \mathbf{F} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \mathbf{m}_{\text{ind}} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \mathbf{H}_0 \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \mathbf{H}_{\text{rem}} \end{array} \right)$$

■ Exemple de modélisation «directe» par la MMM

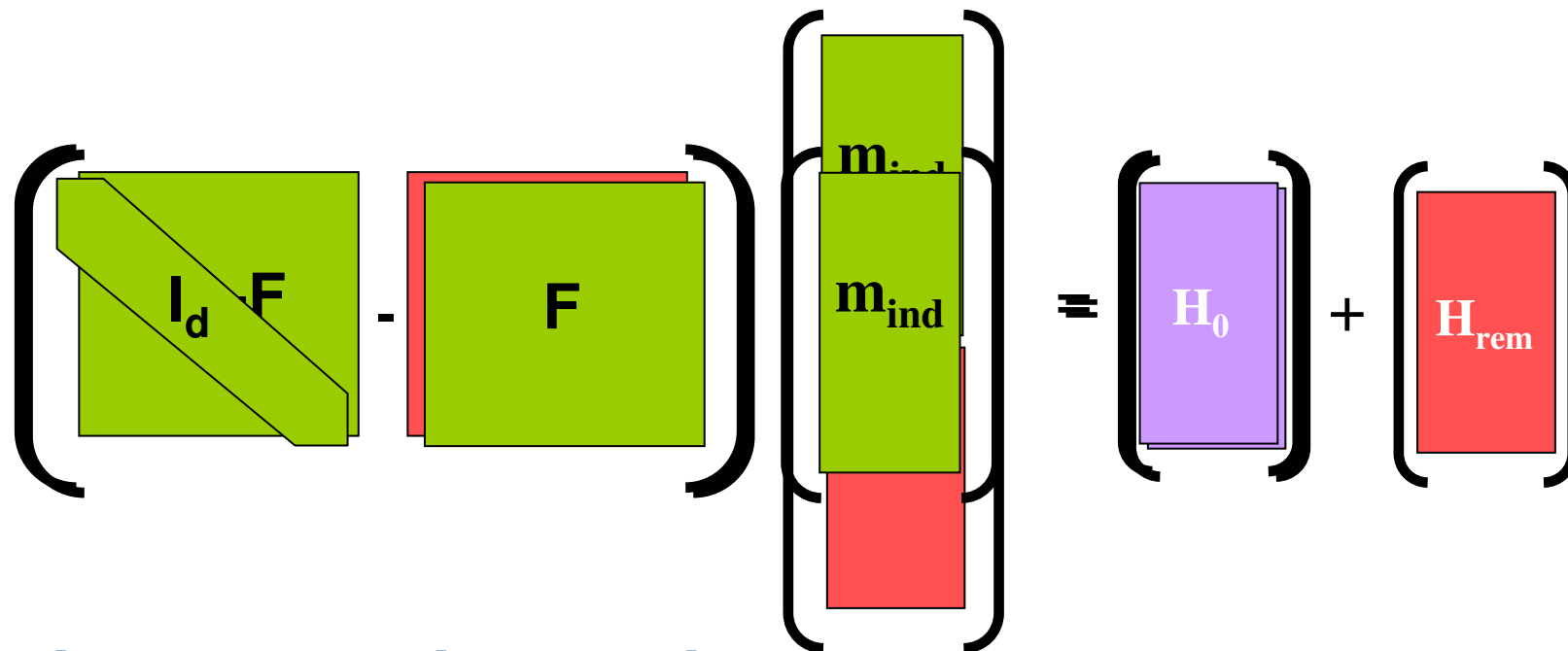
- Plaque dans un champ inducteur homogène
- Modélisation dans le logiciel Locapi



Distribution d'aimantation calculée par résolution du problème direct

■ Le problème inverse magnétostatique

- Les champs inducteurs sont connus
- Les aimantations induites **et rémanentes** sont inconnues

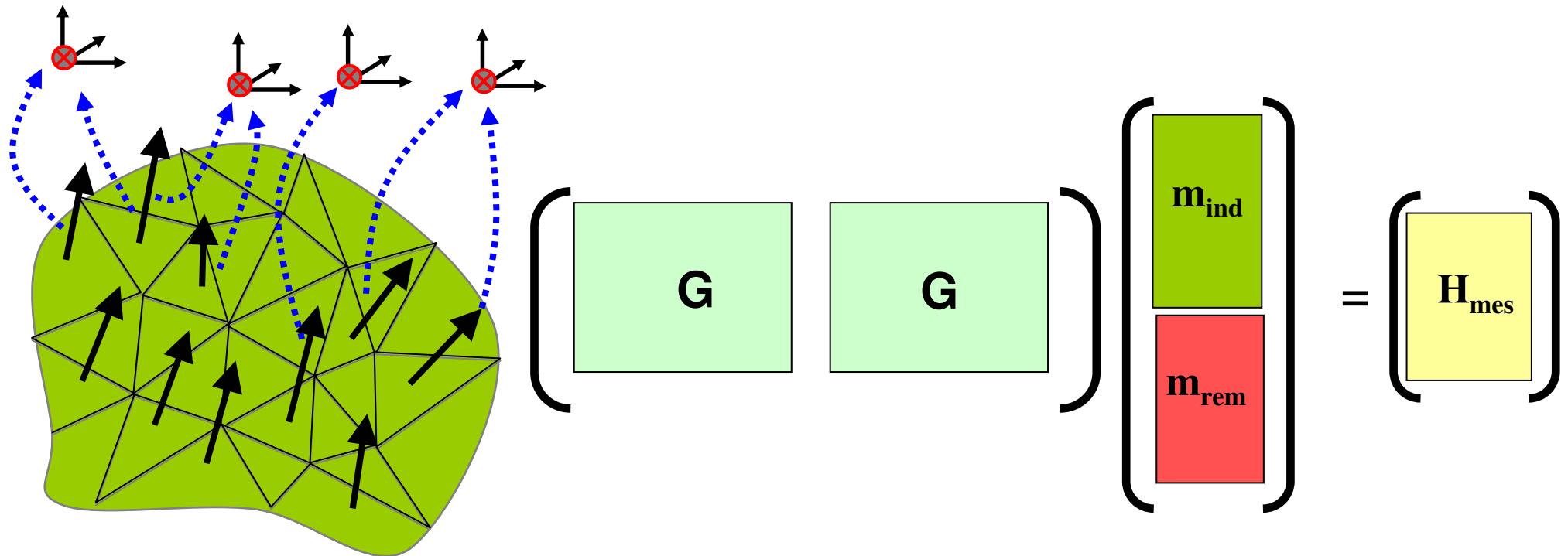


■ Problème sous-déterminé

- N équations pour $2N$ inconnues
- Nécessité de rajouter de l'information

■ Ajout d'information issue de la mesure

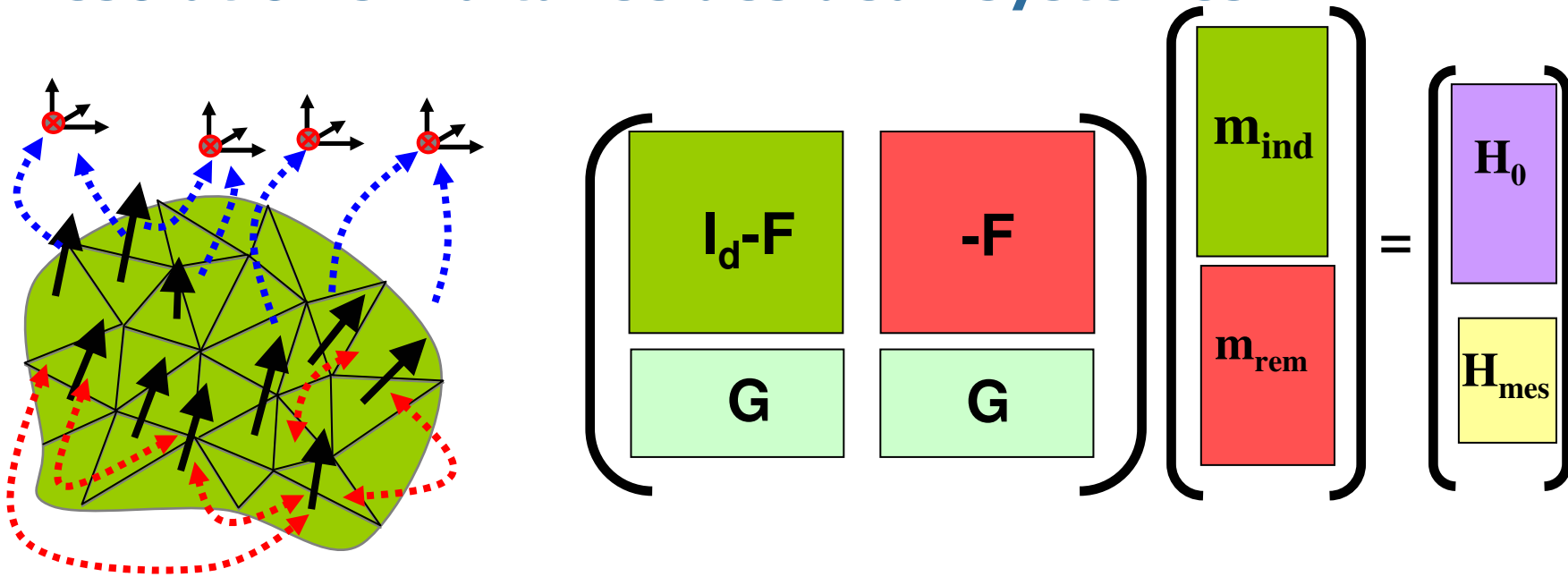
- Placement de capteurs de champ magnétique autour du dispositif



■ Problème mal-posé

- Solution non unique
- Nécessité de régulariser pour trouver la solution "physique"

■ Résolution simultanée des deux systèmes

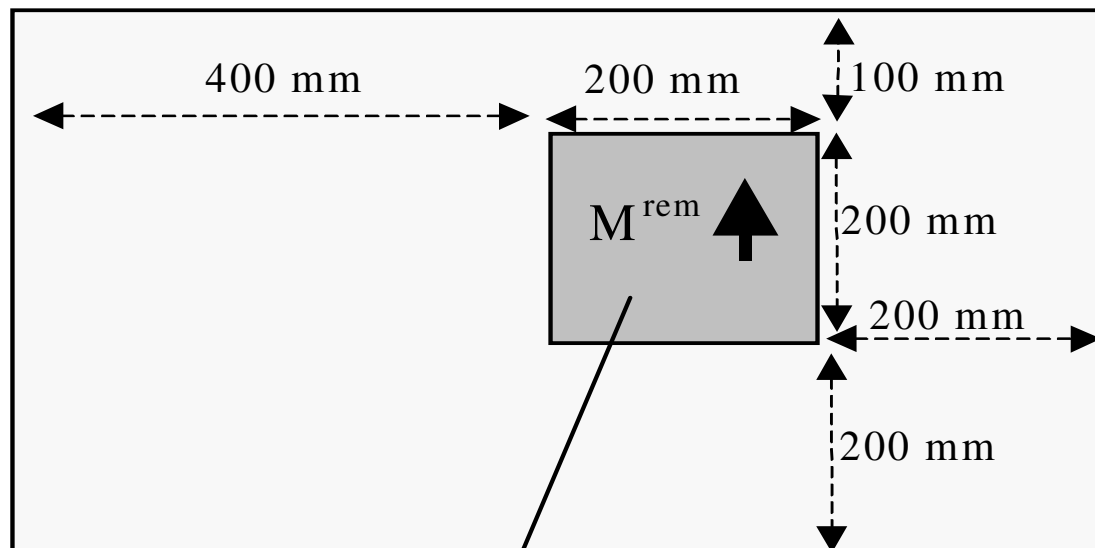


■ Avantages

- Limitation de l'espace de recherche de la solution
 - Peu (ou moins) de capteurs nécessaires
 - Peu (ou pas) de régularisation nécessaire
- Amélioration de la qualité de la solution

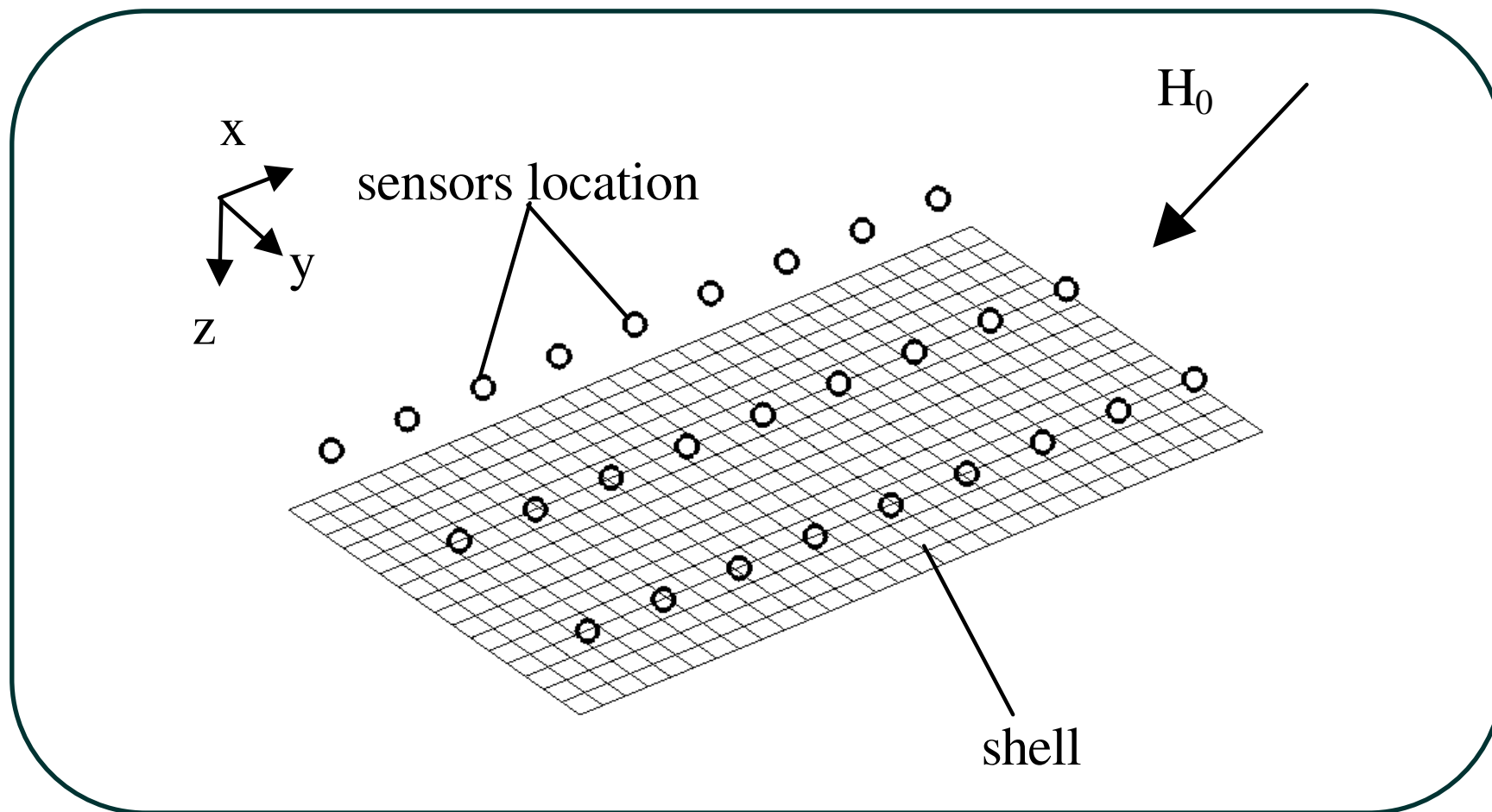
■ Identification de l'aimantation rémanente d'une tôle

- Désaimantation préalable
- Création d'une anomalie magnétique locale forte

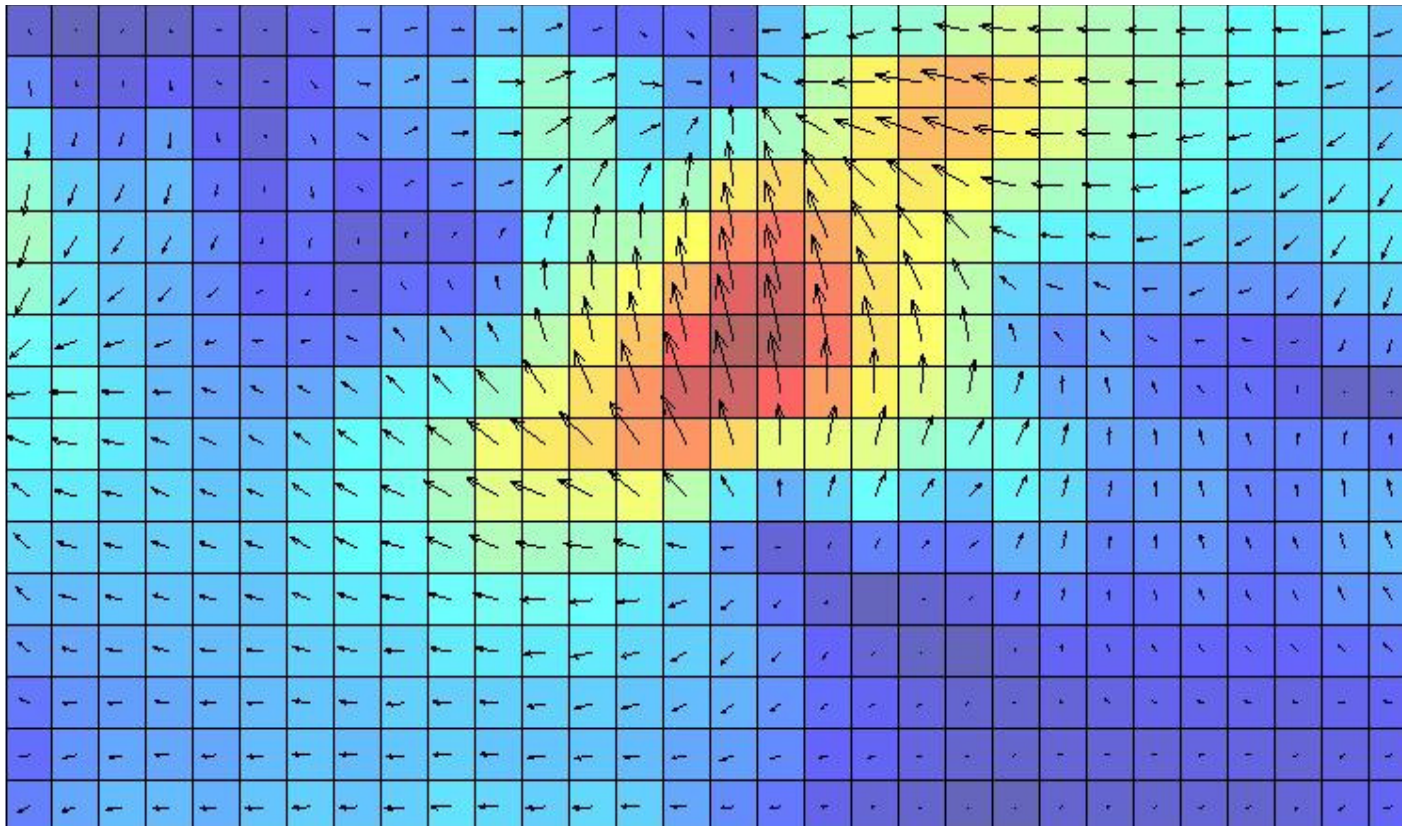


Area where the magnet
has been moved at the
proximity of the shell

Introduction



Introduction



Distribution d'aimantation reconstruite par résolution du problème inverse

0 - Introduction

1 - Identifications de sources électromagnétiques pour le magnétisme du navire

2 - Caractérisation de dispositifs par mesure du champ magnétique externe

3 - Perspectives pour la modélisation directe des dispositifs électromagnétiques

4 - Conclusions

0 - Introduction

1 - Identifications de sources électromagnétiques pour le magnétisme du navire

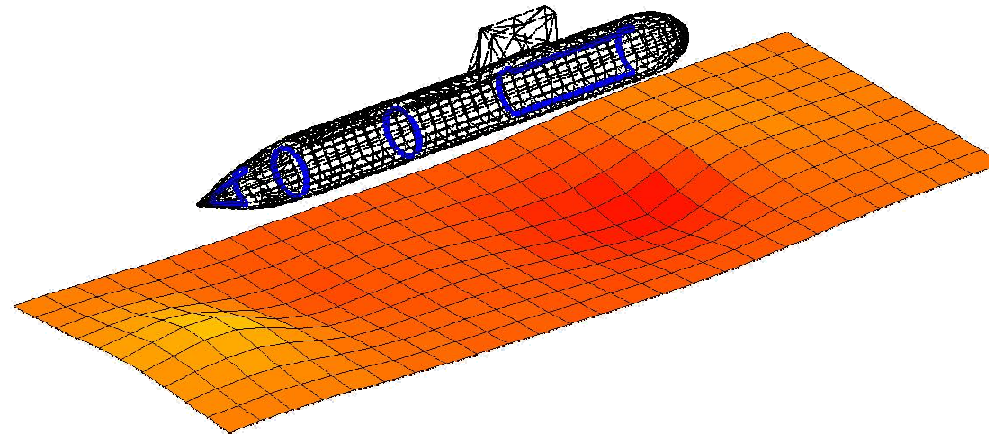
2 - Caractérisation de dispositifs par mesure du champ magnétique externe

3 - Perspectives pour la modélisation directe des dispositifs électromagnétiques

4 - Conclusions

Le risque magnétique

- **Coques formées de matériaux ferromagnétiques aimantés**
 - Champ terrestre et contraintes mécaniques (pression,...)
- **Création d'une anomalie locale du champ magnétique terrestre**
 - Localisation (MAD) ou destruction (torpilles, mines)
- **Réduction de l'anomalie par un champ opposé créé par des boucles de courant**



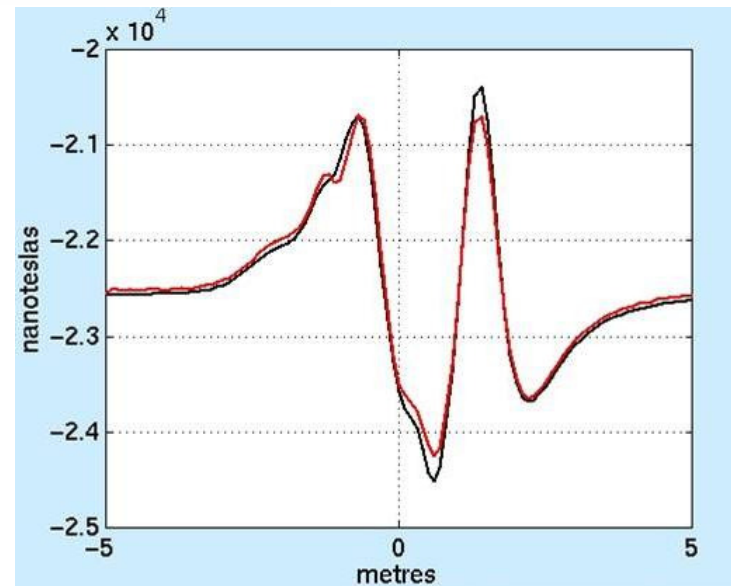
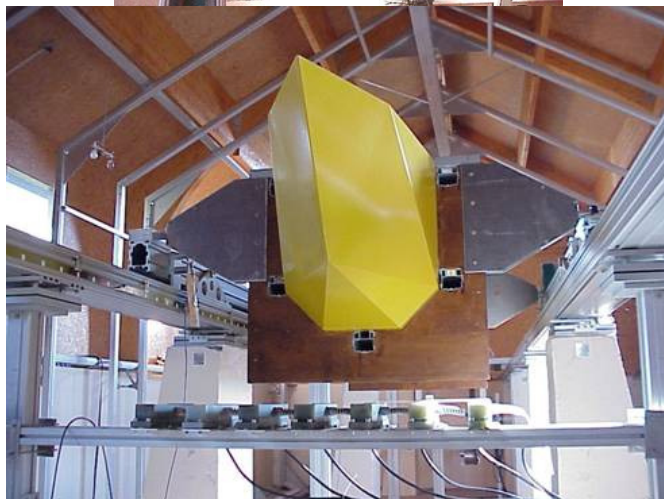
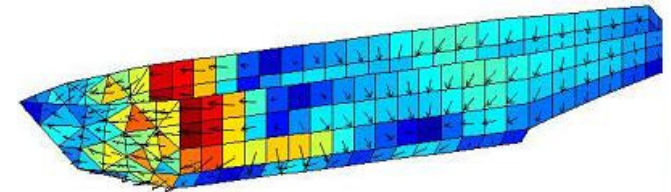
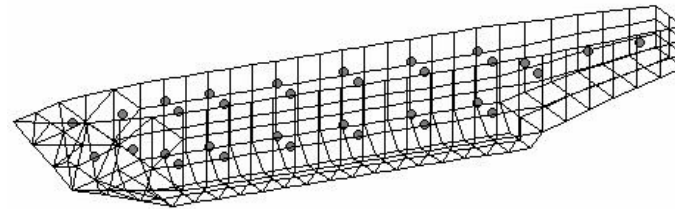
- **Immunisation en Boucle Fermée (IBF)**
 - Projet majeur de l'équipe ERT « champ magnétique faible » du G2ELab
 - Système de capteurs de champ magnétique pour déterminer le champ externe (signature) à partir de mesures magnétiques internes

Première maquette IBF



Thèse O. Chadebec (2001) - Collaboration DGA/GESMA

- Maquette très simple, 4m, 32 capteurs tri-axes



— Champ prédit par problème inverse sous quille

— Champ mesuré sur le capteur sous quille

O. CHADEBEC J-L. COULOMB, L-L. ROUVE, J-P. BONGIRAUD, G. CAUFFET, P. LE THIEC, "Recent improvements for solving inverse magnetostatic problem applied to thin shell", IEEE transactions on magnetics, **38**, 2 (2002), 1005-1008

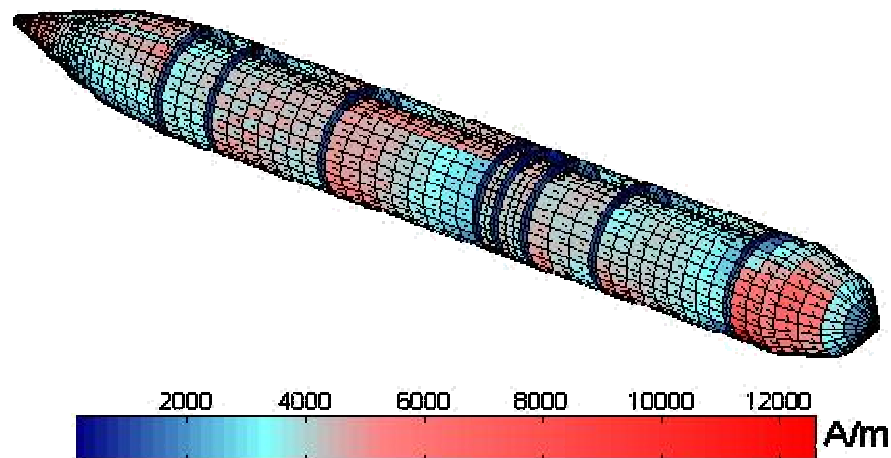
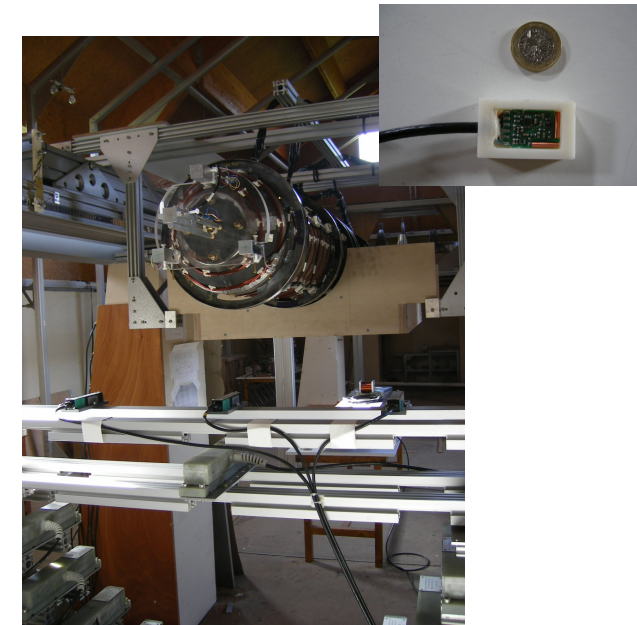
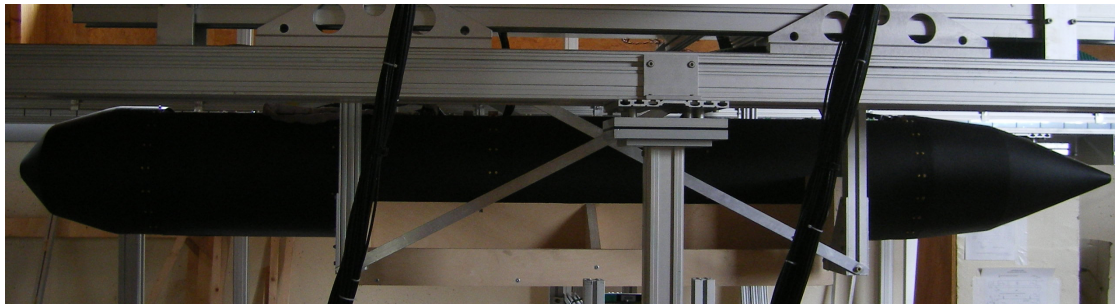
Deuxième maquette IBF

DCNS

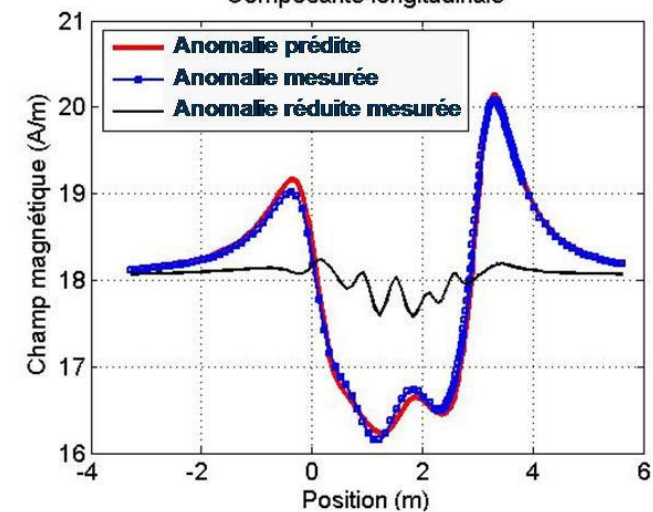
G2E Lab
Grenoble Génie Electrique
Grenoble Electrical Engineering

Thèse Y.Vuillermet (2008) - collaboration DCNS

- Maquette de 6m de long, double coque, 80 capteurs fluxgate, 165 voies d'acquisition, capteur sur collés à la tôle



Composante longitudinale

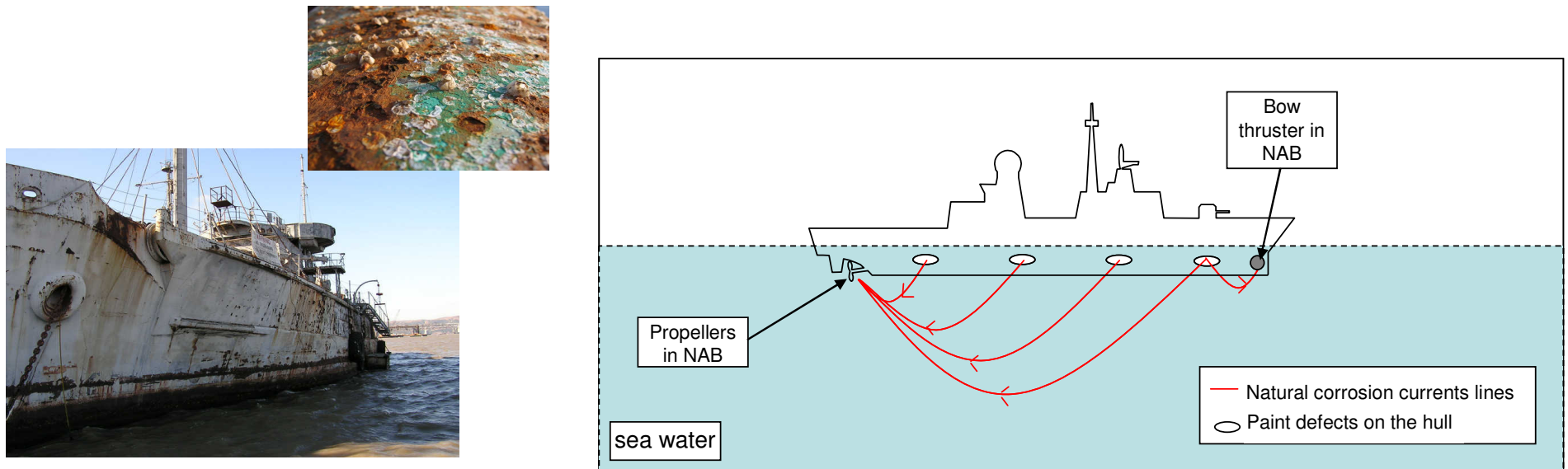


L. DEMILIER, Y. VUILLERMET, O. CHADEBEC, J-L COULOMB, L-L. ROUVE, G. CAUFFET,
"Procédé amélioré de détermination de l'aimantation de la coque d'un navire et dispositif associé,
Déposants : DCNS, Année : 2010, Numéros de publication : WO2011083279

Diagnostic de coque par mesure du champ électrique (1/3)



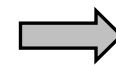
- Thèse A. Guibert (2009) / collaboration DGA
- Modélisation des signatures électromagnétiques créées par les courants de corrosion
 - Utilisation de formulations du type « intégrale »



Mesure de potentiels dans l'eau de mer



Distributions locales de courants sur la coque

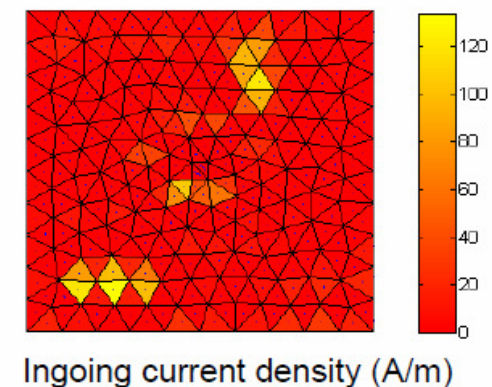
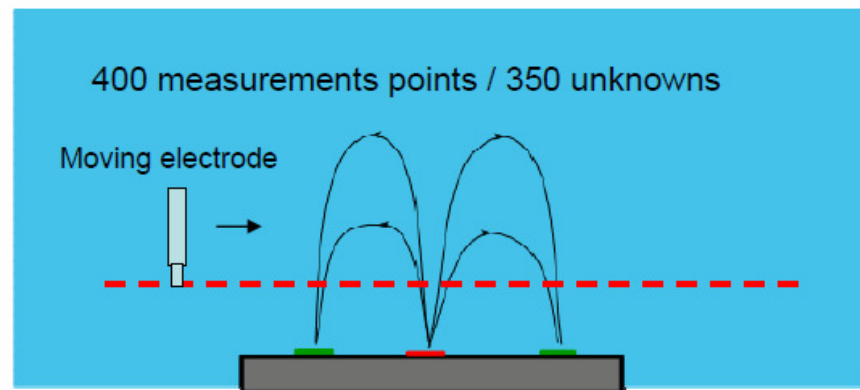
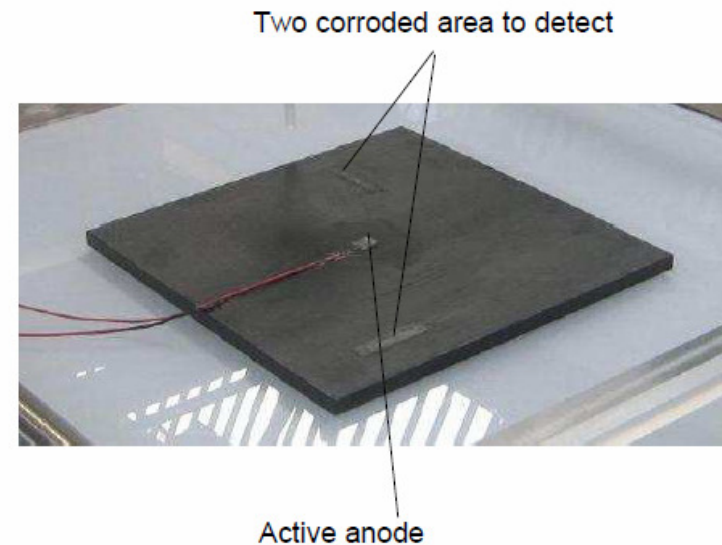
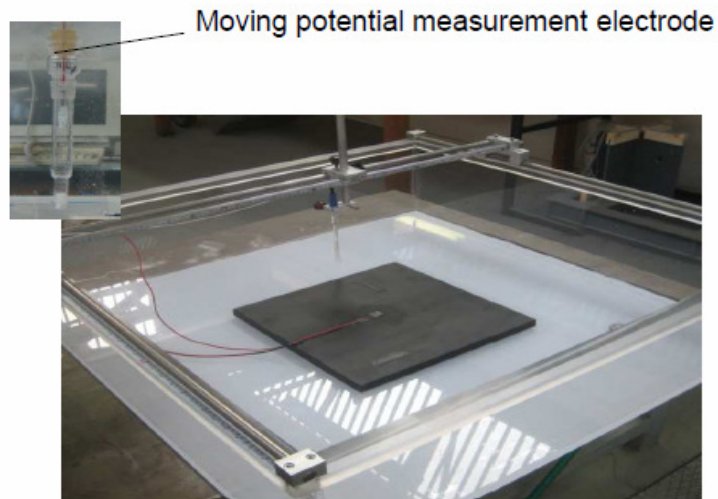


Diagnostic des régions corrodées

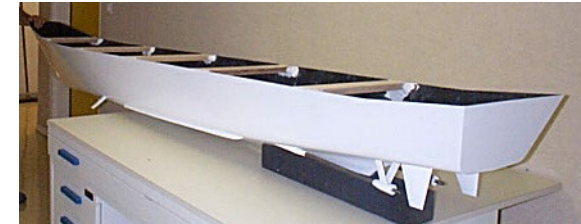
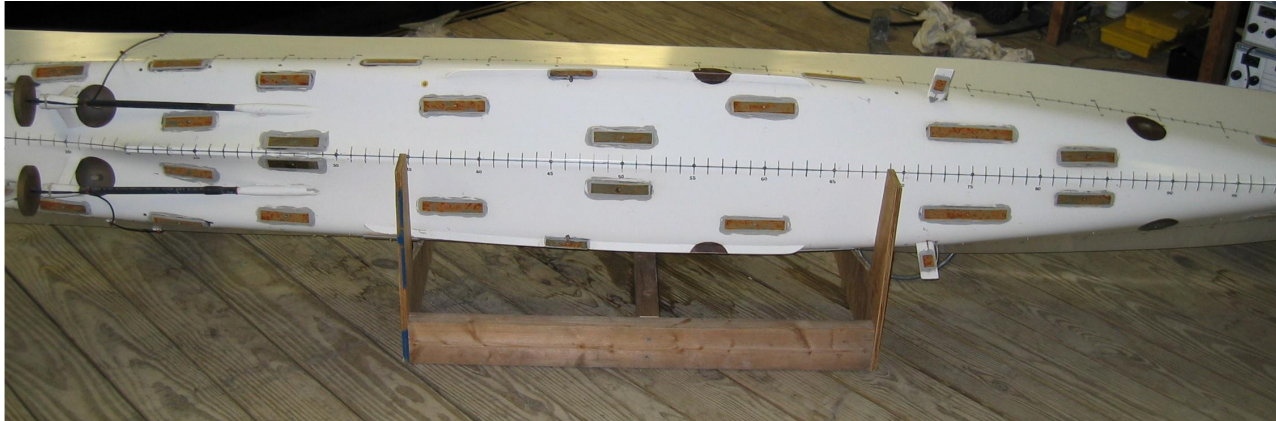
Diagnostic de coque par mesure du champ électrique (2/3)



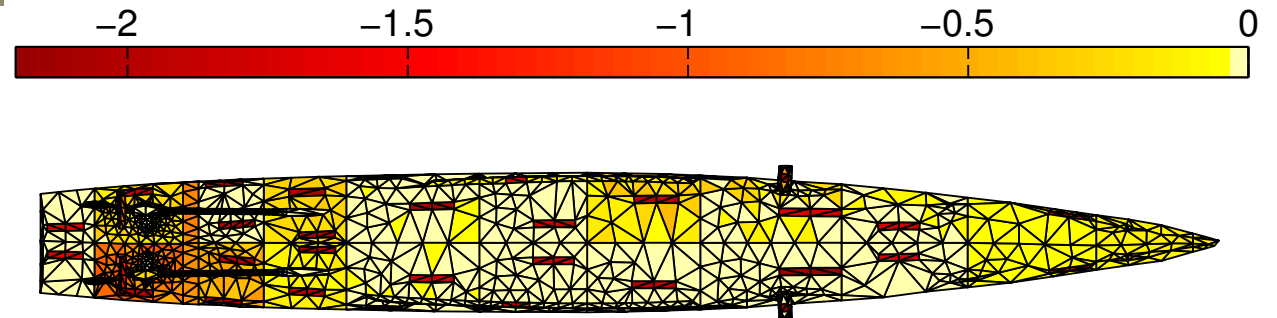
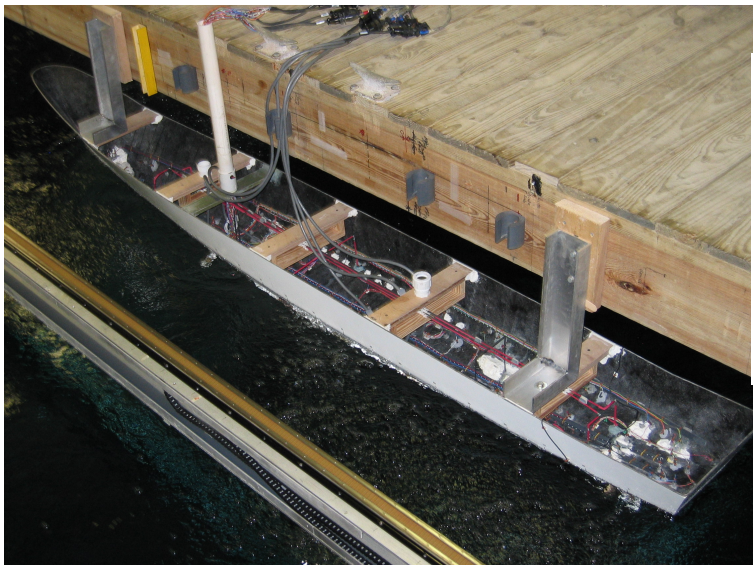
Collaboration LEPMI



Diagnostic de coque par mesure du champ électrique (3/3)



- 6 disques noirs (anodes), 26 rectangles rouillés (cathodes), 1 zone isolante blanche (epoxy)
- Instrumentation au Naval Research Laboratory (US Navy)



A. GUIBERT, O. CHADEBEC, J.-L. COULOMB, C. RANNOU, R. P. NOGUEIRA, "Ships hull corrosion diagnosis from close measurements of electric potential in the water", Eur. Phys. J. Appl. Phys. **52**, 2 (2010).

Les activités de l'ERT CMF



■ Un savoir-faire unique dans un domaine très pointu et original

- Référence internationale dans le domaine

■ Large multidisciplinarité des recherches

- Modélisation électromagnétique basse fréquence
 - Travaux de l'équipe Mage sur la modélisation des dispositifs du génie électrique
 - Logiciel Flux
 - Travaux sur des problématiques plus « originales » pour le génie électrique
 - Modélisation des champs rayonnés
- Métrologie magnétique faible
 - Un outil unique en Europe : le LMMCF d'Herbeys
 - Très bonne connaissance des capteurs de champ magnétique
 - Technologie Fluxgate : basse fréquence / haute précision / coûts décroissants
- Fortes synergies entre deux disciplines
 - Approche à la fois physique, mathématiques appliquées et métrologique

■ Généralisation de ces méthodes à des problématiques dépassant le cadre «confidentiel» du magnétisme du navire

- Enjeu de mon recrutement au CNRS en 2003

0 - Introduction

1 - Identifications de sources électromagnétiques pour le magnétisme du navire

2 - Caractérisation de dispositifs par mesure du champ magnétique externe

3 - Perspectives pour la modélisation directe des dispositifs électromagnétiques

4 - Conclusions

- **Tout système électromagnétique rayonne du champ magnétique**
 - Ce champ dépend des sources internes du système
- **Ces sources ne sont pas toujours bien maîtrisées**
 - Géométries trop complexes
 - Lois de matériaux mal identifiées
 - Fonctionnement avec défauts
- **Pourquoi vouloir identifier un modèle équivalent de ces sources ?**
 - Le modèle peut permettre l'extrapolation
 - Le champ magnétique rayonné peut être une nuisance
 - CEM, normes sanitaires, discrétion électromagnétique,...
 - L'analyse des sources peut être un outil de caractérisation et de diagnostic des systèmes
 - Le champ magnétique est très proche de la physique du système
 - Potentialités
 - Mesures non invasives
 - Peu permettre la localisation du défaut

■ Métrologiques

- Champs faibles et basses fréquences
 - Quelques milliers de nanotesla dans la gamme DC-500Hz
 - Utilisation de capteur « originaux » pour notre communauté
 - » Fluxgates tri-axes, bobines intégratrices,...
- Champs perturbés
 - Nécessité d'isoler le signal « utile »

■ Numériques

- Le calcul direct du champ rayonné est un problème difficile
 - Trois dimensions
 - lourdeur des modélisations
 - Le champ est faible
 - bruit de maillage, soustractions de grands nombres...
- Le problème inverse est mal posé
 - La solution n'est pas unique
 - Nécessité mettre en œuvre des techniques de régularisation

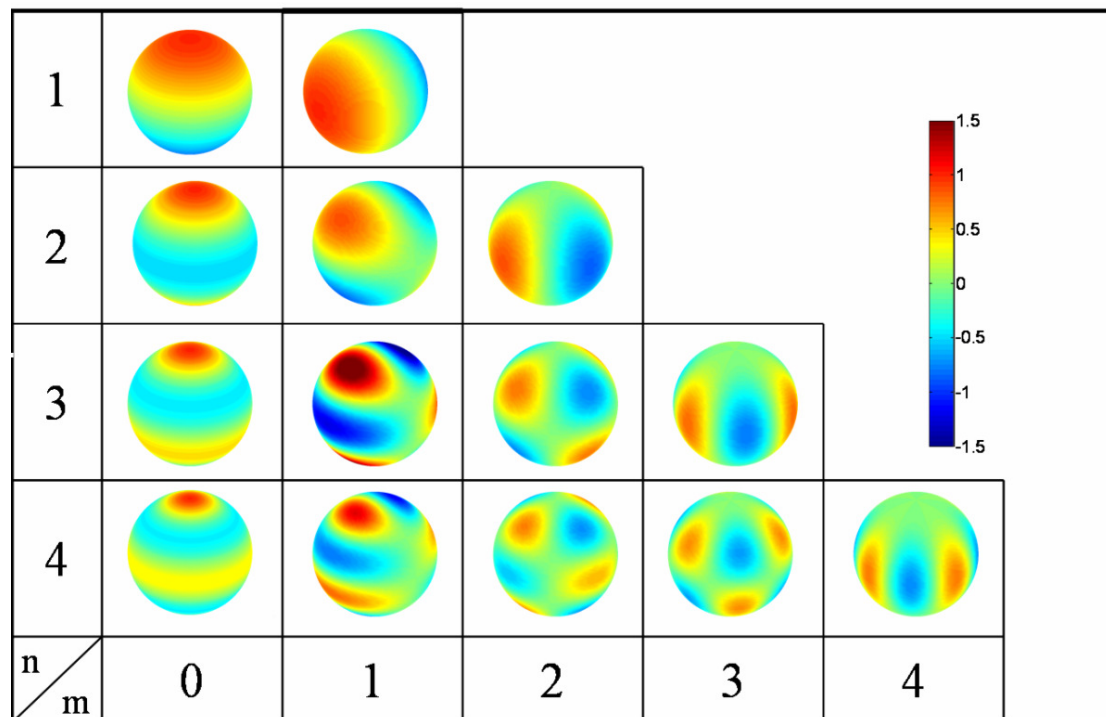
Modèle rayonné de convertisseurs (1/2)

- **Thèse B. Vincent (2009), collaboration Ampere / Université de São Paulo / projet O2M**
- **Objectif**
 - Développer un dispositif expérimental de mesure CEM en champ proche pour l'extrapolation
- **Utilisation d'un modèle hamoniques sphériques**

$$B(r, \theta, \varphi, f) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=-n}^{+n} A_{nm}(f) \cdot \nabla \frac{1}{r^{n+1}} \cdot S_{nm}(\theta, \varphi)$$

$A_{nm}(f)$ $\nabla \frac{1}{r^{n+1}}$ $S_{nm}(\theta, \varphi)$

?



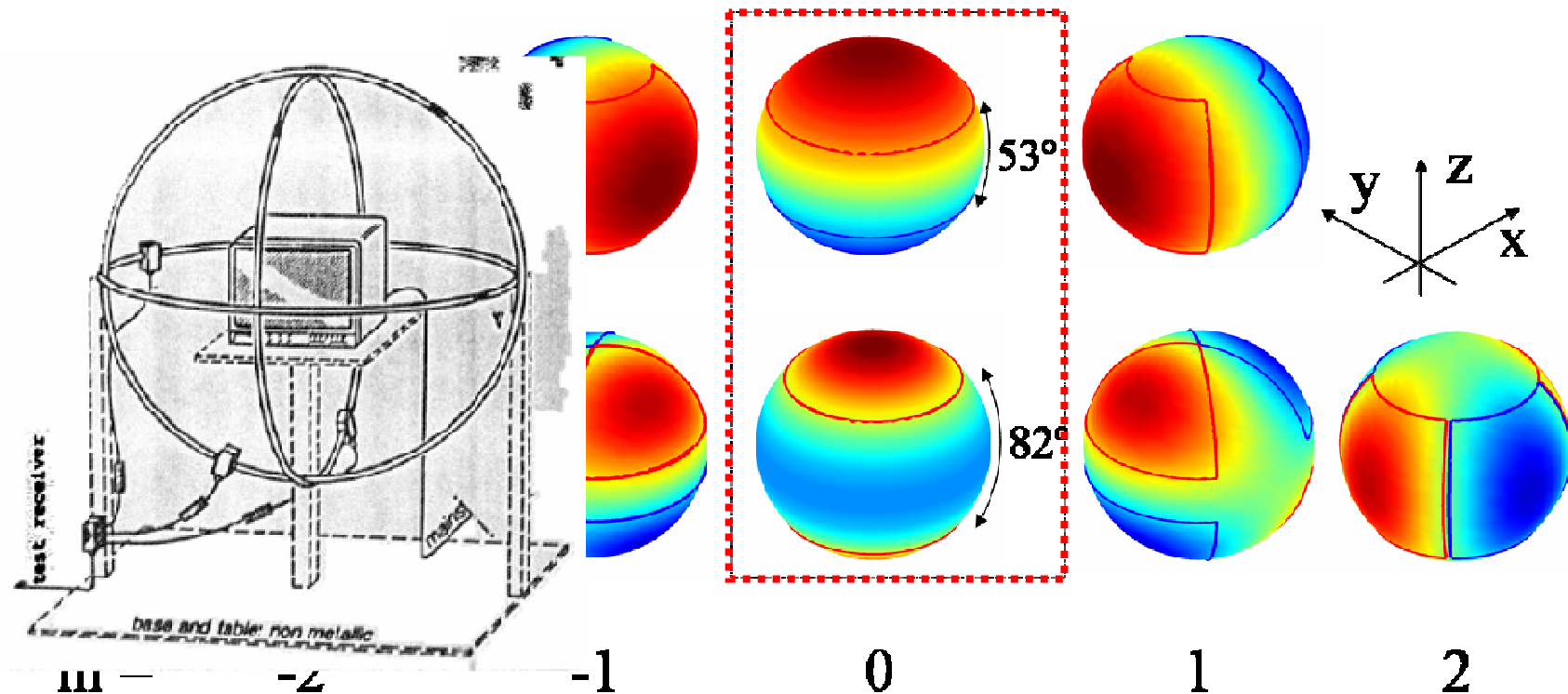
Modèle rayonné de convertisseurs (2/2)

■ Approche classique

- Utilisation d'un grand nombre de mesures ponctuelles

■ Originalité

- Capteurs de type boucle mesurant chaque composante harmonique
- Permet d'identifier les ordres $n=1$ (dipôles) et $n=2$ (quadripôles) tout en étant insensibles aux ordres $n=3$ et $n=4$

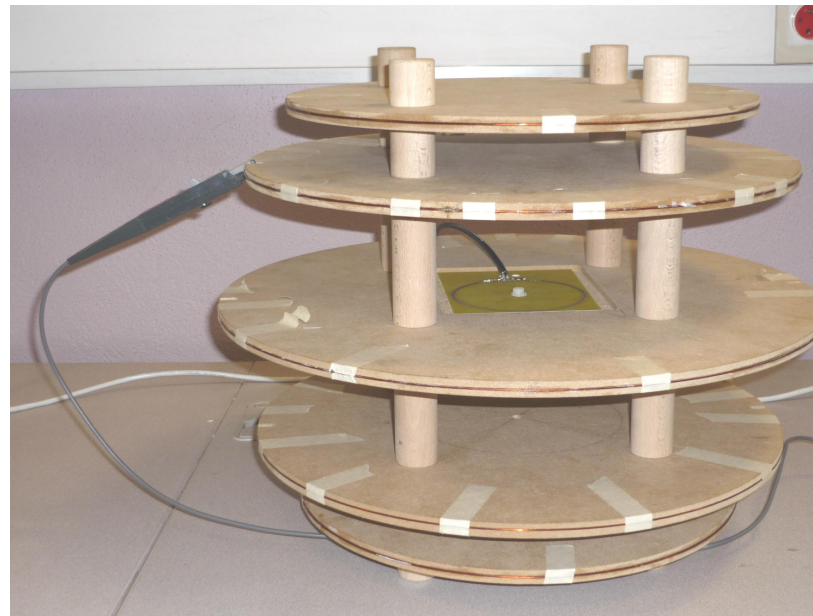


■ Approche classique

- Utilisation d'un grand nombre de mesures ponctuelles

■ Originalité

- Capteurs de type boucle mesurant chaque composante harmonique
- Permet d'identifier les ordres $n=1$ (dipoles) et $n=2$ (quadripoles) tout en étant insensibles aux ordres $n=3$ et $n=4$



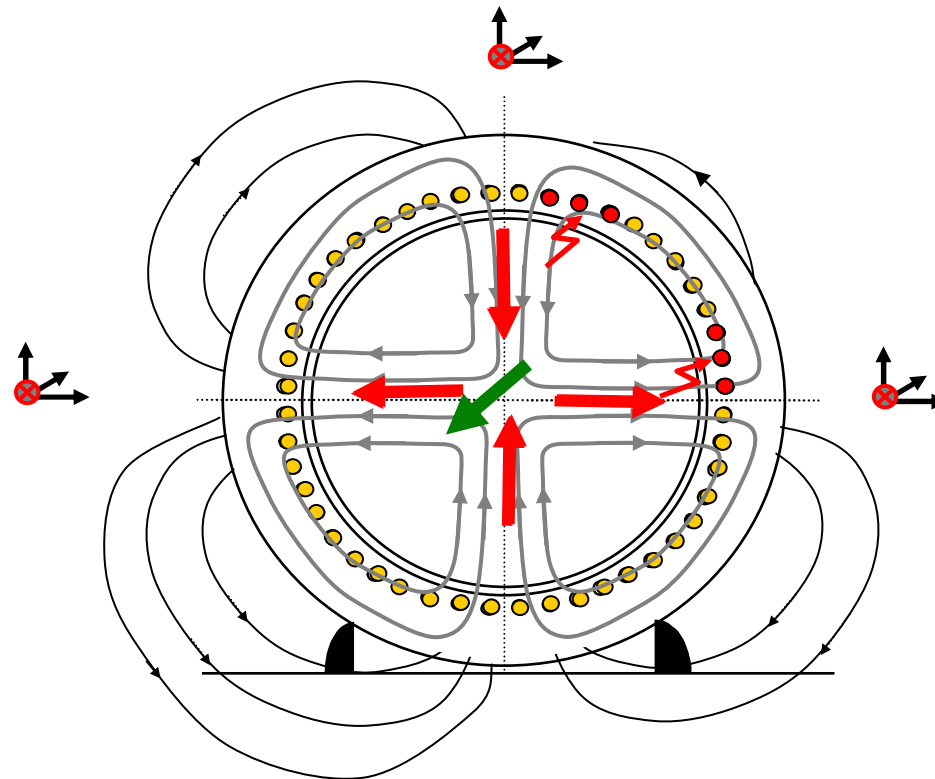
B. VINCENT, O. CHADEBEC, J.-L. SCHANEN, K. BERGER, R. PERRUSSEL, L. KRÄHENBÜHL, "Identification of equivalent multipolar electromagnetic sources by spatial filtering", IEEE transactions on magnetics **46**, 8 (2010), 2815-2818

Diagnostic de défauts des alternateurs par mesure du champ externe

■ Thèse V. P. Bui (2007)

■ Objectif

- Diagnostic de défauts de machines synchrones par mesure du champ de fuite



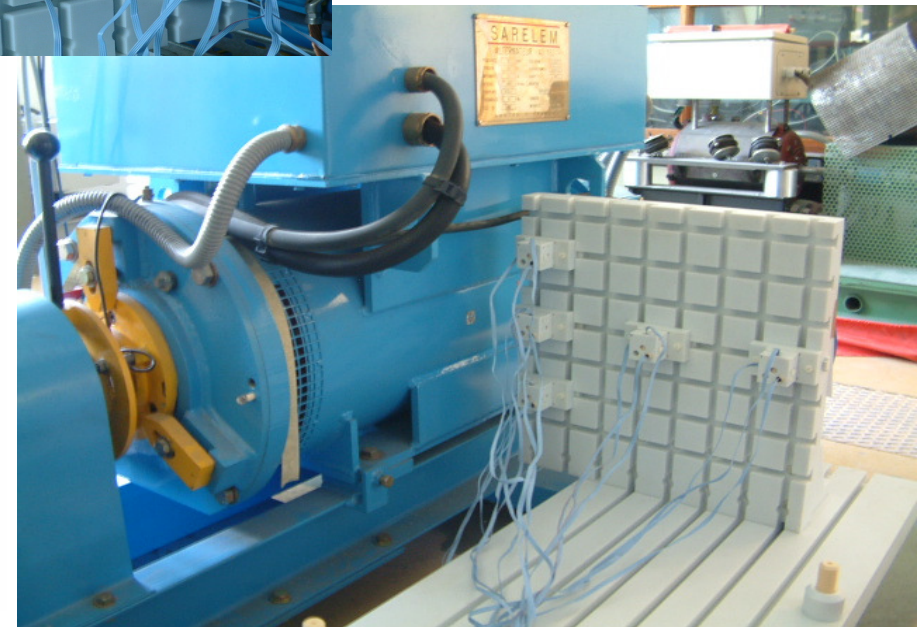
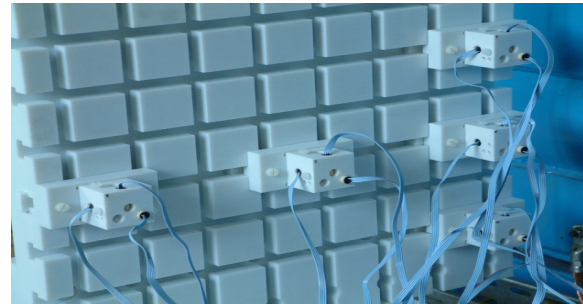
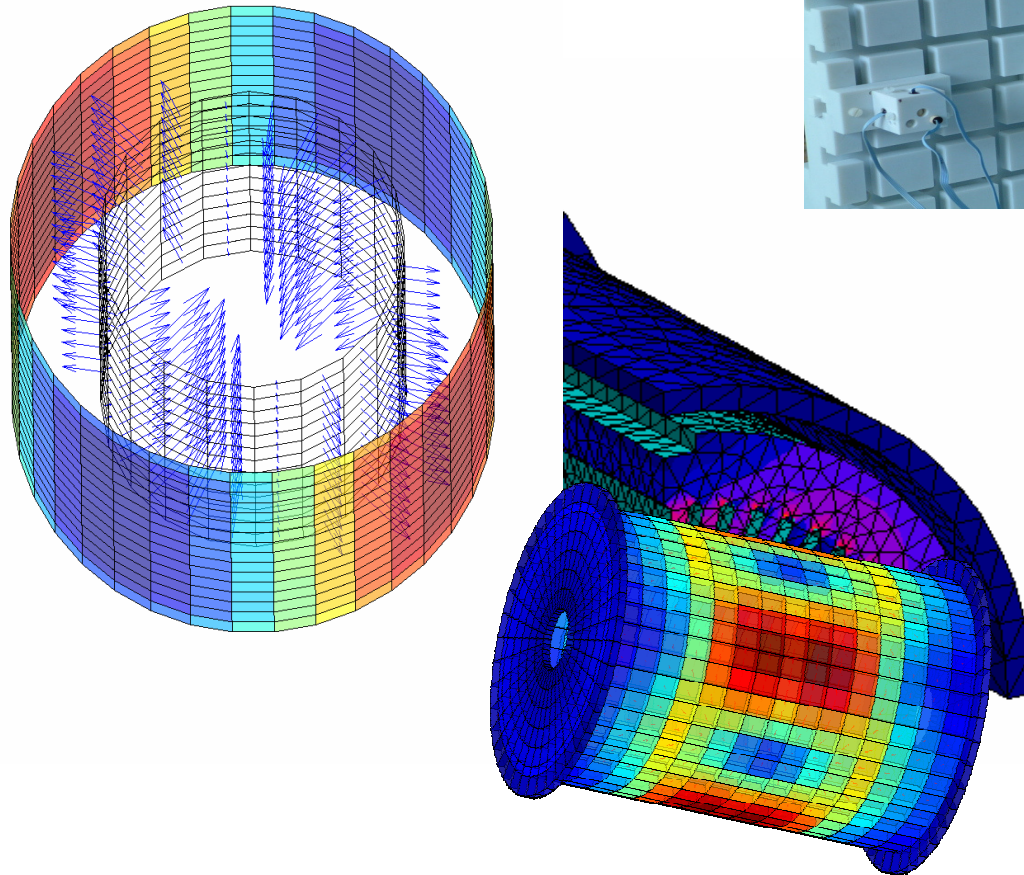
■ Originalité

- Les capteurs doivent pas nécessairement être collés à la machine
- Utilisation de capteurs Fluxgate "basse fréquence"
 - Ces composantes sont moins atténuées par la carcasse

Diagnostic de défauts des alternateurs par mesure du champ externe

■ Originalité

- Inversion d'un modèle "intégral" très léger
 - Permet de retrouver à partir du champ externe une image de la répartition de champ dans l'entrefer



Identification des flux rémanent dans les transformateurs



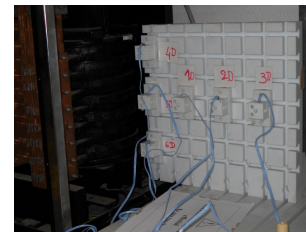
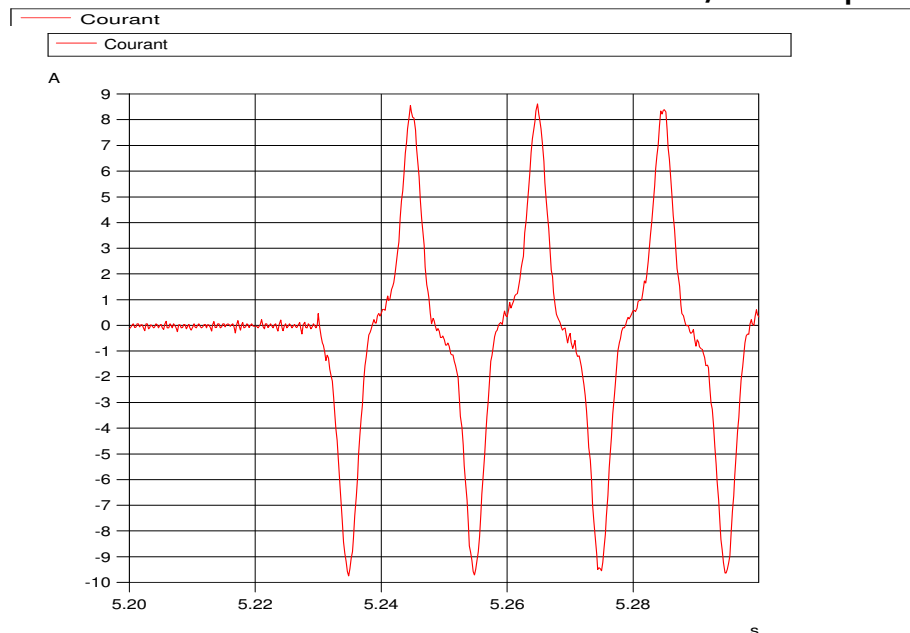
■ **Thèse de D. Cavallera (2011), Collaboration EDF**

■ **Objectif**

- Identification des flux rémanents dans les transformateurs pour optimiser les instants d'enclenchement et limiter les surintensités

■ **Originalité**

- Utilisation de capteurs du type Fluxgate (mesure du champ statique)
- Calibration de la relation Flux/champ externe grâce au phénomène d'hystérésis



B. CAILLAUT, F. ZGAINSKI, D. CAVALERA, O. CHADEBEC, J-L. COULOMB, "Procédé et système de contrôle de l'instant de mise sous tension d'un dispositif comprenant un circuit magnétique", Déposant : EDF / Grenoble INP / CNRS, Année : 2011, Demande de dépôt du 16/05/2011 – No d'enregistrement FR 11 54212

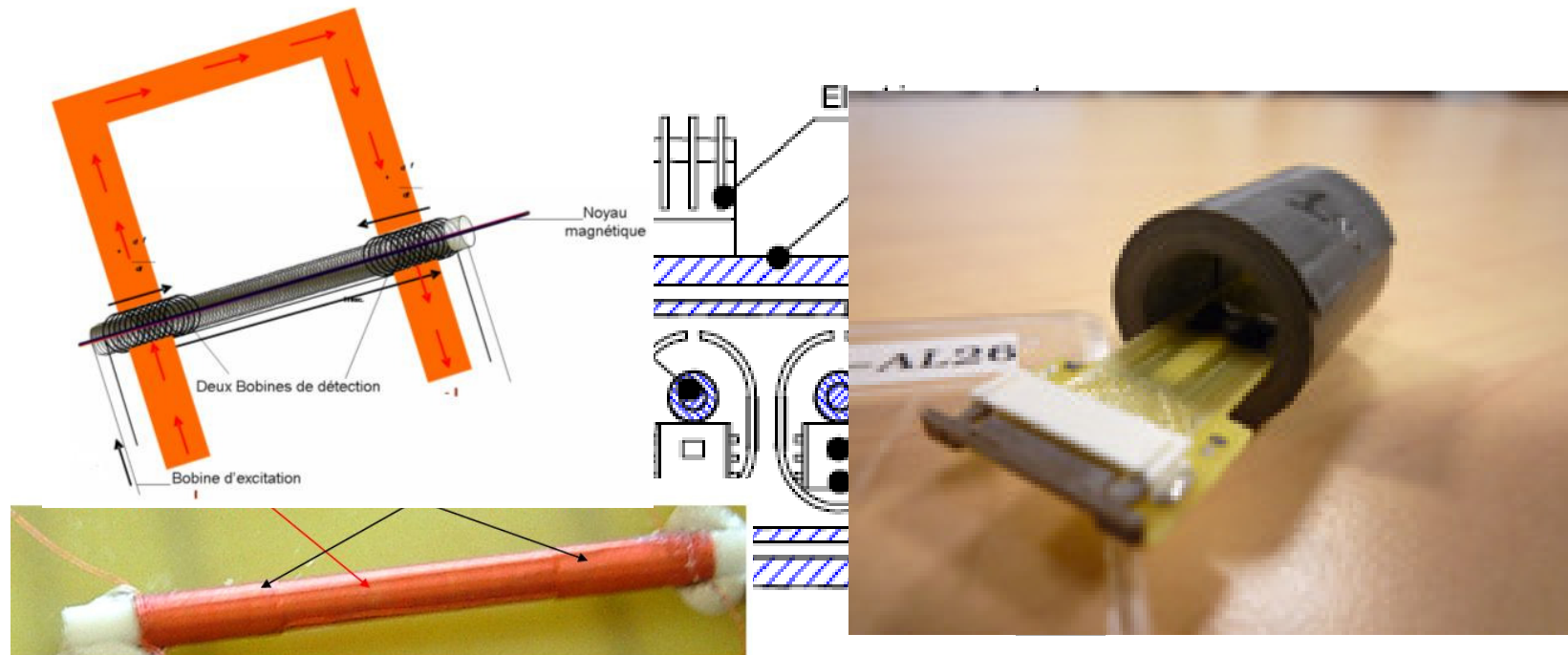
■ Thèse A. Msaed (2009), collaboration Schneider Electric/CEA Leti, projet Minalogic

■ Objectif

- Développer un capteur de courant intégré basé sur la mesure de champ magnétique

■ Originalité

- basé sur une mesure différentielle
- Meilleure réjection des perturbations électromagnétiques extérieures et meilleure linéarité



A MSAED, J. DELAMARE, O. CHADEBEC, P. LE THIEC, R. CUCHET, A. WALTHER, "Capteurs de courant et procédé de fabrication de ces capteurs", Déposants : CEA / Grenoble INP / CNRS, Année : 2009, Numéros de publication : FR09 51371

Reconstruction de courant dans les stacks

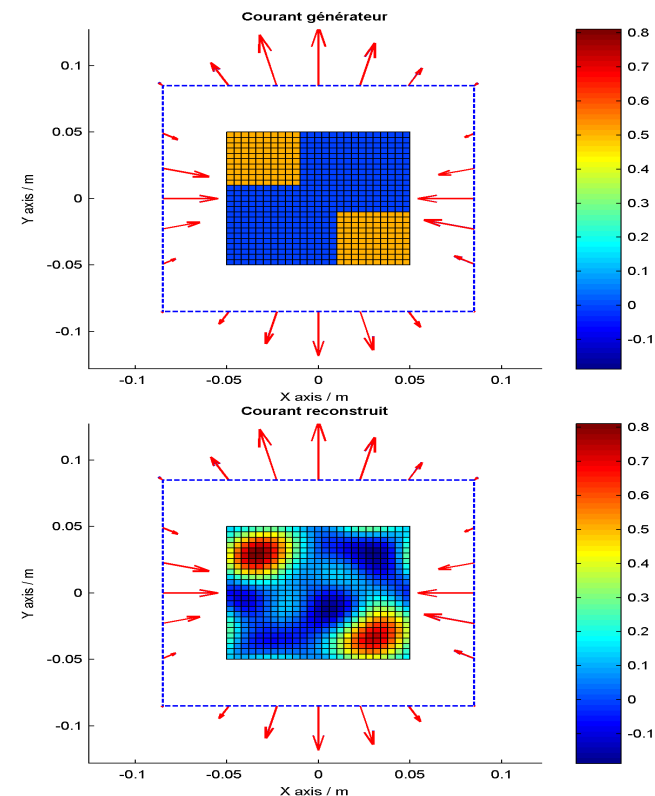
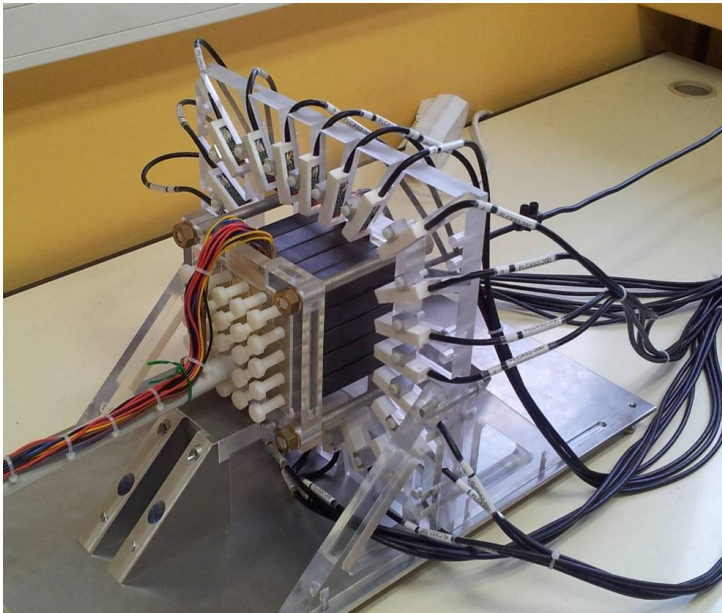
■ Thèse de M. Le Ny, collaboration PSA/CEA-Liten/Helion, projet ANR Omniscient

■ **Objectif**

- Reconstruction des densités de courant dans les stacks de piles à combustible par mesure du champ du champ magnétique externe

■ **Originalité**

- Développement d'un système où seules les inhomogénéités du courant créent du champ
 - Optimisation du rapport signal « utile » / bruit



■ Identification des sources électromagnétiques équivalentes par mesure du champ magnétique externe

- Démarche qui bénéficie de deux compétences complémentaires présentes au G2ELab
 - Modélisation des champs électromagnétiques basse fréquence
 - Métrologie magnétique en champ faible
- Axe original à l'échelle internationale
 - La force est dans la synergie des deux visions

■ Un autre axe important : Modélisations électromagnétiques basse fréquence des dispositifs

- Travaux sur la méthode éléments finis
- Travaux sur l'optimisation
- Travaux les méthodes intégrales
 - Montée en puissance du groupe MIPSE
 - MIPSE : Méthode Intégrales Pour les Systèmes Electriques
 - Commun aux équipes Mage et EP
 - Responsabilité dans sa création et son animation
 - Présentation des perspectives de MIPSE

0 - Introduction

1 - Identifications de sources électromagnétiques pour le magnétisme du navire

2 - Caractérisation de dispositifs par mesure du champ magnétique externe

3 - Perspectives pour la modélisation directe des dispositifs électromagnétiques

4 - Conclusions

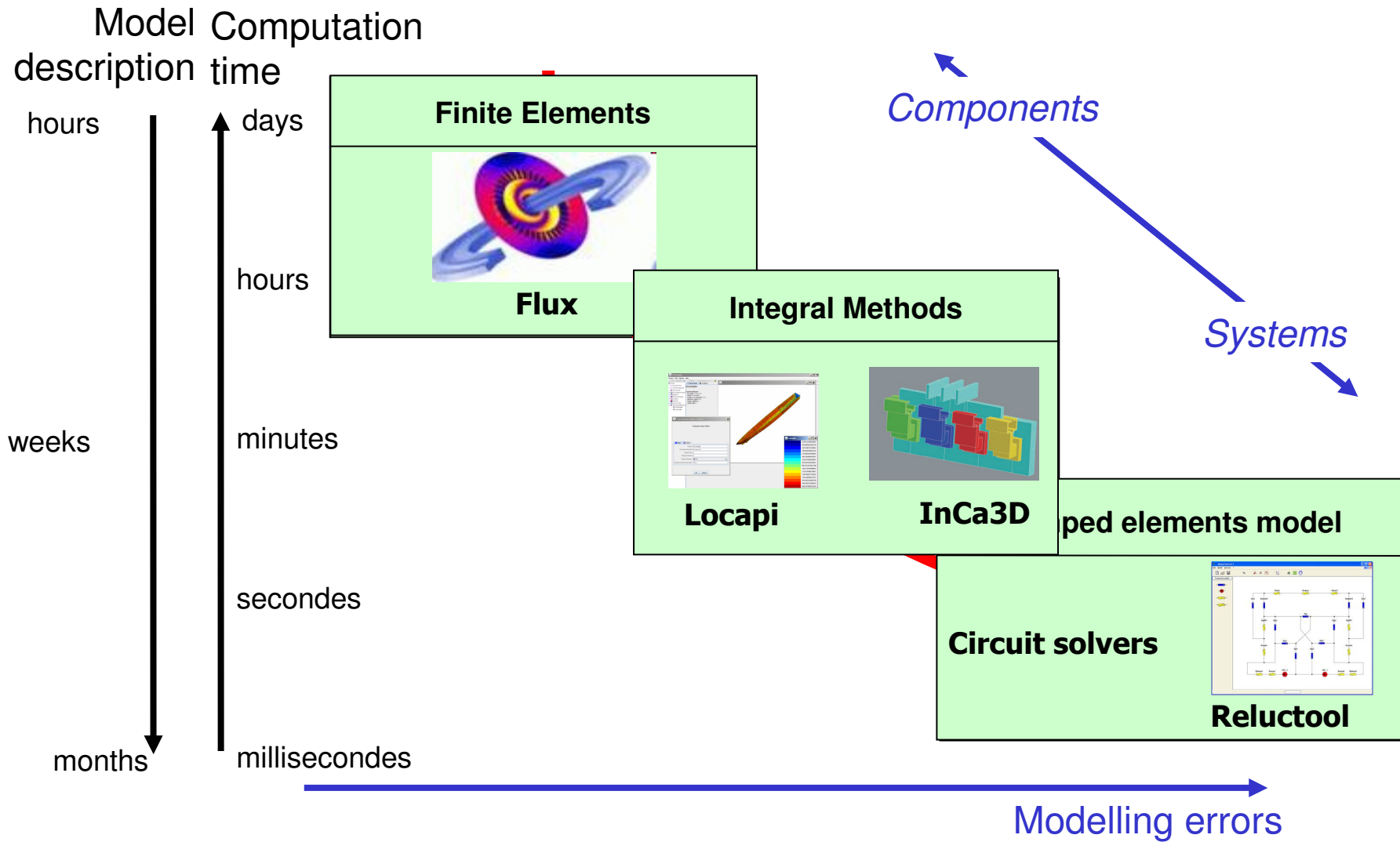
■ Que reste t-il à faire en modélisation électromagnétique 3D basse fréquence ?

- Au niveau matériau
 - Modèles hystérétiques, modèles de pertes, techniques d'homogénéisation
- Au niveau composant
 - Courants induits avec non-linéarités, mouvement et couplage circuit
 - *Machines asynchrones en 3D*
 - Montée en fréquence avec des phénomènes inductifs et capacitifs fortement couplés
 - *Convertisseurs d'électronique de puissance*
- Au niveau système
 - Accéder à une modélisation système « fine »
 - *Avions, voitures, trains, navires toujours plus électriques*
- Avec des enjeux d'optimisation/conception
 - Calcul systématique de gradients, optimisation robuste
- Et avec un nouveau contexte informatique
 - De nouvelles architectures massivement parallèles
 - *Multicores, GPU, cluster,...*
 - Des développements devant être toujours plus rapides et sur mesure

■ Il reste donc beaucoup de choses à faire...

- Que reste t-il à faire en modélisation électromagnétique 3D basse fréquence ?
 - Au niveau matériau
 - Modèles hystérétiques, modèles de pertes, techniques d'homogénéisation
 - **Au niveau composant**
 - Courants induits avec non-linéarités, mouvement et couplage circuit
 - *Machines asynchrones en 3D*
 - **Montée en fréquence avec des phénomènes inductifs et capacitifs fortement couplés**
 - *Convertisseurs d'électronique de puissance*
 - **Au niveau système**
 - **Accéder à une modélisation système « fine »**
 - *Avions, voitures, trains, navires toujours plus électriques*
 - Avec des enjeux d'optimisation/conception
 - Calcul systématique de gradients, optimisation robuste
 - **Et avec un nouveau contexte informatique**
 - **De nouvelles architectures massivement parallèles**
 - *Multicores, GPU, cluster,...*
 - **Des développements devant être toujours plus rapides et sur mesure**
- Importance et potentialités des méthodes « intégrales »
 - Les développer, les compresser et les coupler.

Méthode de modélisation



■ Intérêts

- Basées sur les interactions à distance donc pas de maillage de l'air
 - Plus précises que les éléments finis pour certains calculs
 - champs rayonnés, forces,...
 - Imports CAO facilités
- Peuvent être couplées avec les approches « système »
 - Exemple de PEEC
- Souvent plus faciles à paralléliser que les méthodes à interactions locales

■ Connaissent aujourd'hui un renouveau certain

- Techniques de compressions matricielles

■ Particulièrement adaptées à la modélisation de certains dispositifs

- Les câblages de systèmes électriques
- Les convertisseurs statiques
- Les blindages

■ Amélioration des performances des méthodes intégrales

- Progresser sur les formulations
 - Traitement des non linéarités, coques minces, couplages inductifs/capacitifs,...
- Améliorer les méthodes de compression et les adapter à notre domaine
 - AMLFMM, wavelets, ACA,...
 - Parallélisme
 - Thèse C. Rubeck – calcul sur GPU (en cours)
- Accélérer les convergences
 - Solveurs itératifs, pré-conditionneurs,...

■ Favoriser les couplages avec d'autres méthodes

- Aucune méthode n'est universelle
 - Il faut savoir tirer avantage de chacune
- Exemple de couplages à mettre en oeuvre
 - Couplage Méthode Elément Finis / Méthodes Intégrales
 - Thèse A. Carpentier - couplage magnéto-mécanique (en cours)
 - Couplage Méthodes Intégrales / PEEC / Solveurs circuit
 - Thèse T. T. Nguyen - couplage PEEC / régions minces (en cours)
 - Thèse S. T. Nguyen - compression et réduction de modèle de PEEC (en cours)

Nouveau contexte de développement



■ Maintenir la dynamique du groupe MIPSE

- Aujourd'hui une dizaine de co-développeurs

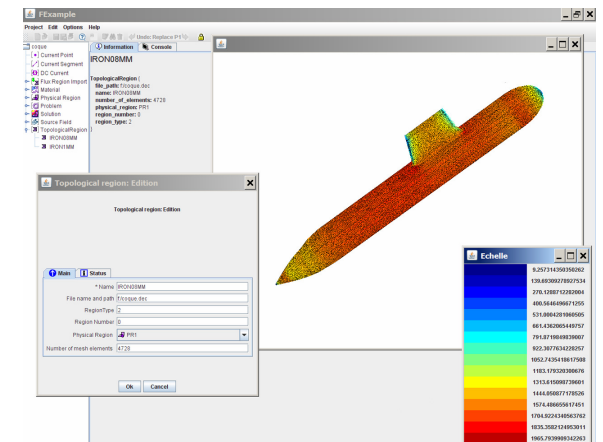
■ Constat

- Les gros codes généralistes sont difficiles à développer, à maintenir et à utiliser
- Il faut répondre rapidement aux besoins spécifiques des utilisateurs

■ S'orienter vers un nouveau modèle de développement logiciel

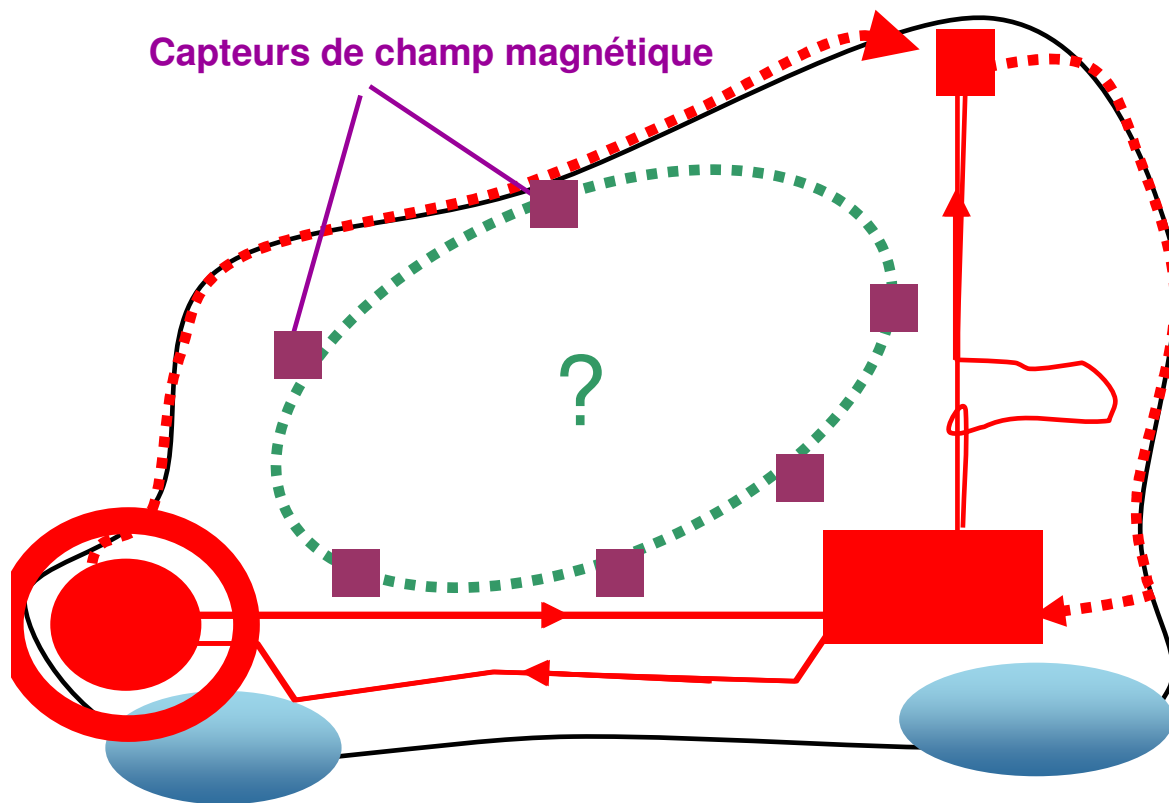
- Utilisation du langage JAVA
 - Robustesse et rapidité des développements
- Développement de briques logicielles indépendantes et interfacables
 - Pérennité dans le temps
- Développement d'un environnement de maquetage dédié méthodes intégrales
 - Test rapide de formulations, de solveurs et création de codes robustes
 - Systématisation des algorithmes de compressions et de la parallélisation
 - Couplages facilités
- Créations rapide d'interfaces « métier » légères
 - Proposer des outils « métier » adaptés aux utilisateurs

■ Exemple du logiciel LocapiNavy



Pour aller un peu plus loin...

■ Modélisation « système » du champ électromagnétique dans un véhicule électrique



Résolution du problème direct

■ Très compliqué mais tous les outils à disposition ou en développement

- Flux / InCa3d / modèles équivalent CEM conduite / solveurs circuit/...

Résolution du problème inverse

■ Utilisation de technique de reconstruction de sources

- Harmoniques sphériques, courants équivalents,...

Convergence méthodes directes/inverses

■ La modélisation directe représente le maximum de vraisemblance

■ Les modèles sont corrigés par des mesures

- Peu capteurs pourront conduire à un nombre important d'informations sur l'état du système
- Caractérisation des courants, des défauts, des états de charge des batteries,...

0 - Introduction

1 - Identifications de sources électromagnétiques pour le magnétisme du navire

2 - Caractérisation de dispositifs par mesure du champ magnétique externe

3 - Perspectives pour la modélisation directe des dispositifs électromagnétiques

4 - Conclusions

■ Contexte et environnement de travail en tous points exceptionnel

- L'Equipe Mage, l'ERT CMF et la société Cedrat
- Le Laboratoire G2ELab
- Le bassin Grenoblois
- Le soutien du CNRS
- Le LIA Franco- brésilien « James Clerk Maxwell »

■ Remerciements

- La recherche est un travail d'équipe
 - Tous les travaux présentés aujourd'hui ont été réalisés **en collaboration avec des nombreuses personnes**
- Remerciement
 - A tous les chercheurs permanents, doctorants, masters, ingénieurs, techniciens, personnels administratifs,...
 - ...qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux

■ Encadrements

- 9 thèses co-encadrées soutenues
- 7 thèses en cours
- 13 masters recherche
- 4 post-doc

■ Bibliométrie

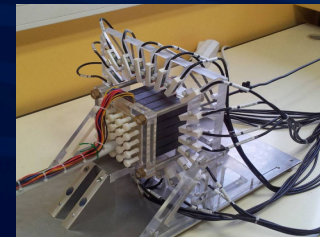
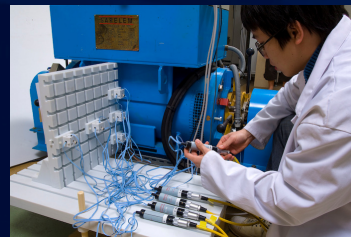
- 42 revues internationales
- 70 conférence internationales
- 5 invitations en conférences internationales
- H-index : 7 (en hausse)
- Taille : 1m73 (stable)
- Poids : 69kg (en baisse)

■ Valorisation

- 4 brevets
- 11 contrats avec des partenaires privés
- 6 contrats publics (3 ANR, 2 FUI, 1 pôle de compétitivité)

Modélisation électromagnétique basse fréquence, identification de sources équivalentes et métrologie en champs magnétiques faibles

Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université de Grenoble



Olivier CHADEBEC
Chargé de recherche CNRS