

Titre: Dynamique de l'aimantation de nanostructures dans des régimes fortement hors-équilibre

Mots clés: Dynamique de l'aimantation, magnonique, nanomagnétisme, non-linéarité, Systèmes dynamiques, YIG

Résumé: Les ondes de spin ou magnons sont les excitations élémentaires de l'ordre ferromagnétique. Leur caractère ondulatoire, leurs propriétés de propagation anisotropes et ajustables, leurs gammes de fréquence (du GHz au THz) et de longueur d'onde (du μm au nm), l'absence de courant de charge associé au transport de spin, sont autant d'atouts pour les nouveaux paradigmes « beyond CMOS » de traitement de l'information et du signal dans le domaine micro-onde qui sont en train d'émerger.

Les propriétés fortement non-linéaires des ondes de spin, qui découlent de l'équation de la dynamique de l'aimantation, conduisent également à de nombreux phénomènes physiques intéressants. Ils se manifestent, entre autres, par l'apparition de dynamique bistable, de solitons, d'instabilités d'ondes de spin, d'auto-oscillations et de chaos. Le type de dynamique non-linéaire dépend d'une part du spectre d'ondes de spin de l'échantillon, que ses propriétés magnétiques, sa géométrie, et le champ appliqué déterminent, et d'autre part de l'excitation. Le développement récent de couches ultra-minces de grenats magnétiques, connus pour leur qualité dynamique inégalée, ouvre des opportunités pour contrôler ces effets non-linéaires. Premièrement, elles peuvent être nanostructurées de façon standard. La nanostructuration induit une quantification du spectre d'excitation, ce qui limite les interactions non-linéaires entre modes. Ensuite, il est possible d'ajuster par dopage leur anisotropie effective, responsable de la dépendance non-linéaire de la fréquence de précession. Enfin, elles peuvent être mises hors équilibre par des courants de spin à leur interface avec un métal à fort couplage spin-orbite.

L'objectif de cette thèse est d'étudier la dynamique fortement hors équilibre induite par un champ magnétique micro-onde dans des nanodisques de grenat d'yttrium fer (YIG) dopé au bismuth (Bi). Le dopage est choisi de façon à ce que l'anisotropie perpendiculaire de la couche mag-

nétique compense quasiment son anisotropie de forme, ce qui annule la dépendance non-linéaire de la fréquence de résonance. Les diamètres des disques étudiés, inférieurs au micron, permettent de confiner fortement les ondes de spin et d'obtenir un spectre discret. Le champ exciteur est appliqué grâce à une antenne micro-onde intégrée, et la dynamique résultante dans les nano-disques de BiYIG est détectée par un microscope de force par résonance magnétique (MRFM). La spectroscopie détaillée du régime linéaire, à faible amplitude d'excitation, met en évidence que le processus de nanofabrication réduit l'anisotropie à la périphérie des disques, et que les disques situés directement sous l'antenne micro-onde ont un amortissement accru. Cela n'empêche cependant pas d'atteindre des régimes fortement hors équilibre lorsque l'amplitude de l'excitation est augmentée. En particulier, la raie de résonance du mode principal dans la configuration hors du plan des disques de diamètre supérieur à 500 nm se fractionne et sature rapidement quand l'excitation augmente. Des simulations micromagnétiques reproduisent bien ce comportement inattendu, et permettent de l'attribuer à l'apparition d'une instabilité dynamique. Celle-ci correspond à une auto-modulation du profil de précession qui se localise très fortement et brièvement au centre du disque, de façon quasi-périodique ou chaotique, en fonction du réglage fin des paramètres de contrôle. Afin de sonder expérimentalement cette dynamique complexe, une spectroscopie à deux tons est mise en œuvre. Cette dernière révèle des spectres de modulation en fréquence reflétant la richesse des variations temporelles de la dynamique de l'aimantation au-delà du seuil d'instabilité. Des expériences et simulations complémentaires permettent d'attribuer ce comportement à des effets de taille finie et d'équilibre entre les différents termes d'anisotropie, et d'ébaucher un diagramme de phase sur le type de dynamique attendue en fonction des paramètres pertinents.

Title: Magnetization dynamics of nanostructures in strongly out-of-equilibrium regimes

Keywords: Magnetization dynamics, magnonics, nanomagnetism, non-linearity, dynamical systems, YIG

Abstract: Spin waves or magnons are the elementary excitations of the ferromagnetic order. Their wave character, their tunable and anisotropic propagation properties, their frequency (from GHz to THz) and wavelength (from μm to nm) ranges, the absence of charge current associated with spin transport, are all advantages for the new "beyond CMOS" paradigms of information and signal processing in the microwave domain that are emerging.

The strongly non-linear properties of spin waves, which result from the equation of magnetization dynamics, also lead to many interesting physical phenomena. Among others, they manifest themselves by the appearance of bistable dynamics, solitons, spin wave instabilities, auto-oscillations and chaos. The type of non-linear dynamics depends on one hand on the spin wave spectrum of the sample, which is determined by its magnetic properties, its geometry and the applied field, and on the other hand on the excitation. The recent development of ultra-thin layers of magnetic garnets, known for their unique dynamic quality, opens opportunities to control these non-linear effects. First, they can be nanopatterned in a standard way. The nanopatterning induces a quantization of the excitation spectrum, which limits the nonlinear interactions between modes. Secondly, it is possible by doping to adjust their effective anisotropy, responsible for the nonlinear dependence of the precession frequency. Finally, they can be put out of equilibrium by spin currents at their interface with a metal with strong spin-orbit coupling.

The objective of this thesis is to study the strongly out-of-equilibrium dynamics induced by a microwave magnetic field in bismuth (Bi) doped yttrium iron garnet (YIG) nanodisks. The doping is chosen so that the perpendicular anisotropy of

the magnetic layer almost compensates its shape anisotropy, thus canceling the nonlinear dependence of the resonant frequency. The diameters of the studied disks, smaller than one micron, allow to strongly confine the spin waves and to obtain a discrete spectrum. The exciting field is applied through an integrated microwave antenna, and the resulting dynamics in the BiYIG nano-disks are detected by a magnetic resonance force microscope (MRFM). A detailed spectroscopy of the linear regime, at low excitation amplitude, shows that the nanofabrication process reduces the anisotropy at the periphery of the disks, and that the disks located directly under the microwave antenna have an enhanced damping. However, this does not prevent reaching strongly non-equilibrium regimes when the excitation amplitude is increased. In particular, the resonance line of the main mode in the out-of-plane configuration of the disks with diameter larger than 500 nm splits and quickly saturates when the excitation increases. Micromagnetic simulations reproduce well this unexpected behavior, and allow to attribute it to the appearance of a dynamic instability. This instability corresponds to a self-modulation of the precession profile which localizes very strongly and briefly at the center of the disk, in a quasi-periodic or chaotic way, depending on the fine tuning of the control parameters. In order to experimentally probe this complex dynamics, a two-tone spectroscopy is implemented. The latter reveals frequency modulation spectra reflecting the richness of the temporal variations of the magnetization dynamics beyond the instability threshold. Further experiments and simulations allow us to attribute this behavior to finite size effects and to the balance between the different anisotropy terms, and to draft a phase diagram on the type of dynamics expected as a function of the relevant parameters.