

Magnétisme et pompage de spin dans des systèmes hybrides à base de film supraconducteur

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 8 juillet 2026 pour l'ob-
tention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Mention : Physique

par

Théo COURTOIS

Membres du jury :

Directeurs de thèse :	M. Thomas HAUET	Maître de conférences HDR, Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy
	M. Éric FULLERTON	Professeur, Center for Memory and Recording Re- search, University of California San Diego
Président du jury :	M. Yvan SIDIS	Directeur de recherche CNRS, Institut Jean Lamour
Rapporteurs :	M. Vincent BALTZ	Directeur de recherche CNRS, SPINTEC CEA
	M. Tristan CREN	Directeur de recherche CNRS, Institut de NanoS- ciences de Paris, Sorbonne Université
Examinatrice :	Mme Charis QUAY	Maître de conférences, Laboratoire de physique des Solides, Université Paris-Saclay

Résumé

Les supraconducteurs en films minces présentent des propriétés électromagnétiques sensiblement différentes de celles des matériaux massifs, en raison notamment des effets de géométrie, de désordre et de confinement. La compréhension des mécanismes de pénétration du flux, de la dynamique des vortex et des interactions aux interfaces constitue ainsi un enjeu central, tant du point de vue fondamental que pour des applications en électronique supraconductrice et en spintronique.

Dans ce contexte, plusieurs questions restent ouvertes dans la littérature. D'une part, la réponse magnétique des films minces, en particulier dans des géométries fortement démagnétisantes, fait apparaître des comportements non conventionnels qui ne sont pas entièrement décrits par les modèles classiques. D'autre part, les propriétés de transport de spin aux interfaces supraconducteur/ferromagnétique font encore l'objet de résultats contradictoires, notamment concernant l'évolution du paramètre d'amortissement en dessous de la température critique.

Cette thèse s'inscrit dans ce cadre et vise à apporter une contribution expérimentale à ces problématiques à travers trois axes principaux.

Le premier axe concerne l'élaboration et la maîtrise de films minces supraconducteurs de NbN. Une attention particulière est portée à la croissance sur substrat MgO, bien documentée dans la littérature, ainsi qu'au développement d'une nouvelle voie d'élaboration sur couche tampon de Pt, conduisant à une croissance épitaxiée maclée malgré un fort désaccord de maille. Cette approche permet d'obtenir des hétérostructures adaptées à l'étude des phénomènes d'interface.

Le deuxième axe porte sur l'étude systématique des cycles d'aimantation dans des films minces supraconducteurs de différents matériaux, incluant à la fois des supraconducteurs de type I et de type II. L'objectif est de caractériser la réponse magnétique dans des régimes où les effets de géométrie et de dynamique des vortex deviennent prépondérants. Ces travaux ont notamment mis en évidence un régime d'inversion du cycle d'aimantation, observé dans certaines conditions de température, de champ et d'épaisseur, et qui constitue un résultat central de cette thèse.

Enfin, le troisième axe concerne l'étude de l'injection de spin dans des hétérostructures à base de NbN, par des mesures de résonance ferromagnétique. Des systèmes du type NbN/X/Py ($X = \text{Cu}, \text{Pt}$) ont été étudiés afin d'analyser l'évolution du paramètre d'amortissement à travers la transition supraconductrice. Les résultats obtenus mettent en évidence une diminution de l'amortissement en dessous de T_c , cohérente avec l'ouverture du gap supraconducteur dans le NbN et avec la réduction associée de l'absorption dissipative du courant de spin, sans signature claire de corrélations triplet dans les conditions étudiées.

L'ensemble de ces travaux permet ainsi d'apporter un éclairage nouveau sur la réponse magnétique des films supraconducteurs minces et sur les phénomènes d'interface impliquant des courants de spin, en lien direct avec les développements récents en supraconductivité et spintronique.

Abstract

Superconducting thin films exhibit electromagnetic properties that significantly differ from those of bulk materials, mainly due to geometrical effects, disorder, and confinement. Understanding the mechanisms of flux penetration, vortex dynamics, and interfacial interactions is therefore a key issue, both from a fundamental perspective and for applications in superconducting electronics and spintronics.

In this context, several questions remain open in the literature. On the one hand, the magnetic response of thin films, particularly in strongly demagnetizing geometries, exhibits unconventional behaviors that are not fully described by classical models. On the other hand, spin transport properties at superconductor/ferromagnet interfaces still lead to conflicting results, especially regarding the evolution of the damping parameter below the superconducting transition temperature.

This thesis aims to provide an experimental contribution to these issues through three main research directions.

The first part focuses on the growth and control of superconducting niobium nitride (NbN) thin films. Particular attention is given to deposition on MgO substrates, which are well documented in the literature, as well as to the development of an original growth route using a Pt buffer layer. This approach leads to twinned epitaxial growth despite a large lattice mismatch, and enables the fabrication of heterostructures suitable for interfacial studies.

The second part investigates the magnetic response of superconducting thin films. A systematic study of magnetization loops was carried out on various materials, including both type I and type II superconductors. The aim is to characterize regimes where geometrical effects and vortex dynamics become dominant. In particular, an inversion of the magnetization loop was observed under specific conditions of temperature, magnetic field, and thickness. This constitutes a central result of this thesis.

Finally, the third part addresses spin injection in NbN-based heterostructures using ferromagnetic resonance measurements. Systems of the type NbN/X/Py ($X = \text{Cu}, \text{Pt}$) were investigated in order to analyze the evolution of the damping parameter across the superconducting transition. The results show a decrease in damping below T_c , consistent with the opening of the superconducting gap in NbN and the associated reduction of dissipative spin absorption channels, with no clear signature of triplet correlations under the investigated conditions.

Overall, this work provides new insights into the magnetic response of superconducting thin films and interfacial phenomena involving spin currents, in direct connection with recent developments in superconductivity and spintronics.