

Thèse 2022-2025

Magnétisme de structures courbes: effets géométriques et de la déformation mécanique

Directeurs de thèse : Mohamed Haboussi & Fatih Zighem
 Contacts : haboussi@univ-paris13.fr & zighem@univ-paris13.fr
 01.49.40.34.70 & 01.49.40.34.60
 Laboratoire : CNRS - Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux
 Université Sorbonne Paris Nord, 93430 Villetaneuse, France

Depuis la mise en évidence en 1847 par J. P. Joule de la déformation macroscopique d'un matériau magnétique par un champ magnétique (magnétostriction directe), les effets magnéto-mécaniques n'ont cessé d'être étudiés tant pour leurs aspects fondamentaux que pour les applications industrielles les impliquant. Par effets magnéto-mécaniques, on entend essentiellement ceux liés à la magnétostriction, ayant pour conséquence soit de déformer un corps ferromagnétique sous l'application d'un champ magnétique (effet direct) soit d'induire une anisotropie magnétoélastique lorsqu'une contrainte est appliquée à ce corps (effet indirect). Après avoir fait l'objet de nombreuses études fondamentales et donné lieu à de multiples applications au cours du siècle passé (notamment dans les années 60-70), ces effets magnéto-mécaniques connaissent un réel regain d'intérêt ces dernières années, en raison de leur implication dans de nouvelles thématiques phares du nanomagnétisme telles que la « straintronique-magnétique ». Dans cette thématique, des déformations élastiques (stationnaires) imposées au système permettent de contrôler certaines propriétés magnétiques de celui-ci. L'influence de ces effets magnétoélastiques est aussi très étudiée dans les dispositifs magnétiques flexibles, généralement composés d'un système magnétique déposé sur un substrat polymère, dont les applications vont d'objets de la vie quotidienne aux dispositifs microélectroniques.

Par ailleurs, de nombreuses études théoriques et numériques récentes ont montré que des objets magnétiques fortement courbés pouvaient donner naissance à des textures magnétiques complexes. Ces effets suscitent un fort enthousiasme dans la communauté du magnétisme^[1-2]. Une question centrale des nouvelles recherches qui en résultent, est comment les caractéristiques géométriques telles que la courbure, l'épaisseur, ou bien matérielles comme la qualité de l'interface, ou plus généralement la déformation mécanique et son hétérogénéité impactent voire contrôlent-elles les changements des propriétés magnétiques des systèmes étudiés ainsi que les nouveaux phénomènes (magnétiques) qu'elles génèrent (on peut par exemple citer la stabilisation de skyrmions magnétiques sans a priori l'interaction de type Dzyaloshinskii-Moriya mais sous l'influence de la courbure de l'objet magnétique ou d'autres de ses caractéristiques de forme). A l'heure actuelle, seuls les effets géométriques sont généralement pris en compte dans les modélisations théoriques et numériques d'objets magnétiques courbés^[1-2]. Pourtant, de tels systèmes sont nécessairement soumis à des déformations mécaniques dans la réalité, entraînant des effets magnétiques (magnéto-mécaniques) additionnels qui viennent se rajouter aux purs effets dus à la géométrie initiale.

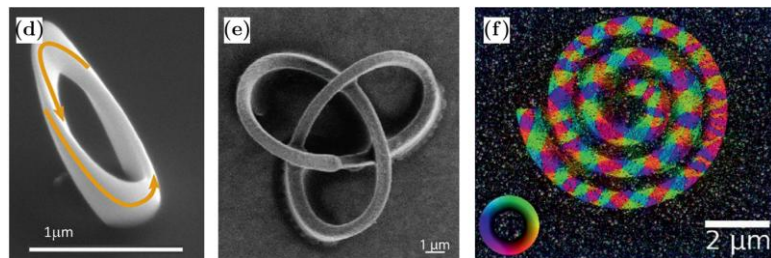


Figure 1: Différents objets courbés. L'image (f) montre la configuration complexe de l'induction magnétique au sein d'un objet complexe obtenue par holographie magnétique, [1].

Un enjeu scientifique majeur dans le domaine du nanomagnétisme est alors de quantifier et discriminer ces évolutions des propriétés magnétiques dues à la géométrie de l'objet et sa déformation grâce à une modélisation complète et pertinente menant à un outil de simulation numérique de ces phénomènes,

robuste et efficace. Cependant, un tel outil rendant compte à la fois des effets de courbure et des (grandes) déformations (hétérogènes) sur les propriétés magnétiques n'est pas disponible et reste à développer. Ceci représente l'objectif principal de ce projet de thèse.

Pour atteindre cet objectif, nous nous appuyons sur un travail déjà réalisé au laboratoire LSPM, dans le cadre de la thèse de N. Challab (2021), qui a donné lieu à un premier outil de simulation numérique développé dans COMSOL Multiphysics®. Basé sur la résolution de l'équation de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG), couplée aux équations de la magnétostatique et de la mécanique, cet outil de simulation a d'abord été validé sur de multiples applications faisant intervenir des objets, plutôt sans courbure, avant d'être utilisé pour analyser/interpréter différentes observations expérimentales^[3-5]. Dans ce travail de thèse, cet outil sera d'abord exploité pour mettre en évidence les effets de courbure seule sur le magnétisme des solides étudiés, avant de considérer la déformation de ceux-ci. Celle-ci sera supposée faible, dans un premier temps, au même titre que la rotation, avant d'aborder le cas plus complexe des grandes déformations et plus généralement des transformations finies. Ceci nécessitera forcément une modification de la modélisation mathématique à la base de l'outil de simulation numérique implémenté dans COMSOL Multiphysics®. Une attention particulière sera portée dans ce cas au traitement des rotations finies et au problème d'objectivité des équations d'état et grandeurs tensorielles mises en jeu.

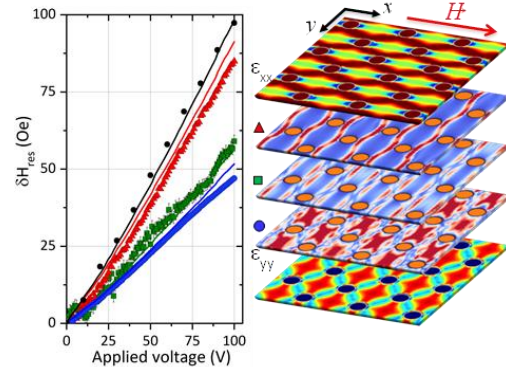


Figure 2: Cristal magnonique déposé sur un substrat ferroélectrique et soumis à des déformations mécaniques élastiques. Les cartographies mettent en évidence différents modes magnétiques localisés ainsi que les champs de déformations complexes, [6].

Ce travail sera mené en étroite collaboration, en interne, avec plusieurs membres de l'équipe de recherche (Yves Roussigné et Damien Faurie). Le doctorant bénéficiera aussi de deux collaborations internationales avec d'une part le groupe de D. Makarov (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Germany) pour les aspects théoriques et numériques et d'autre part, le groupe d'Adekunle Adeyeye (Durham University & National University of Singapore, UK & Singapore) pour les aspects expérimentaux.

Profil du candidat recherché : Ingénieur (bac + 5) ou master 2 possédant de solides connaissances scientifiques en mécanique et/ou physique du solide théorique et numérique, des compétences avérées en programmation ainsi que de très bonnes aptitudes rédactionnelles et orales en français et/ou en anglais. Une connaissance du logiciel COMSOL Multiphysics® sera très appréciée.

Les candidats intéressés sont invités à envoyer leur dossier de candidature (CV + Lettre de motivation + Relevés de notes + Recommandations) à haboussi@univ-paris13.fr & zighem@univ-paris13.fr

Références bibliographiques :

- [1] D. D. Sheka, *A perspective on curvilinear magnetism*, **Applied Physics Letters** **118** (23), 230502 (2021)
- [2] D. Makarov et al., *New Dimension in Magnetism and Superconductivity: 3D and Curvilinear Nanoarchitectures*, **Adv. Mater.**, **34**, 2101758 (2022)
- [3] N. Challab, F. Zighem, D. Faurie, M. Haboussi, M. Belmeuguenai, P. Lupo and A. O. Adeyeye, *Local Stiffness Effect on Ferromagnetic Response of Nanostructure Arrays in Stretchable Systems*, **Phys. Stat. Sol. (RRL)** **13**, 1800509 (2018)
- [4] N. Challab, D. A. Aboumassound, F. Zighem, D. Faurie, M. Haboussi, *Micromagnetic modelling of nanostructures subject to heterogeneous strain fields*, **J. Phys. D: Appl. Phys.** **52** 355004 (2019)
- [5] N. Challab, D. Faurie, M. Haboussi, F. Zighem, *Effects of Heterogeneous Strain on the Magnetization Processes in Magnetic Nanomembranes*, **Phys. Stat. Sol. (RRL)** **15**, 2100149 (2021)
- [6] N. Challab, D. Faurie, M. Haboussi, A.O. Adeyeye, F. Zighem, *Differentiated Strain-Control of Localized Magnetic Modes in Antidot Arrays*, **ACS Applied Materials & Interfaces** **13**, 29906 (2021)

Ph.D. project (2022-2025)

Magnetism of curved thin structures: geometrical/shape and deformation effects

Ph.D. supervisors:	Mohamed Haboussi & Fatih Zighem
Contacts :	haboussi@univ-paris13.fr & zighem@univ-paris13.fr 01.49.40.34.70 & 01.49.40.34.60
Laboratory:	CNRS - Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux Université Sorbonne Paris Nord, 93430 Villetaneuse, France

Since the discovery in 1842 by J. P. Joule of the macroscopic deformation of a magnetic material by a magnetic field (direct magnetostriction), magneto-mechanical effects have not ceased to be studied both for their fundamental aspects and for the industrial applications involving them. Magneto-mechanical effects are essentially those related to magnetostriction, resulting either in the deformation of a ferromagnetic body under the application of a magnetic field (direct effect) or in the induction of magnetoelastic anisotropy when a stress is applied to this body (indirect effect). After having been the subject of numerous fundamental studies and having given rise to many applications over the last century (particularly in the 1960s and 1970s), these magneto-mechanical effects have been the subject of renewed interest in recent years, due to their involvement in new hot/major research topics in nanomagnetism, such as "straintronic-magnetism". In this domain, elastic (stationary) strains imposed on the system allow certain magnetic properties of the latter to be controlled. The influence of these magnetoelastic effects is also being studied in flexible magnetic devices that are very present in microelectronic applications.

Furthermore, many recent theoretical and numerical studies have shown that strongly curved magnetic objects can give rise to complex magnetic textures. These effects are generating great enthusiasm in the magnetism community^[1-2]. A central question in the resulting new research is how geometrical features such as curvature, thickness, or material features such as interface quality, or more generally the mechanical deformation and its heterogeneity impact or even control the changes of the magnetic properties of the studied systems as well as the new (magnetic) phenomena they generate (e.g. the stabilisation of magnetic skyrmions without a priori the Dzyaloshinskii-Moriya type interaction but under the influence of the curvature of the magnetic object or other of its shape characteristics). At present, only geometrical effects are generally taken into account in the theoretical and numerical modelling of curved magnetic objects^[1-2]. However, such systems are necessarily subjected to mechanical deformations in reality, resulting in additional magnetic (magneto-mechanical) effects in addition to the pure effects due to the initial geometry.

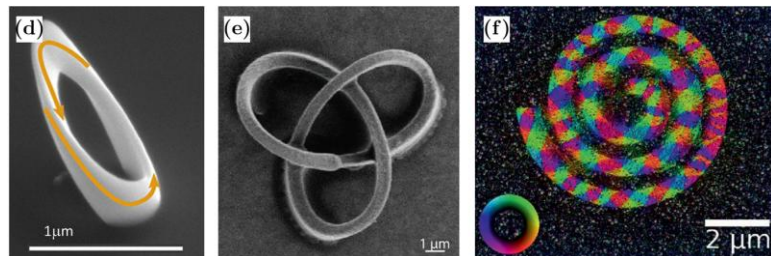


Figure 1: Different curved objects. Image (f) shows the complex magnetic induction pattern within a complex object obtained by magnetic holography, [1].

A major scientific challenge in the field of nanomagnetism is therefore to quantify and discriminate the evolutions of the magnetic properties due to the geometry of the object and/or its deformation thanks to a complete and relevant modelling, leading to a robust and efficient numerical simulation tool of these phenomena. However, such a tool accounting for both the effects of curvature and deformations, which may be large and heterogeneous, on the magnetic properties is not available and still to be developed. This is the main objective of this thesis project.

To achieve this task, we will build on a work already done at the LSPM laboratory, during the Ph.D. thesis of N. Challab (2021), which resulted in a first numerical simulation tool developed in COMSOL Multiphysics®. Based on the solution of the Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation, coupled with the magnetostatic and mechanical equations, this simulation tool was first validated on multiple applications involving objects, rather without curvature, before being used to analyse/interpret various experimental observations^[3-5]. In present thesis, this tool will first be used to highlight the effects of curvature alone on the magnetism of the studied objects, before considering their deformation. The latter will be assumed to be small, as for the rotation, before addressing the more complex case of large deformations and more generally of finite transformations. This will necessarily require a modification of the mathematical modelling on which the numerical simulation tool implemented in COMSOL Multiphysics® is based. Particular attention will be paid in this case to the treatment of finite rotations and the problem of objectivity of the constitutive equations and tensorial quantities involved.

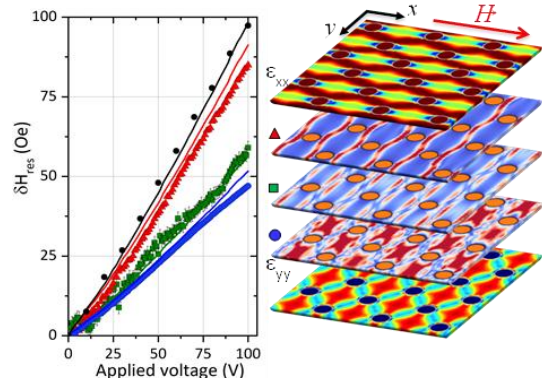


Figure 2: Magnonic crystal deposited on a ferroelectric substrate and subjected to elastic mechanical deformations. The maps show different localized magnetic modes as well as complex deformation fields, [6].

This work will be conducted within the groups of nanomechanics and nanomagnetism of LSPM laboratory under the supervision of M. Haboussi and F. Zighem, with close interactions with other members of the group (Y. Roussigné and D. Faurie). The PhD student will also benefit from two international collaborations with, i) D. Makarov's group (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Germany) for the theoretical and numerical aspects, ii) Adekunle Adeyeye's group (Durham University & National University of Singapore, UK & Singapore) for the experimental aspects (magnonic crystal fabrication).

Candidate profile: Engineer (5 years of higher education) or Master's degree with solid scientific knowledge in theoretical and numerical mechanics and/or physics of solid, confirmed programming skills as well as very good writing and oral communication skills in French and/or English. Good knowledge of COMSOL Multiphysics® software will be highly appreciated.

Interested candidates are invited to send their application (CV + covering letter + Academic transcripts + Recommendations) to haboussi@univ-paris13.fr & zighem@univ-paris13.fr

Bibliographical references

- [1] D. D. Sheka, *A perspective on curvilinear magnetism*, **Applied Physics Letters** **118** (23), 230502 (2021)
- [2] D. Makarov et al., *New Dimension in Magnetism and Superconductivity: 3D and Curvilinear Nanoarchitectures*, **Adv. Mater.**, **34**, 2101758 (2022)
- [3] N. Challab, F. Zighem, D. Faurie, M. Haboussi, M. Belmeguenai, P. Lupo and A. O. Adeyeye, *Local Stiffness Effect on Ferromagnetic Response of Nanostructure Arrays in Stretchable Systems*, **Phys. Stat. Sol. (RRL)** **13**, 1800509 (2018)
- [4] N. Challab, D. A. Aboumassound, F. Zighem, D. Faurie, M. Haboussi, *Micromagnetic modelling of nanostructures subject to heterogeneous strain fields*, **J. Phys. D: Appl. Phys.** **52** 355004 (2019)
- [5] N. Challab, D. Faurie, M. Haboussi, F. Zighem, *Effects of Heterogeneous Strain on the Magnetization Processes in Magnetic Nanomembranes*, **Phys. Stat. Sol. (RRL)** **15**, 2100149 (2021)
- [6] N. Challab, D. Faurie, M. Haboussi, A.O. Adeyeye, F. Zighem, *Differentiated Strain-Control of Localized Magnetic Modes in Antidot Arrays*, **ACS Applied Materials & Interfaces** **13**, 29906 (2021)