

## Contrat doctoral – ED Galilée

### **Titre du sujet : Dynamique de spin en géométries non planes sous gradients de contrainte**

- Unité de recherche : LSPM CNRS UPR 3407
- Discipline : Physique, Mécanique
- Direction de thèse : Fatih ZIGHEM et Mohamed HABOUSSI
- Contact : [zighem@univ-paris13.fr](mailto:zighem@univ-paris13.fr) et [mohamed.haboussi@univ-paris13.fr](mailto:mohamed.haboussi@univ-paris13.fr)
- Domaine de recherche : physique et mécanique expérimentales
- Mots clés : Magnonique, Ondes de spin, Magnétoélasticité, Films magnétiques flexibles, Géométries courbes

Depuis plusieurs années, les travaux menés dans l'équipe ont montré que la mécanique constitue un levier capable d'influencer profondément les propriétés magnétiques des films minces [1]. Les études consacrées à la magnétostriction [2], aux contraintes appliquées ou résiduelles [3,4], ainsi qu'à l'impact des hétérogénéités mécaniques ou géométriques sur la réponse magnétique [5,6], ont permis d'établir une description fine des interactions entre contrainte et aimantation. Parallèlement, plusieurs travaux ont montré que la déformation peut être utilisée pour ajuster la dispersion des ondes de spin dans des systèmes périodiques [7], ouvrant la voie à une véritable ingénierie élastique des bandes magnoniques [8].

Dans ce contexte, les systèmes magnétiques flexibles constituent une plateforme particulièrement intéressante. Lorsqu'un film déposé sur un support souple est soumis à une flexion, la déformation devient non homogène sur l'épaisseur : une partie du film est placée en traction tandis qu'une autre est en compression. Lorsque le substrat est suffisamment mince pour transmettre efficacement cette déformation, un gradient de contrainte vertical apparaît dans le matériau magnétique. Ce régime mécanique diffère fondamentalement des sollicitations homogènes « in-plane », car il rompt naturellement la symétrie du système. Les conséquences de cette asymétrie sur les propriétés statiques commencent à être explorées, mais leurs implications sur la dynamique des ondes de spin demeurent encore peu étudiées [9]. Plusieurs travaux théoriques suggèrent pourtant que les gradients de contrainte peuvent modifier la dispersion des modes magnoniques et conduire à une non-réciprocité accrue des modes magnéto-statiques de surface [9–11]. Les études expérimentales dans cette configuration restent cependant limitées, notamment dans le cas des films continus flexibles soumis à une courbure contrôlée.

Cette problématique s'inscrit dans un contexte international particulièrement dynamique autour des systèmes magnétiques flexibles et des géométries non planes [12–14]. Plusieurs équipes explorent aujourd'hui l'influence de la courbure, des contraintes non homogènes et des géométries tridimensionnelles sur les propriétés statiques et dynamiques des films magnétiques, en particulier dans le domaine des ondes de spin et de la magnonique reconfigurable. Les effets de courbure sur l'aimantation [11] ou les modulations mécaniques des bandes magnoniques [7,8] illustrent une compétition scientifique active à l'interface entre physique fondamentale, ingénierie des matériaux et dispositifs magnoniques.

L'objectif général de la thèse est d'étudier la manière dont un environnement mécanique courbe influence la dynamique des ondes de spin dans les systèmes magnétiques flexibles. La flexion introduit

une distribution non homogène de contrainte susceptible de modifier les champs internes, les anisotropies effectives et les conditions d'excitation des modes dynamiques. Le travail visera à comprendre comment cette distribution mécanique restructure la dynamique magnétique, aussi bien dans des films continus que dans des géométries présentant des modulations latérales ou des éléments nanostructurés. L'enjeu ne se limite pas à l'observation d'un effet particulier, mais consiste à établir une compréhension cohérente du rôle joué par la courbure dans la dispersion, la sélection et la propagation des modes de spin. Une attention particulière sera portée aux modes magnétostatiques de surface, particulièrement sensibles aux ruptures de symétrie induites par les gradients de contrainte. La thèse cherchera notamment à déterminer dans quelles conditions la flexion peut modifier la directionnalité, la localisation ou la symétrie des modes propagatifs. Le projet explorera également l'influence combinée de la flexion et de la nanostructuration. La présence de motifs périodiques, de réseaux de nanolignes ou de nanotrous peut en effet introduire des interactions supplémentaires entre géométrie, contraintes mécaniques et dynamique magnétique. Dans ces systèmes, la courbure pourrait agir simultanément sur les champs internes locaux et sur les mécanismes de couplage entre éléments, conduisant à des comportements dynamiques émergents.

La démarche scientifique reposera sur une approche combinant fabrication, caractérisation mécanique, spectroscopies dynamiques et modélisation. Les films magnétiques seront déposés sur substrats flexibles à l'aide des moyens PVD disponibles au laboratoire. Lorsque cela sera pertinent, des architectures partiellement nanostructurées pourront être réalisées par lithographie interférentielle grâce aux infrastructures de la salle blanche CPN<sup>2</sup> [15]. Un premier axe du travail consistera à caractériser précisément l'état mécanique induit par la flexion, notamment la courbure réelle, la distribution des contraintes et l'homogénéité mécanique des films. Sur cette base, l'évolution des propriétés dynamiques sera étudiée par résonance ferromagnétique (FMR), afin d'identifier les modifications globales du spectre dynamique sous flexion contrôlée. L'analyse de la dispersion et de la propagation des ondes de spin s'appuiera ensuite sur la spectroscopie Brillouin résolue en vecteur d'onde (BLS). Cette technique permettra d'examiner finement l'impact de la courbure sur les modes magnétostatiques de surface, leur localisation, leur directionnalité et leurs symétries. Les résultats expérimentaux seront confrontés à des modèles magnétoélastiques et à des simulations numériques adaptées aux géométries courbes [7–9], afin d'identifier les mécanismes dominants responsables des effets observés. Cette thèse s'inscrit ainsi dans la continuité des recherches développées dans l'équipe sur les effets des contraintes mécaniques et sur les modulations de la dispersion magnétique. Elle vise à établir une compréhension structurée du rôle de la flexion dans la dynamique des systèmes magnétiques flexibles et à explorer la possibilité d'utiliser la mécanique comme un véritable paramètre de réglage des propriétés magnétiques dans des géométries non planes.

- [1] F. Zighem and D. Faurie, [Journal of Physics: Condensed Matter, 33 233002 \(2021\)](#). [2] F. Zighem, D. Faurie et al. [Journal of Physics D: Applied Physics, 50 455002 \(2017\)](#). [3] M. Gueye, F. Zighem, M. Belmeguenai, M. Gabor, C. Tiusan, and D. Faurie, [Journal of Physics D: Applied Physics, 49 265001 \(2016\)](#). [4] M. Gueye, P. Lupo, F. Zighem, D. Faurie, M. Belmeguenai, and A. O. Adeyeye, [Europhysics Letters, 114 17003 \(2016\)](#). [5] H. Ben Mahmoud, D. Faurie, P. O. Renault, and F. Zighem, [ACS Applied Electronic Materials, 7 9743 \(2025\)](#). [6] N. Challab, D. Faurie, M. Haboussi, A. O. Adeyeye, and F. Zighem, [ACS Applied Materials & Interfaces, 13 29906 \(2021\)](#). [7] S. Chirolì, D. Faurie, M. Haboussi, A. O. Adeyeye, and F. Zighem, [Physical Review B, 108 024406 \(2023\)](#). [8] S. Chirolì, D. Faurie, M. Haboussi, A. O. Adeyeye, and F. Zighem, [Physical Review Applied 25, 034029 \(2026\)](#). [9] M. Khelif, S. Chirolì, N. Challab, D. Faurie, M. Haboussi, and F. Zighem, [Journal of Physics D: Applied Physics, 58 475001 \(2025\)](#). [10] L. Körber, R. Verba, J. A. Otálora, V. Kravchuk, J. Lindner, J. Fassbender, and A. Kákay, [Physical Review B, 106 014405 \(2022\)](#). [11] R. Hertel, [Spin, 3 1340009 \(2013\)](#). [12] D. Makarov, O. M. Volkov, A. Kákay, O. V. Pylypovskiy, B. Budinská, and O. V. Dobrovolskiy, [Advanced Materials, 34](#)

[2101758 \(2022\)](#). [13] D. D. Sheka, [Applied Physics Letters, 118 \(2021\)](#). [14] H. Wu and J. Lan, [Physical Review B, 105 174427 \(2022\)](#). [15] W. Mnasri, S. Chiroli, H. Ben Mahmoud, U. Leuga, H. Bouhriz, N. Girodon-Boulandet, N. Challab, D. Faurie, and F. Zighem, ACS Applied Nano Materials (2026), under review.