

Ultrafast magneto-optical study of magnetization, spin accumulations, and spin-related torques

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 22 septembre 2026

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(en Physique)

par

Harjinder Singh

Composition du jury

Rapporteurs :	Dr. Prof. Liliana Buda-Prejbeanu	Spintec – Grenoble
	Dr. Jean-Yves Chauleau	CEA – SPEC
Examineurs :	Dr. Prof. Reinoud Lavrijsen	TU Eindhoven
	Dr. Prof. Davide Bossini	Universität Konstanz
	Dr. Prof. Michel Hehn	Université de Lorraine
Directeur de thèse :	Dr. Jon Gorchon	Université de Lorraine
	Dr. Gregory Malinowski	Université de Lorraine

Institut Jean Lamour - UMR 7198 - CNRS - Université de Lorraine

Département de Physique de la Matière et des Matériaux

Nanomagnétisme et électronique de spin

Résumé

La manipulation ultrarapide de l'aimantation constitue un défi majeur pour le développement de dispositifs de stockage de l'information plus rapides et plus économes en énergie. Dans ce contexte, la spintronique ultrarapide offre de nouvelles perspectives en exploitant les degrés de liberté de spin et en tirant parti du transport de spin pour manipuler et renverser l'aimantation. Ce transport de spin génère des accumulations de spin hors équilibre ; cependant, leur détection expérimentale ainsi que l'étude des couples qu'elles peuvent induire restent particulièrement difficiles, et leur rôle dans le renversement ultrarapide de l'aimantation demeure encore sujet à débat.

Cette thèse étudie la dynamique ultrarapide de systèmes magnétiques sous excitation optique femtoseconde et excitation électrique picoseconde, en utilisant des techniques magnéto-optiques résolues en temps. Dans un premier temps, nous examinons la capacité de l'effet Kerr magnéto-optique à distinguer la désaimantation ultrarapide de l'accumulation de spin dans des hétérostructures magnétiques soumises à différentes conditions d'excitation. Nous appliquons ensuite cette compréhension à l'étude du renversement ultrarapide de l'aimantation dans des vannes de spin ferromagnétiques et proposons un mécanisme de renversement responsable de la commutation tout-optique dans ces dispositifs. Enfin, nous étudions la dynamique ultrarapide induite par des impulsions de courant picosecondes dans différents systèmes afin d'explorer les couples de spin-orbite dans des hétérostructures associant un matériau ferromagnétique à un métal léger, présentant une forte efficacité de conversion charge-spin.

Mots-clés : Magnéto-optique, désaimantation ultrarapide, accumulation de spin, renversement ultrarapide de l'aimantation, couples de spin-orbite térahertz.

Abstract

Ultrafast magnetization manipulation is a key challenge for developing faster, more energy-efficient information-storage devices. For this, ultrafast spintronics offers new possibilities by exploiting spin degrees of freedom, leveraging spin transport to manipulate and reverse magnetization. Such spin transport creates non-equilibrium spin accumulation; however, probing these accumulations or their induced torques is believed to be strenuous, and their role in ultrafast magnetization reversal remains the subject of debate.

This thesis investigates the ultrafast dynamics of magnetic systems under femtosecond optical and picosecond electrical excitation using time-resolved magneto-optical techniques. First, we examine the magneto-optical Kerr effect's ability to distinguish ultrafast demagnetization from spin accumulation in magnetic heterostructures under different conditions. We then apply this understanding to study ultrafast magnetization reversal in ferromagnetic spin valves and propose a reversal mechanism responsible for all-optical switching in these devices. We then explore dynamics in different systems induced by picosecond current pulses to investigate spin-orbit torques in heterostructures consisting of a ferromagnet paired with a light metal, which exhibit high charge-to-spin conversion efficiency.

Keywords: Magneto-optics, ultrafast demagnetization, spin accumulation, ultrafast magnetization reversal, Terahertz spin-orbit torques.