

Le mouvement du spin d'électron dans des films ferromagnétiques

Introduction

Une piste importante pour l'amélioration des dispositifs, capteurs et mémoires magnétiques actuels, est une meilleure compréhension des phénomènes de transport polarisé en spin. Jusqu'à présent, l'électronique conventionnelle ne prend pas en compte l'existence du spin d'électron: dans tous les téléviseurs ou postes radios actuels, il y a autant d'électrons avec un spin „up“ que d'électrons avec un spin „down“. Jusqu'à la découverte de la magnétorésistance géante, il n'y a eu que très peu de tentatives pour utiliser le spin d'électron dans des applications électroniques.

Une des questions fondamentales dans le cadre de l'utilisation future du spin dans des dispositifs est: *Que se passe-t-il lors de l'interaction des électrons polarisés avec l'aimantation d'un film ferromagnétique?*

Parallèlement au phénomène d'absorption dépendant du spin d'électron, responsable de la magnétorésistance géante, il doit y avoir aussi une précession du spin. Alors que de nombreuses études ont été dédiées à la diffusion d'électrons polarisés par des ferromagnétiques, le phénomène de précession n'a été que très peu étudié. Notre expérience concerne ce deuxième aspect. Jusqu'à présent, dans toutes les expériences, le spin des électrons polarisés incidents était parallèle ou antiparallèle à la direction d'aimantation, ce qui ne produit pas de mouvement du spin (aucun couple n'est exercé sur le spin). Pour étudier ce mouvement du spin, il faut donc une géométrie non colinéaire. Ici, nous étudions la précession du spin dans un ferromagnétique constitué d'un film mince, en envoyant des électrons polarisés perpendiculairement à l'aimantation du film.

Ces études sont particulièrement motivées par l'observation très récente qu'un courant de spin d'une densité suffisante permet d'exciter l'aimantation dans un film mince, par transfert de moment angulaire des électrons incidents vers l'aimantation. Ce phénomène, prédit il y a plusieurs années, peut mener à un nouveau concept d'écriture de bit d'information sur un support ferromagnétique. En injectant un courant électronique polarisé en spin de haute densité à travers des nanocontacts, on a observé un renversement complet de l'aimantation.

Pour comprendre ce phénomène, il est nécessaire d'analyser le transfert de moment angulaire, en particulier le couple exercé entre le spin d'électron et l'aimantation. Comme le moment angulaire est conservé, le couple exercé sur l'aimantation par les électrons peut se déduire du déplacement angulaire du spin.

Principe de mesure

La réflexion des électrons polarisés en spin sur un film ferromagnétique montre un mouvement du vecteur polarisation, qui consiste en une précession autour de l'aimantation \vec{M} du film et un changement de l'angle entre la polarisation et l'aimantation (Fig. 1). Pour étudier ce mouvement du spin, on envoie des électrons polarisés en spin perpendiculairement orienté par rapport à l'aimantation du film.

La fonction d'onde d'un électron dont le spin est perpendiculaire à l'aimantation est une superposition cohérente de deux fonctions d'onde partielles, correspondant aux orientations "up" et "down", l'axe de quantification étant donné par la direction de l'aimantation :

$$\phi_0 \propto \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right].$$

Lorsque les électrons entrent en interaction avec la surface d'un ferromagnétique, les deux fonctions d'onde partielles sont diffusées différemment à cause de la sélectivité en spin de l'interaction d'échange, et ont des phases dépendant du spin. La fonction d'onde de spin est donc après l'interaction :

$$\psi \propto \left[R_{\uparrow} e^{-i\phi_{\uparrow}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + R_{\downarrow} e^{-i\phi_{\downarrow}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right]$$

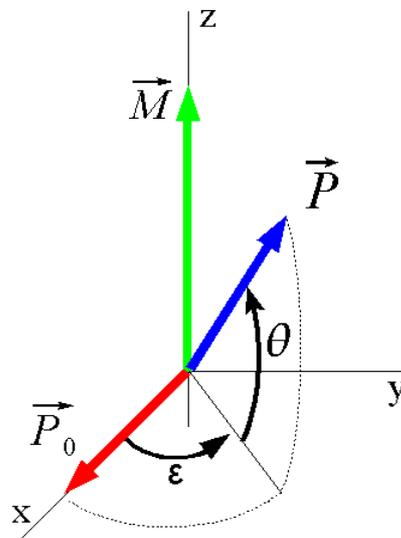


Figure 1 : Mouvement de la polarisation \vec{P} . \vec{P}_0 est la polarisation incidente, \vec{M} l'aimantation, ϵ l'angle de précession et θ l'angle de rotation.

où R_{\uparrow} , R_{\downarrow} , ϕ_{\uparrow} et ϕ_{\downarrow} sont respectivement les modules et les phases de l'amplitude de réflexion dépendant du spin. Par conséquent, la polarisation du faisceau d'électrons après l'interaction avec le ferromagnétique est donnée par:

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} P_0 R_{\uparrow} R_{\downarrow} \cos \epsilon \\ P_0 R_{\uparrow} R_{\downarrow} \sin \epsilon \\ (R_{\uparrow}^2 - R_{\downarrow}^2)/2 \end{pmatrix}$$

où ϵ est la différence des phases $\epsilon = \phi_{\downarrow} - \phi_{\uparrow}$.

Expérience

Le principe de notre expérience est montré sur la figure 2. Plus de détails sont montrés sur la figure 3. La figure 4 est une photo de la manip. Une source d'électron constituée d'une photocathode GaAs produit un faisceau d'électrons polarisés en spin par pompage optique avec de la lumière polarisée circulairement. En renversant la polarisation circulaire on inverse le vecteur de polarisation. On oriente le vecteur de polarisation perpendiculairement à l'aimantation du film. Le faisceau d'électrons frappe la surface à 45° de la normale de l'échantillon. Le film présente une aimantation rémanente le long d'un axe de facile aimantation, après l'application d'une impulsion d'un champ externe. Le faisceau réfléchi est analysé en énergie à travers un analyseur à grille retardatrice. Enfin, les électrons sont post-accelérés à 100 keV afin de mesurer le spin par un détecteur de Mott.

Pour distinguer la précession du spin de l'angle de rotation les directions de \vec{P}_0 et de \vec{M} sont interchangées au cours de la mesure. De cette façon on obtient quatre polarisations $\vec{P}(\pm\vec{P}_0, \pm\vec{M})$ correspondant aux quatre combinaisons possibles de la direction de la polarisation et de l'aimantation. En inversant la polarisation \vec{P}_0 , seul l'angle de précession change de signe, alors que l'inversion de l'aimantation change de signe à la fois de ε et de θ . Par conséquent, il est donc possible d'obtenir séparément la contribution de chaque mouvement. Cette technique d'inversion de la polarisation et de l'aimantation élimine aussi les effets de l'interaction spin-orbite dans le ferromagnétique.

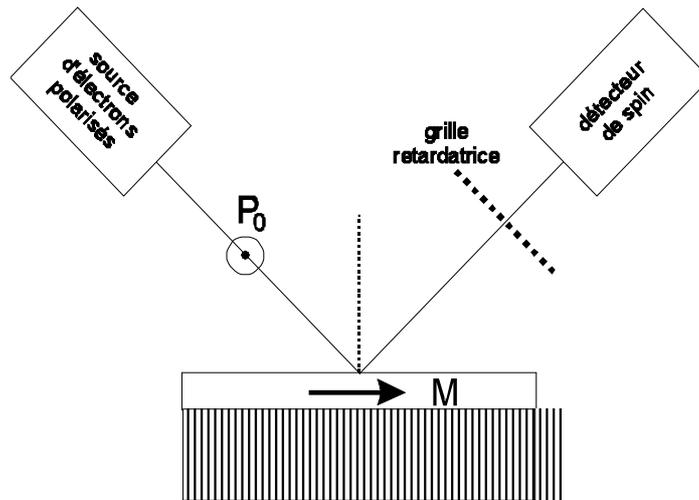


Figure 2: Principe de l'expérience. Un faisceau d'électrons polarisés émis par une source frappe un film ferromagnétique aimanté dans le plan du film, puis est analysé en énergie par un analyseur retardateur, puis en spin par un détecteur de Mott. La polarisation incidente \mathbf{P}_0 est perpendiculaire à l'aimantation \mathbf{M} .

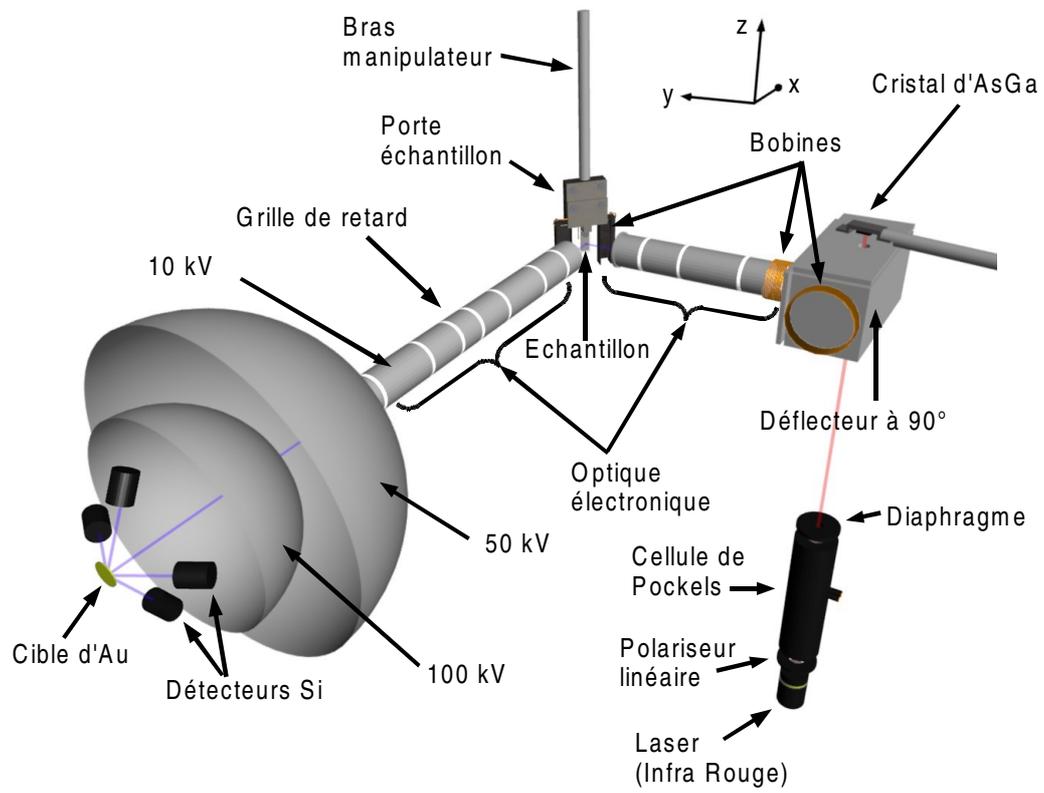


Figure 3

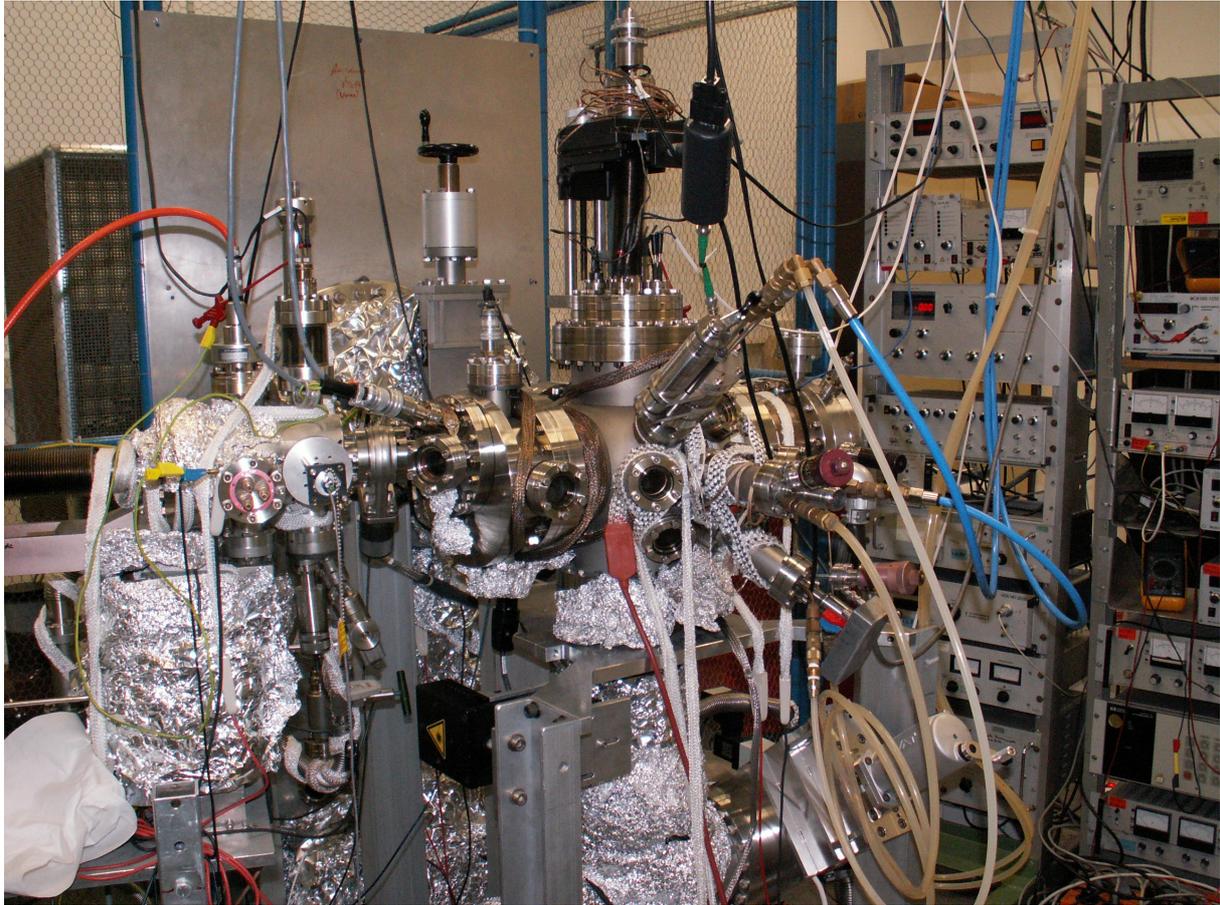


Figure 4

Résultats

(a) Des films poly-cristallins de Fe, Co et Ni [1-3]

Les couches ferromagnétiques ont été déposées in-situ sur une couche tampon d'Al poly-cristallin texturé (111) sur un substrat de verre à température ambiante. Ces couches se sont révélées être texturées bcc(110) pour le Fe, fcc(111) pour le Ni et hcp(0001) pour le Co.

La précession du spin prend des valeurs positive sur toute la gamme d'énergie étudiée (voir figure 5) ce qui a été aussi trouvé dans les expériences en transmission [4]. Contrairement aux films mono-cristallins dont leur comportement varie fortement [5] on s'attend à une faible variation de la précession du spin en fonction de l'énergie des électrons incidents ce qui ne pouvait être vérifié pour les trois ferromagnétiques qu'au-dessus d'une énergie des électrons $E-E_F$ d'environ 12 eV. Pour des énergies très basses, cependant, une forte augmentation s'est révélée. L'angle de rotation ϕ , de l'autre côté, montré une structure plus/moins dans la gamme d'énergie où la précession montre un pic (voir figure 6). Il est particulièrement intéressant de noter que ce comportement semble être indépendant du ferromagnétique. C'est dire que l'origine de cette observation doit être très générale.

Nous avons pu montrer que la partie constante s'explique par un modèle simple de marche de potentiel alors que la forte variation aux faibles énergies s'explique par la présence d'une bande interdite dépendante du spin dans la structure électronique des ferromagnétiques.

Des calculs *ab-initio* (collaboration avec M. Alouani et J. Kortus de l'IPCMS) sont en accord avec cette interprétation.

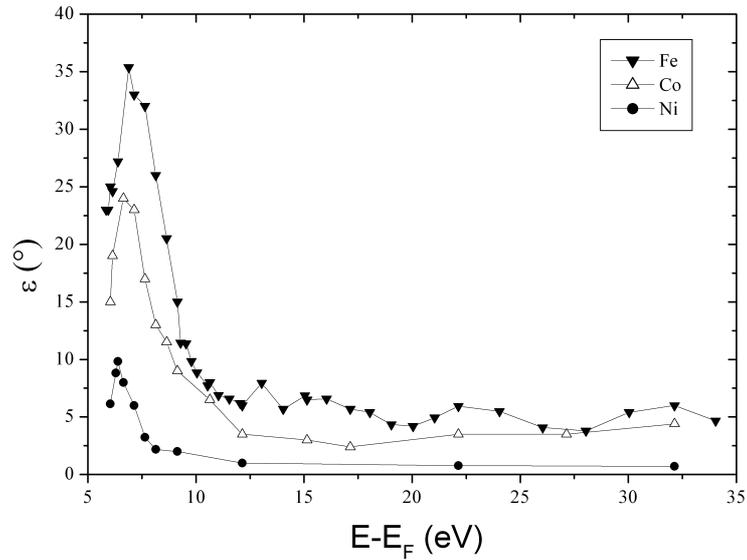


Figure 5 : L'angle de précession ε est montré en fonction de l'énergie primaire des électrons par rapport à l'énergie de Fermi pour les trois ferromagnétiques Fe, Co et Ni. Les films ferromagnétiques ont été déposés sur un substrat poly-cristallin de Au/verre.

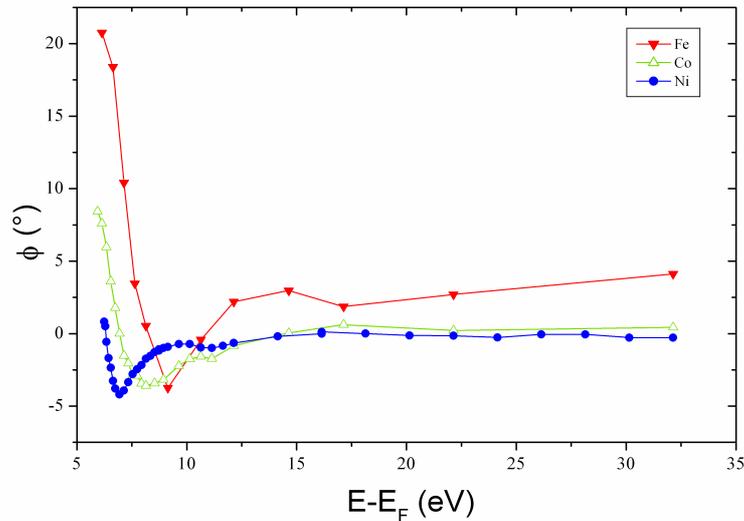


Figure 6 : L'angle de rotation ϕ est montré en fonction de l'énergie primaire des électrons par rapport à l'énergie de Fermi pour les trois ferromagnétiques Fe, Co et Ni. Les films ferromagnétiques ont été déposés sur un substrat poly-cristallin de Au/verre.

(b) Des états de puits quantiques dans Cu/Co(001)[6]

De nombreuses expériences ont déjà mis en évidence l'apparition d'états de puits quantiques dans des systèmes qui représentent des puits quantiques tels que le système Cu sur Co(001) [7]. L'existence d'états de puits quantiques est à l'origine de beaucoup de phénomènes oscillatoires dans des films minces, notamment le phénomène important du couplage

d'échange oscillatoire entre deux couches ferromagnétiques séparées par une couche non magnétique [7].

Nos résultats sur le système Cu sur Co(001) montrent des pics d'intensité en fonction de l'énergie des électrons incidents. En fonction de l'épaisseur de Cu, les positions d'énergie et le nombre de ces pics changent, indiquant clairement la présence d'états de puits quantiques dans notre système. A part ces variations en intensité nous pouvons également mettre en évidence (pour la première fois) un comportement oscillatoire de la précession du spin à la fois en fonction de l'énergie des électrons incidents et de l'épaisseur de Cu (voir figure 7). Ce comportement oscillatoire correspond bien à celui de l'intensité ce qui montre qu'un rapport étroit existe entre les oscillations de la précession du spin et l'existence d'états de puits quantiques.

Un modèle très simple d'interféromètre de type Fabry-Pérot peut bien modéliser les oscillations observées. En utilisant les résultats de ce modèle, une étude de l'interface Cu/Co(001) est possible et révèle que les propriétés magnétiques de la surface du Co(001) sont fortement changées par le dépôt de Cu.

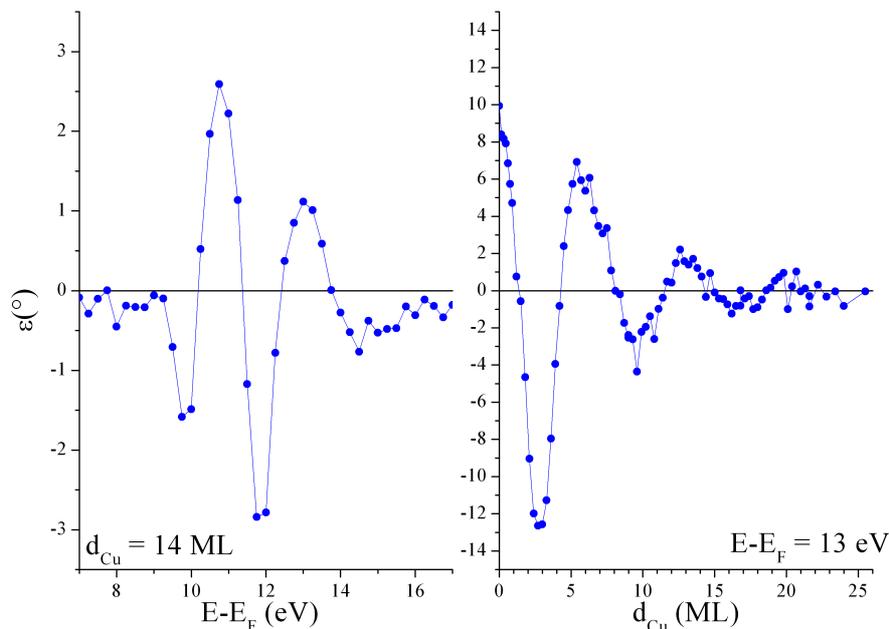


Figure 7 : L'angle de précession ε . (Gauche) En fonction de l'énergie primaire des électrons pour un film de Co(001) recouvert de 14 mono-couches de Cu. (Droite) En fonction de l'épaisseur de Cu à $E-E_F = 13 \text{ eV}$.

Références

- [1] L. Joly, J.K. Ha, W. Weber, Materials Science and Engineering B 126, 126 (2006)
- [2] L. Joly, J.K. Ha, M. Alouani, J. Kortus, W. Weber, Phys. Rev. Lett. 96, 137206 (2006)
- [3] L. Joly, J.K. Ha, W. Weber, IEEE Trans. Magn. 42, 2645 (2006)
- [4] W. Weber et al., Science 291, 1015 (2001)
- [5] W. Weber et al., Phys. Rev. B 66, R100405 (2002)

- [6] L. Joly, L. Tati-Bismaths, W. Weber, Phys. Rev. Lett. 97, 187404 (2006)
[7] J.E. Ortega and F.J. Himpsel, Phys. Rev. Lett. 69, 844 (1992)