

---

Sujet de thèse CIFRE  
Naval Group - G2Elab

---

Caractérisation et modélisation magnéto-mécanique des aciers Marine,  
en champ faible et fortes contraintes, pour l'identification de  
l'aimantation des coques des navires

### Contexte

Les aciers employés en construction navale s'aimantent en présence d'un champ magnétique. En réaction, cette aimantation génère un champ magnétique. Ainsi, la coque d'un navire s'aimante dans le champ magnétique terrestre (champ "faible"  $\sim 50 \mu T$ ), et le champ magnétique généré en réponse conduit à créer une perturbation qui peut être vue comme une anomalie locale du champ magnétique terrestre. Cette anomalie (ou signature magnétique) est alors susceptible d'être exploitée pour la mise à feu de mines sous-marines ou pour la détection aéroportée. La protection des bâtiments exige donc leur discrétion magnétique, assurée par un système de boucles de courants installé à bord, compensant le champ dû à l'aimantation : c'est un système d'immunisation.

Cependant, les aciers Marine sont aussi le siège d'un couplage magnéto-mécanique, qui se traduit notamment par une modification du comportement magnétique sous l'action de contraintes mécaniques. Ces contraintes peuvent être héritées de la mise en forme des matériaux ou issues du fonctionnement des dispositifs. Dès lors, sous l'effet de très fortes contraintes mécaniques, par exemple lors des plongées de sous-marins, l'aimantation peut varier de manière très significative et les réglages des courants d'immunisation doivent être adaptés pour garantir la discrétion. Cette adaptation serait grandement facilitée si l'on disposait d'outils de calcul numériques permettant de modéliser la réponse magnétique des navires soumis à ces différentes sollicitations.

Cette thématique générale de la discrétion magnétique est un véritable enjeu stratégique pour la Marine Nationale et, par conséquent, pour Naval Group qui réalise ces bâtiments et travaille à leur système de discrétion électromagnétique. Dans ce cadre, Naval Group travaille depuis plusieurs années avec le G2Elab (équipe Champs Magnétiques Faibles), spécialiste de la caractérisation et de la réduction des sources magnétiques d'indiscrétion et en particulier sur les systèmes performants d'immunisation. Cette thèse s'effectuera également avec l'équipe MADEA (Matériaux et Dispositifs Électromagnétiques Avancés) du G2Elab, spécialisée dans la caractérisation magnétique et la modélisation des matériaux.

### Objectifs de la thèse

La contrainte mécanique est connue, depuis les premiers travaux de Mateucci et Villari, pour impacter de manière significative le comportement magnétique des matériaux ferromagnétiques ainsi que leur comportement magnétostrictif. Ainsi, le comportement magnétique macroscopique est sensible à tout chargement mécanique, notamment à son signe (compression, traction), à son niveau (élastique, plastique) ou encore à sa nature (contrainte uniaxiale ou multiaxiale, statique ou dynamique). Les interactions entre la microstructure magnétique (domaines et parois magnétiques) et la microstructure mécanique (grains, champs de contraintes, dislocations) sont à la base du phénomène. Ce comportement magnéto-mécanique dans le contexte des champs faibles et des fortes contraintes a été étudié pour différents types d'application (discrétion magnétique des navires, contrôle non destructif de pipelines).

Au G2Elab, des études sur une maquette représentative du comportement des aciers Marine sous contrainte ont donné lieu à un premier modèle liant les états magnétique et mécanique.

Ce modèle permet de décrire le premier cycle d'aimantation avec la contrainte, pour un acier Marine, après traitement magnétique [1]. Cette première approche a notamment montré le lien entre les prises d'aimantations et les aimantations caractéristiques de l'acier étudié (aimantation anhystérétique sous contraintes). Plus récemment [2], des caractérisations des cycles subséquents ont été menées sur la même maquette, afin de mettre en évidence les paramètres qui influencent principalement les variations d'aimantation, dans un cas plus général. Si la littérature fait état de certaines caractérisations ou modèles d'aciers sous contrainte, abordé soit sous l'angle des mécanismes physiques à l'échelle locale [3, 4, 5] soit sous celui de la réponse globale d'un dispositif [6], il n'existe pas à ce jour de modèle dédié à l'application visée et permettant de rendre compte des variations de signatures observées expérimentalement. Dans l'objectif de disposer d'outils de modélisation de la réponse magnétique des bâtiments de la Marine, il est nécessaire d'établir des lois de comportement, précises et prédictives rendant compte du couplage magnéto-mécanique, et de les intégrer dans des outils de calcul numériques (éléments finis, méthodes intégrales) à même de représenter le couplage des différents champs (magnétique, mécanique) au niveau d'une structure. Ceci passe également par une caractérisation magnéto-mécanique des aciers marines dans le contexte particulier des champs magnétiques faibles (champ terrestre) et des fortes contraintes.

Dans ce cadre, une première étape de la thèse consistera à analyser les mesures effectuées afin d'en proposer un modèle de perméabilité sous contrainte. Au besoin, les mesures pourront être complétées sur le banc existant. La maquette représentative utilisée jusqu'ici est un cylindre d'acier à haute limite élastique pouvant être soumis à une pression interne. La caractérisation du phénomène magnéto-mécanique sur cette maquette n'est donc pas directe puisqu'on recherche, à partir du champ magnétique externe généré autour de la maquette, l'aimantation source correspondante dans le matériau ou la perméabilité associée. On doit donc résoudre un problème inverse qui, à partir d'une mesure globale (champ externe produit) permet de remonter à une grandeur physique locale (aimantation ou perméabilité de la tôle). Si cette approche sur maquette simplifiée est très instructive, elle ne permet pas d'investiguer de façon simple le comportement magnéto-mécanique a priori anisotrope et hystérétique. Ainsi, on comprend l'intérêt de se doter d'outils qui permettraient de plus directement caractériser le comportement magnéto-mécanique des matériaux étudiés, dans le contexte particulier des champs faibles et de fortes contraintes.

L'équipe MADEA du G2Elab élabore actuellement un banc de caractérisation magnéto-mécanique, mais pour des champs magnétiques usuels en Génie Électrique, donc bien plus élevés que pour notre application, et des contraintes mécaniques plus faibles. Une contribution de la thèse sera d'étudier avec l'équipe développant le banc, son adaptation pour le domaine particulier des champs magnétiques faibles et des contraintes mécaniques fortes. Par exemple, il s'agira de contribuer au dimensionnement d'un circuit magnétique pour le contrôle du champ, compatible avec les niveaux faibles à appliquer ; mais aussi au dimensionnement et au test de l'instrumentation magnétique pour identifier le meilleur système à même d'effectuer les mesures d'aimantation en champ faible sur une éprouvette biaxiale. Le but est de contribuer à un outil de caractérisation dédié, qui ne nécessiterait ensuite que de travailler sur des échantillons de matériau au lieu d'une maquette certes réduite et simplifiée par rapport à un vrai bâtiment, mais bien plus longue à mettre en œuvre. En fonction de la maturité de réalisation de ce banc, des mesures de caractérisation pourront être menées sur différents aciers à haute limite élastique et corrélées à celles obtenues sur la maquette représentative au G2Elab ou d'autres mesurées par Naval Group. En particulier, il sera étudié l'influence sur le comportement de l'angle entre la contrainte appliquée et l'aimantation, ainsi que la comparaison entre traction et compression.

Dans une dernière étape, le modèle de comportement magnéto-mécanique proposé sera intégré dans le logiciel de calcul de champ, MIPSE, développé par le G2Elab pour l'application discrétion magnétique. Ce logiciel, qui repose sur l'utilisation des méthodes éléments finis et intégrales, permet de calculer la signature magnétique d'une structure ferromagnétique complexe à partir de la connaissance a priori de sa géométrie et des propriétés magnétiques de ses matériaux (lois d'aimantation, perméabilités, ...). Des développements sont actuellement me-

nés pour intégrer des formulations pour le traitement des problèmes mécaniques (3D, éléments plaques et coques) afin de calculer les champs de contraintes et de déformations mécaniques d'une structure subissant une mise sous pression. Un couplage entre la résolution d'un problème mécanique et d'un problème magnétique sera réalisé. L'idée est alors d'exploiter ces distributions de contraintes pour la détermination de la réponse magnétique via le modèle de comportement qui sera proposé. Cette implémentation permettra de modéliser les variations d'aimantation d'une structure subissant de fortes contraintes. Elle sera appliquée pour une maquette pour test et validation.

## Bibliographie

- [1] Viana A., "Étude de la magnétoélasticité en champ magnétique faible et contraintes mécaniques fortes", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [2] Chavin-Collin G., "Poste 3 : Étude de la magnétoélasticité", Contrat Naval n°6614398, 06/01/2022, Post-doc CNRS-Naval Group.
- [3] M. J. Sablik, L. A. Riley, G. L. Burkhardt, H. Kwun, P. Y. Cannell, K. T. Watts, R. A. Langman. "Micromagnetic model for the influence of biaxial stress on hysteretic magnetic properties". Journal of Applied Physics, 75 : 5673, 1994. DOI : 10.1063/1.355633
- [4] J. Pearson, P. T. Squire, M. G. Maylin, J. G. Gore. "Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure iron". IEEE Transactions on Magnetics, 38(5) : 3251–3253, 2000. DOI : 10.1109/20.908758
- [5] O. Hubert. "Influence of biaxial stresses on the magnetic behaviour of an iron-cobalt sheet - experiments and modelling". Przeglad Elektrotechniczny, R.83, (2007) p70.
- [6] L. Bernard, L. Daniel. "Effect of Stress on Magnetic Hysteresis Losses in a Switched Reluctance Motor : Application to Stator and Rotor Shrink Fitting", IEEE Transactions on Magnetics, 51(9) : 7002513, 2015. DOI : 10.1109/TMAG.2015.2435701

## Planning de la thèse

$T_0 - T_0 + 6$  mois : Bibliographie en champ faible et très fortes contraintes :

- sur les méthodes de caractérisation magnéto-mécanique
- sur les modèles magnéto-mécaniques

$T_0 + 6$  mois -  $T_0 + 12$  mois : Adaptation du banc existant pour une caractérisation magnéto-mécanique en champ faible et très fortes contraintes

$T_0 + 12$  mois -  $T_0 + 24$  mois : Proposition d'un modèle magnéto-mécanique suite à analyse des mesures déjà relevées sur structures dédiées (cylindre creux sous pression interne) avec éventuellement un complément de jeux de mesures

$T_0 + 24$  mois -  $T_0 + 30$  mois : Implantation du modèle dans le logiciel MIPSE dédié au calcul magnéto-mécanique des structures - Comparaison à des mesures réalisées sur maquette

$T_0 + 30$  mois -  $T_0 + 36$  mois : Rédaction du manuscrit de thèse

**Mots clés :** Modèles de comportement magnéto-mécanique, modélisation numérique, problèmes inverses, banc de caractérisation, matériaux ferromagnétiques, instrumentation, champs faibles, contraintes mécaniques fortes, dimensionnement.

**Pré-requis :** Magnétostatique, mécanique des milieux continus (élasticité, plasticité,...), instrumentations magnétiques et mécaniques, modélisation et simulation numériques (éléments finis,...), programmation (Matlab, Python, Labview, Java, ...).

**Lieu de la thèse :** Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (G2Elab)

**Durée :** 3 ans, d'octobre 2022 à septembre 2025

**Financement :** Thèse CIFRE Naval Group

**Pré-requis entreprise** : Nationalité française exigée

**Encadrement :**

Didier CAVALLERA	Email : didier.cavallera@naval-group.com
Olivier CHADEBEC	Email : olivier.chadebec@g2elab.grenoble-inp.fr
Laurent DEMILIER	Email : laurent.demilier@naval-group.com
Nicolas GALOPIN	Email : nicolas.galopin@g2elab.grenoble-inp.fr
Olivier PINAUD	Email : olivier.pinaud@g2elab.grenoble-inp.fr
Laure-Line ROUVE	Email : laure-line.rouve@g2elab.grenoble-inp.fr