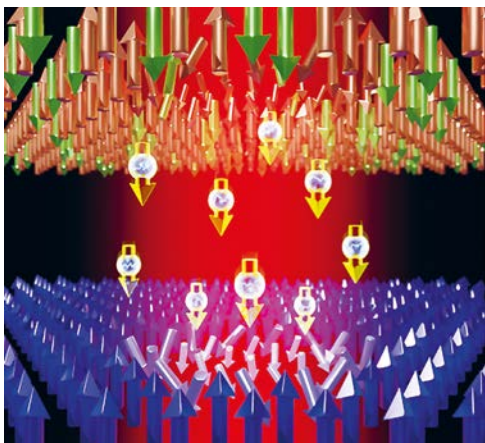


# RETOURNEMENT D'AIMANTATION DANS UN DISPOSITIF « SPINTRONIQUE » PAR IMPULSION D'ÉLECTRONS UNIQUE ULTRA-COURTE

Michel HEHN<sup>1</sup>, Gregory MALINOWSKI<sup>1</sup>, Stéphane MANGIN<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Institut Jean Lamour, (UMR-CNRS 7198), Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

\*stephane.mangin@univ-lorraine.fr



Portée par l'internet des objets et l'intelligence artificielle, la quantité de données générées et stockées augmente de manière exponentielle. A l'horizon 2030, 20% de l'électricité mondiale sera utilisée pour le stockage et la gestion des données. Une très large majorité des données est stockée sur des surfaces magnétiques. Nous démontrons que nous pouvons retourner l'aimantation d'une couche ferromagnétique, donc écrire de l'information, grâce à un seul pulse laser femto-seconde.

<https://doi.org/10.1051/photon/202110836>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

**D**epuis plus de deux décennies, l'utilisation d'impulsions lasers femtosecondes a permis d'étudier les phénomènes physiques régissant la dynamique ultrarapide de l'aimantation de films minces magnétiques donnant naissance au domaine du femtomagnétisme. Récemment, les effets de transport dépendant du spin à l'échelle de temps de la femtoseconde induit par l'absorption d'impulsions laser ont permis de fusionner le femtomagnétisme et la *spintronique*, rendant possible le renversement de l'aimantation d'une couche ferromagnétique par une impulsion laser unique dans des multicouches

magnétiques. En effet, grâce à une seule impulsion laser d'une durée de quelques dizaines de femtosecondes, il est possible de retourner l'aimantation d'une couche ferromagnétique contenue dans un dispositif *Spintronique* appelé *vanne de spin* (deux couches magnétiques séparées par une couche conductrice). Il est démontré que dans ce dispositif, l'impulsion laser désaimante l'une des deux couches magnétiques créant ainsi un courant de spin ultra-court. Ce courant de spin permet de retourner l'aimantation d'une multicouche de Co/Pt ferromagnétique. L'énergie nécessaire pour ce renversement d'aimantation peut être contrôlée en modifiant les propriétés des différentes couches.

## INTRODUCTION

Les travaux pionniers de J.Y. Bigot et E. Beaurepaire en 1996 à Strasbourg ont ouvert le domaine de la dynamique de l'aimantation ultra-rapide ou femto-magnétisme. À l'aide de mesures optiques pompe sonde, ils ont démontré qu'il est possible de désaimanter un film de nickel en un temps inférieur à la picoseconde avec une impulsion laser de 60 fs. Néanmoins, il a fallu attendre 2007 pour que le groupe de T. Rasing à Nijmegen démontre la possibilité de manipuler l'aimantation de manière déterministe uniquement avec des impulsions lumineuses ultra-courtes et sans aucun champ magnétique appliqué. Ce phénomène a été nommé

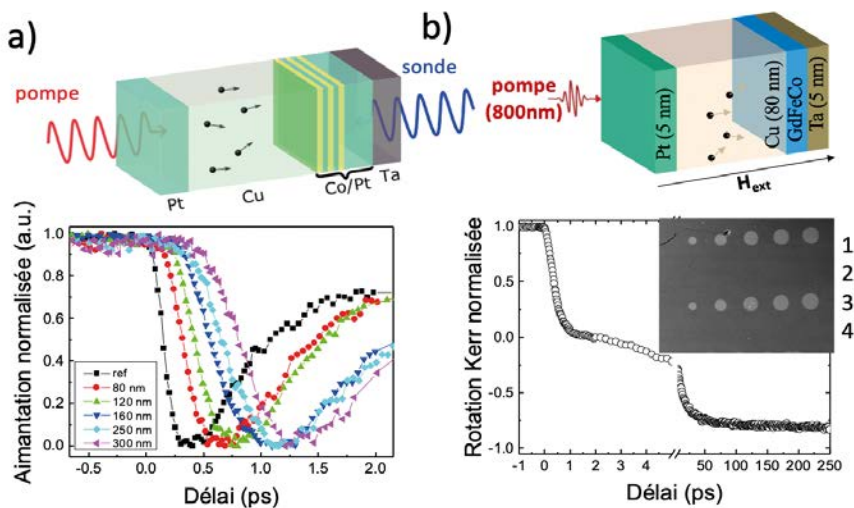
« retournement tout optique » ou « *All Optical Switching* » (AOS). Ces travaux ont attiré une attention croissante car les processus menant à la désaimantation comme au retournement de l'aimantation restent largement incompris. Ils nécessitent en effet une compréhension de phénomènes fortement hors équilibre se produisant à différentes échelles de temps allant de la femto-seconde à la pico-seconde. Ces résultats permettent d'envisager des applications dans le domaine de l'électronique de Spin ou *Spintronique* ultra-rapide pour le stockage et le traitement des données. En effet, la quantité de données générées chaque année augmente exponentiellement et cette tendance s'accélère avec le développement de l'intelligence Artificielle (AI) et de l'internet des Objets (IOT). En 2024 la quantité d'information générée sera de 11,2 Zettabytes ( $10^{21}$  bytes). 50 % de ces informations seront stockées sur des disques durs pour la plupart dans des data centers. Il est donc essentiel de trouver des solutions pour un stockage et un traitement des données rapide et consommant peu d'énergie. L'AOS permet d'envisager de telles possibilités avec un retournement d'aimantation

1000 fois plus rapide et consommant 10 fois moins d'énergie par rapport aux technologies actuelles.

### RETOURNEMENT D'AIMANTATION TOUT OPTIQUE (AOS)

Notons tout d'abord que la méthode conventionnelle pour retourner l'aimantation est d'appliquer un champ magnétique. Cette méthode qui reste largement utilisée pour le stockage de l'information sur disque dur permet de retourner l'aimantation en 1nanoseconde. Au cours des 10 dernières années, de nombreuses études ont été menées afin de démontrer le retournement d'aimantation tout optique (AOS). Les effets de la fluence (énergie par unité de surface), de la durée et de la polarisation de l'impulsion laser ainsi que la nature des matériaux ont été étudiés en détail. L'impulsion laser peut en effet être polarisée circulairement droite, circulairement gauche ou linéairement ce dernier étant une combinaison des deux polarisations circulaires.

Deux types d'AOS distincts ont été identifiés : le retournement d'aimantation tout optique indépendant de l'hélicité, ou *All Optical – Helicity* ●●●



**Figure 1.** a) Représentation schématique de la multicouche utilisée pour étudier la désaimantation induite par impulsion de courant d'électrons chauds non polarisés (haut). Dynamique de désaimantation induite par impulsion d'électrons chauds dans une multicouche de Co/Pt pour différentes épaisseurs de couche séparatrice de Cu (bas). b) Représentation schématique de la multicouche utilisée pour étudier le renversement de l'aimantation d'une couche de GdFeCo induite par impulsion de courant d'électrons chauds non polarisés (haut). Dynamique de renversement de l'aimantation d'une couche de GdFeCo induite par impulsion d'électrons chauds (bas). Insert : image de microscopie Kerr montrant les domaines magnétiques renversés par une impulsion unique d'électrons chauds pour différentes puissances (croissante de gauche à droite). Les chiffres 1 à 4 correspondent au nombre d'impulsions montrant le caractère déterministe du renversement.



La Solution à vos mesures



## EVALUATION DE LA DANGEROUSITÉ DES SOURCES LUMINEUSES



**Specbos 1211**  
**UV-VIS-NIR**  
**portable**  
MESURES SPECTRALES  
DE PRÉCISION

### Excellent rapport qualité/prix

- **Spectroradiomètre large bande**
  - UV - VIS - NIR
  - traçable NIST
- **2 modes**
  - luminance énergétique
  - éclairage énergétique
- **Fonctionnalités**
  - Luminance
  - radiance/ irradiance
  - éclairage
  - coordonnées xy et u v
  - valeurs RVB
  - longueur d'onde dominante
  - pureté des couleurs
  - température de couleur
  - indice de rendu des couleurs

ScienTec c'est aussi, la distribution de :

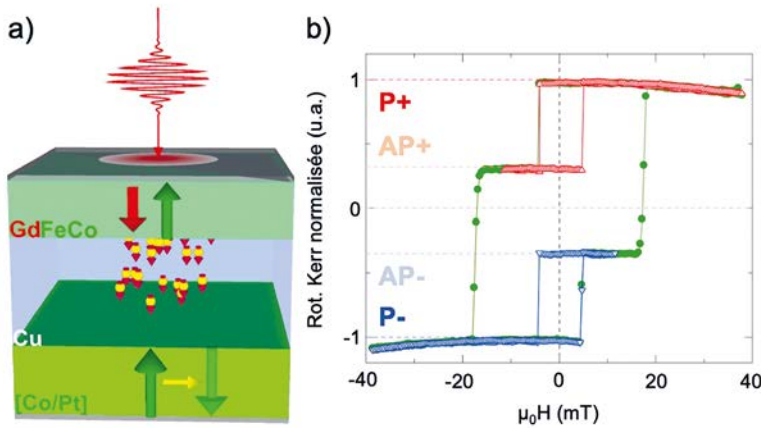
Luxmètres,  
Photomètres,  
Chromamètres,  
Vidéo-colorimètres,  
Photogoniomètres,  
Sources de référence...







info@scientecc.fr - 01 64 53 27 00 - www.scientecc.fr



**Figure 2.** Représentation schématique du système GdFeCo / Cu / [Co / Pt] où les aimantations du GdFeCo et du [Co / Pt] pointent perpendiculairement au plan du film et sont séparées par une couche de Cu. b) Mesure de la rotation magnéto-optique Kerr normalisée ( $\theta_K$ ) en fonction du champ magnétique (H) appliqué perpendiculairement au plan du film. Les symboles ouverts rouge et bleu sont des boucles mineures correspondant à l'inversion de l'aimantation de GdFeCo qui sont parfaitement centrées autour de l'axe de champ zéro.

*Independent Switching* (AO-HIS), et le retournement d'aimantation tout optique dépendant de l'hélicité, ou *All Optical – Helicity Dependent Switching* (AO-HDS). L'AO-HIS est observé après une unique impulsion laser et plus la durée du pulse laser est courte plus la fluence nécessaire au retournement peut être réduite. Malheureusement ce phénomène n'est observé que pour un nombre restreint de matériaux dont la plupart sont à base de Gadolinium tels que les alliages GdCo, GdFeCo mais aussi les multicouches Gd/Co ou Gd/FeCo. Ces alliages et multicouches sont ferrimagnétiques. Ils sont donc composés de deux sous-réseaux magnétiques couplés antiferromagnétiquement ce qui semble être un critère essentiel à l'obtention du renversement magnétique par impulsion unique. Plus récemment, ce phénomène a également été mis en évidence dans les alliages  $Mn_2RuGa$  dans lesquels les moments magnétiques des deux sous-réseaux de Mn sont également couplés antiferromagnétiquement.

L'AO-HIS a été décrit par des mécanismes thermiques conduisant à la désaimantation des deux sous-réseaux magnétiques à des vitesses différentes et générant ainsi un état transitoire ferromagnétique de même qu'un

transfert de moment cinétique entre le sous-réseau de Gd et le sous-réseau de métal de transition comme le fer ou le cobalt. Plus récemment, ce type de retournement d'aimantation a non seulement été observé dans le cas d'une impulsion de lumière, mais aussi pour des impulsions électroniques femtosecondes.

Dans un métal, les photons du pulse laser sont absorbés, générant des électrons chauds ayant une énergie bien supérieure à celle du niveau de Fermi. Il est ainsi possible de créer des impulsions d'électrons chauds d'une durée comparable à celle de l'impulsion laser et d'utiliser ces électrons pour manipuler ou modifier l'état magnétique d'une couche qui ne peut être excitée directement avec la lumière. Nous avons ainsi démontré que ces électrons chauds générés par l'absorption dans une couche de Pt peuvent induire la désaimantation d'une multicouche de Co/Pt après avoir traversé jusqu'à 300 nm de Cu (figure 1.a).

En utilisant une couche ferrimagnétique de GdFeCo à anisotropie magnétique perpendiculaire recouverte d'une épaisse couche de Cu, nous avons prouvé qu'il est possible de renverser l'aimantation de façon déterministe à l'aide d'une impulsion d'électrons

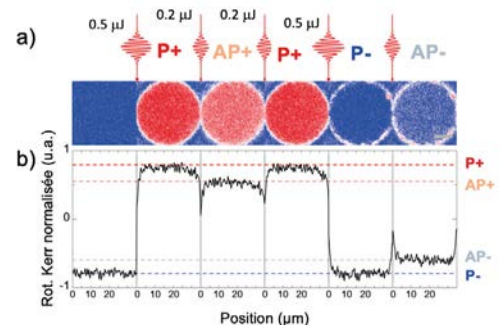
chauds sans application d'un champ magnétique. La dynamique de renversement est identique à celle mesurée pour une excitation laser directe démontrant le caractère ultra-rapide du transport d'électrons chauds dans la couche de Cu. Ces résultats permettent d'envisager l'intégration d'une telle couche dans une cellule mémoire magnétique unique. Cette mémoire pourrait être un dispositif d'électronique de spin de type jonction tunnel magnétique ou vanne de spin.

Nous allons voir par la suite qu'il est possible de polariser le courant d'électrons chauds afin d'obtenir le retournement d'aimantation d'une couche ferromagnétique grâce à une seule impulsion laser dans une

structure de type « vanne de spin ».

La vanne de spin est un dispositif d'électronique de spin constituée de deux couches magnétiques séparées par une couche non magnétique, typiquement du Cu. Ce dispositif d'électronique de spin, pour lequel des effets de magnétorésistance géante ont été observés, est utilisé dans les mémoires magnétiques (MRAM pour *Magnetic Random Access Memory*).

**Figure 3.** Retournement d'aimantation vers les quatre configurations magnétiques possibles de la structure de vanne de spin GdFeCo / Cu / [Co / Pt] à l'aide d'impulsions lumineuses uniques d'une durée de 35 fs. Images (a) et contrastes magnétiques (b) des configurations magnétiques obtenues expérimentalement après des impulsions optiques uniques. A partir d'un état saturé P- (resp. P+) une seule impulsion intense (d'énergie  $0,5 \mu J$ ) induit une commutation dans l'état P+ (resp. P-). Une seule impulsion lumineuse modérée (d'énergie  $0,2 \mu J$ ) induit une transition d'un état P- (resp. P+) à un état AP- (resp. AP+).



La vanne de spin GdFeCo / Cu / [Co / Pt], est schématisé en Fig.2a. Nous avons pu démontrer que les deux couches magnétiques n'étaient pas couplées. En effet, sur la Fig. 2b est présenté le cycle d'aimantation obtenu en mesurant l'aimantation de la vanne de spin en fonction du champ appliqué perpendiculairement au plan de la couche.

On peut observer deux sauts bien distincts pour le retournement de l'aimantation du GdFeCo en champ faible et le retournement de l'aimantation de la multicouche ferromagnétique [Co / Pt] en champ plus fort. Le cycle mineur en rouge correspondant au retournement de la couche de GdFeCo uniquement est centré autour du champ nul ce qui prouve que les deux couches magnétiques ne sont pas couplées. Ce cycle démontre que 4 états magnétiques clairement définis sont accessibles à l'aide d'une histoire en champ magnétique. Ils correspondent aux deux couches alignées parallèlement dans la direction des champs positifs (P+) ou négatifs (P-) ou anti-parallèlement avec l'aimantation de la couche de GdFeCo dans la direction des champs positifs (AP+) ou négatifs (AP-).

La figure 3 permet de démontrer le retournement de l'aimantation d'une ou de deux couches magnétiques

avec une impulsion laser femtoseconde unique. En effet pour une impulsion d'intensité modérée (0,2  $\mu$ J), il est possible de retourner la couche de GdFeCo seulement et donc induire une transition de P+ vers AP+ ou de P- vers AP- tandis que pour une impulsion plus intense, les aimantations des deux couches sont renversées.

Le mécanisme expliquant ce phénomène est le suivant. L'impulsion laser absorbée par la multicouche provoque la désaimantation des deux sous-réseaux de Gd et de FeCo dans l'alliage GdFeCo. Ces désaimantations génèrent des courants de spin afin d'assurer la conservation du moment cinétique. Même si ces courants possèdent des polarisations opposées du fait du couplage antiferromagnétique entre les sous-réseaux, le courant de spin dû à la désaimantation du Gd s'étend sur un temps bien plus long, supérieur à 10 ps du fait de sa dynamique plus lente. Ce dernier interagit avec l'aimantation de la couche de Co/Pt qui est au préalable réduite par l'absorption de l'impulsion laser. Ainsi, l'accumulation de spin injectée dans la couche de Co/Pt possédant une polarisation opposée à son aimantation est suffisamment importante pour la renverser.

En résumé, nous avons étudié la possibilité de retourner l'aimantation

de différentes couches ferromagnétiques (FM) grâce à une seule impulsion laser femtoseconde dans des dispositifs d'électronique de spin à base de vannes de spin de type GdFeCo/Cu/FM. Les résultats mettent en évidence le mécanisme conduisant au retournement d'aimantation avec une impulsion laser unique où les rôles de l'épaisseur de la couche ferromagnétique, de sa température de Curie et de la durée de l'impulsion sont essentiels. Sur la base des résultats obtenus, nous avons développé un modèle phénoménologique qui permet de reproduire la plupart des résultats expérimentaux. Ce travail va nous permettre de concevoir des matériaux ferromagnétiques dont le retournement d'aimantation peut se produire rapidement en utilisant peu d'énergie. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] C. Lambert *et al.*, *Science* **345**, 1337–1340 (2014).
- [2] Y. Xu *et al.*, *Adv. Mater.* **29**, 1703474 (2017)
- [3] S. Iihama *et al.*, *Adv. Mater.* **30**, 04004 (2018)
- [4] J. Igarashi *et al.*, *Nano Lett.* **20**, 8654 (2020)
- [5] Q. Remy *et al.*, *Adv. Sci.* **7**, 2001996 (2020)

## SPECTROGON

State of the art products

### Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



### Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télècom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000  
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800  
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

[www.spectrogon.com](http://www.spectrogon.com)