

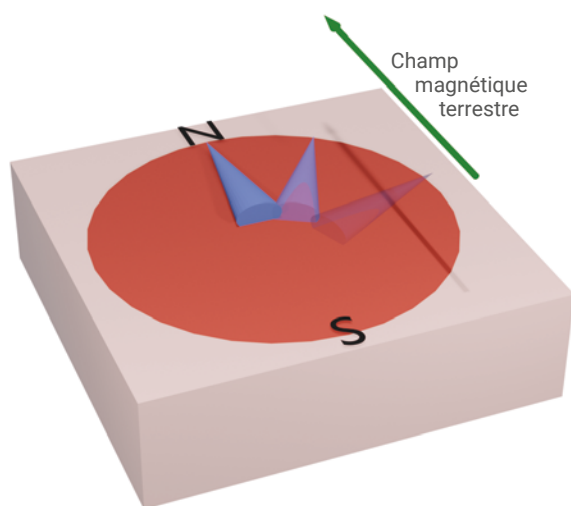
Le magnétisme et l'optique

au carrefour de l'électronique de spin ultrarapide

Jon Gorchon (jon.gorchon@univ-lorraine.fr)

Institut Jean Lamour (UMR 7198 CNRS et Université de Lorraine)
Campus Artem, 2 allée André Guinier, BP 50840, 54011 Nancy Cedex

Le magnétisme est omniprésent dans notre vie : boussoles, moteurs électriques, transformateurs, stockage magnétique pour le "cloud"... Comprendre comment l'aimantation d'un aimant se comporte face à des forces magnétiques extérieures est donc primordial. Le domaine de l'électronique de spin ultra-rapide s'intéresse à la dynamique des systèmes magnétiques aux échelles temporelles de la pico et de la femtoseconde, en essayant de les manipuler à l'aide de plusieurs leviers tels que la lumière, la chaleur ou les courants électriques.

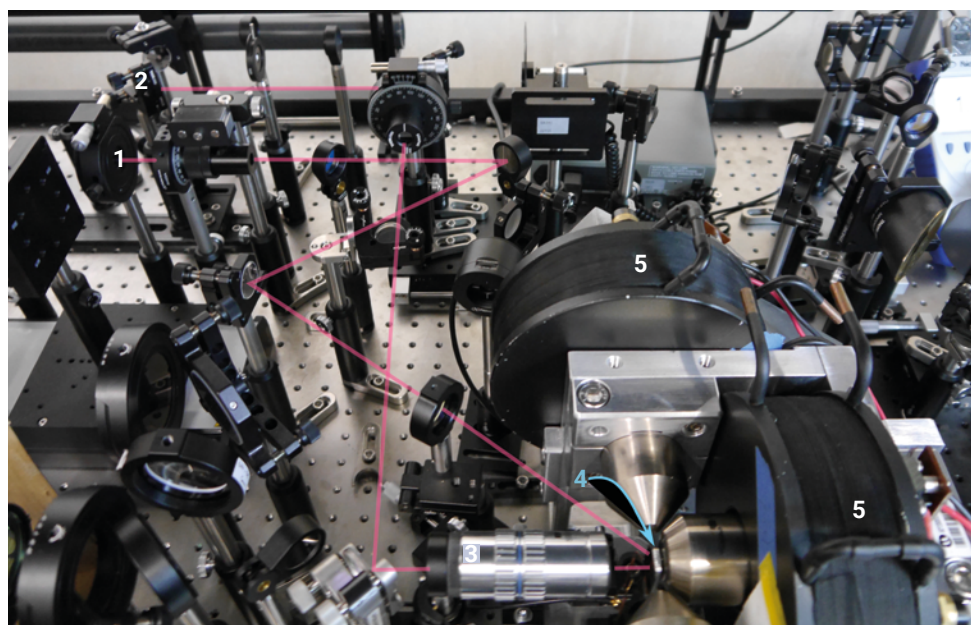


1. Illustration d'une boussole. Le champ magnétique terrestre (flèche verte) pointe vers le nord (N). La pointe magnétique (bleue) de la boussole se réoriente dans la direction du nord, et cela prend un certain temps.

Si un aimant est baigné dans un champ magnétique, son aimantation va s'orienter parallèlement au champ, comme une boussole qui suivrait le champ magnétique terrestre (fig. 1). Que se passe-t-il si nous appliquons ce champ magnétique uniquement pendant une durée extrêmement courte ? Intuitivement, cela laisserait peu de temps à l'aimantation pour s'orienter. Il faudrait alors augmenter l'intensité du champ magnétique pour que l'aimantation tourne plus vite et achève son mouvement à temps. Nous pouvons continuer à réduire encore la durée d'application du champ tout en augmentant son intensité... mais quelle serait la limite ? Quelle est la vitesse ultime de manipulation de l'aimantation ? Pourrait-on la faire tourner de 180 degrés avec, par

exemple, un champ magnétique qui durerait moins d'une picoseconde (10^{-12} s) ? Et comment générerait-on un tel champ magnétique ?

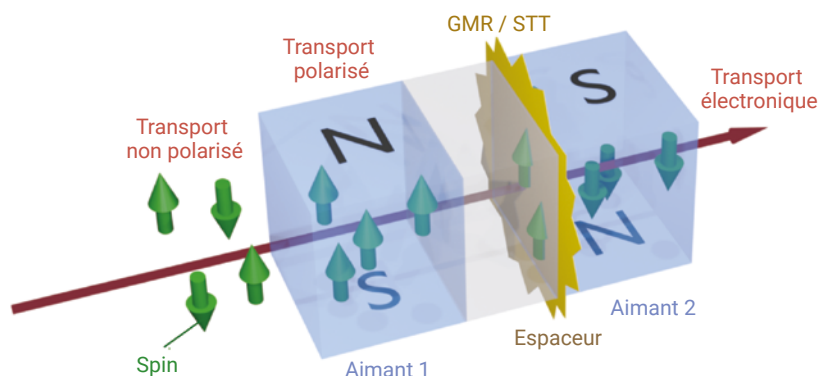
Ces questions très fondamentales intéressent les physiciens depuis bien longtemps. Expérimentalement elles posent beaucoup de difficultés, car il n'est évidemment pas simple de générer des champs magnétiques d'une durée aussi courte, ni d'observer ce qui a lieu à ces échelles de temps ! Néanmoins, il existe de nos jours des méthodes optiques et électroniques qui ouvrent la porte à ces échelles de temps et qui démontrent que les aimants se comportent alors de façon étonnante. Ce champ fascinant de la physique de la matière condensée est parfois appelé « l'électronique de spin ultrarapide ».



© Jon Gorchon

L'électronique de spin

L'électronique de spin [1] est un domaine de la physique qui s'intéresse aux courants électroniques en considérant leur *spin* (flèches vertes sur la figure 2). En effet, l'orientation du spin d'un électron peut changer son transport dans certains matériaux. Ceci est notamment visible dans un empilement de deux couches métalliques magnétiques d'épaisseur nanométrique, espacées par une fine couche métallique non magnétique (fig. 2). L'espaceur non magnétique sert uniquement à découpler les deux couches magnétiques, de façon à permettre un alignement parallèle ou antiparallèle des aimantations. Quand un courant d'électrons traverse la première couche magnétique, il devient *polarisé* selon l'aimantation locale (une majorité des spins deviennent parallèles), car la conductivité dans les aimants dépend du spin. Jusqu'ici la résistance électrique est la même, indépendamment de la direction de l'aimantation. Si ensuite ce courant polarisé atteint la deuxième couche magnétique, la résistance électronique dépendra alors fortement de l'orientation de son aimantation, encore à cause des différentes conductivités. Cet effet, nommé la magnétorésistance géante (GMR) a valu le prix Nobel au Français Albert Fert et à l'Allemand Peter Grünberg en 2007 [1]. Depuis, l'effet est exploité dans des capteurs de champ magnétique, qui sont utilisés dans une multitude d'applications, dont la détection de



2. Le transport de spin dans des multicouches magnétiques. Le courant d'électrons (en rouge) porte des spins, qui sont initialement aléatoirement orientés (transport non polarisé). Ensuite, dans le premier aimant, le courant devient polarisé selon l'aimantation locale. Ce courant polarisé conserve (toute ou une partie de) sa polarisation dans l'espaceur métallique. Finalement, à l'interface avec le deuxième aimant, la résistance électrique dépendra des spins transportés ainsi que de l'aimantation. C'est la magnétorésistance géante (GMR). Similairement, les spins transportés peuvent agir sur l'aimantation locale et induire un couple. C'est le couple de transfert de spin (STT).

positions, celle des vitesses de rotation des roues dans les voitures ou la détection de courants électriques (à travers l'induction).

La magnétorésistance correspond à une modification du transport électronique due à l'orientation relative des couches magnétiques. Cependant, l'effet inverse existe aussi : la modification des orientations magnétiques due au transport électronique. C'est ce que l'on appelle le *couple de transfert de spin* (STT, pour l'anglais *spin transfer torque*). Les spins (électroniques)

transportés d'une couche magnétique vers l'autre agissent comme un champ magnétique local et peuvent modifier l'aimantation de cette deuxième couche. Le résultat : une façon de manipuler l'aimantation, compacte et efficace, sans besoin de champs magnétiques. C'est l'un des mécanismes piliers de l'électronique de spin moderne. Désormais, ce mécanisme est exploité dans certains types de mémoires d'ordinateurs [1]. Plus récemment, de nouvelles façons de polariser les courants sans l'utilisation

>>>

“ Il existe aujourd’hui de nombreux moyens pour manipuler l’aimantation autres que celle des champs magnétiques : la chaleur, les champs électriques, les contraintes mécaniques, le son, la lumière...”

>>>

d’une première couche magnétique ont été découvertes, telle que *l’effet Hall de spin* [2]. En effet, quand un courant électronique traverse un matériau (contenant souvent des éléments lourds) à forte interaction spin-orbite, les électrons peuvent subir une déviation de leur trajectoire qui dépend de leur spin. Ceci résulte en un courant de spin, purement de moment angulaire et non plus de charge, qui est transverse au courant électronique. Il est donc possible de générer des courants de spin en faisant simplement circuler un courant électrique dans une couche d’un métal lourd, par exemple du platine. Ces méthodes ont ouvert de nombreuses possibilités au domaine de l’électronique de spin.

En vingt ans, l’électronique de spin s’est étendue aux matériaux non magnétiques, aux isolants, aux semi-conducteurs et même aux supraconducteurs. De plus, il existe aujourd’hui de nombreux moyens pour manipuler l’aimantation autres que celle des champs magnétiques : la chaleur, les champs électriques, les contraintes mécaniques, le son, la lumière... Comme avec le *couple de transfert de spin*, leur effet peut souvent être interprété comme un champ magnétique virtuel qui agit sur l’aimantation. Ces différents leviers sont actionnables par une grande variété de méthodes, certaines ouvrant l’électronique de spin aux échelles de temps ultracourtes.

Accéder aux échelles ultrarapides

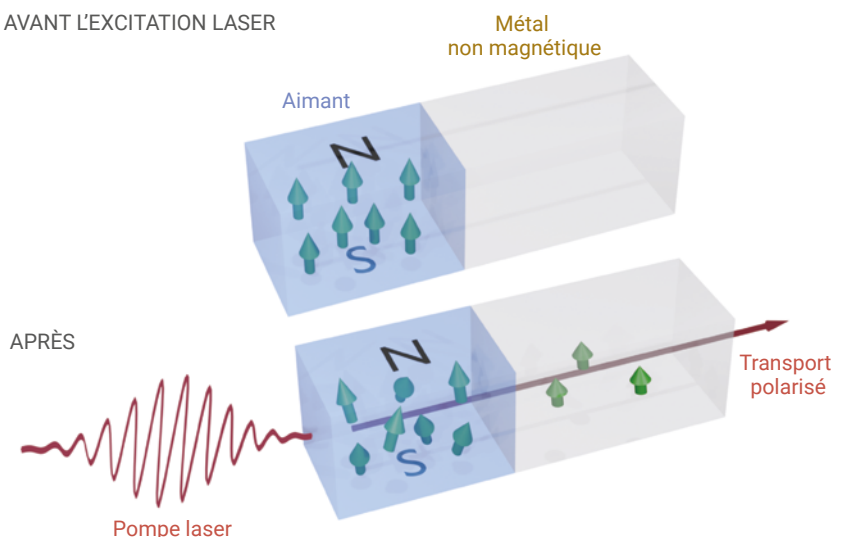
Afin de pouvoir étudier les phénomènes rapides, il est primordial d’avoir des sources rapides. Cela se traduit par la nécessité de fréquences élevées (conséquence de la transformée de Fourier). Avec l’électronique, il est relativement simple de générer des signaux électromagnétiques intenses dont la fréquence atteint le gigahertz, et il est donc possible de générer des impulsions de quelques nanosecondes. Au-delà, cela devient compliqué. Une solution consiste à passer dans le domaine de l’optique, où les ondes électromagnétiques sont de très haute fréquence, et d’utiliser des lasers impulsionnels. Certains de ces lasers peuvent générer des impulsions atteignant la femtoseconde (fs, 10^{-15} s), avec une énergie d’impulsion très élevée (de l’ordre du microjoule). Ces hautes densités d’énergie sont atteignables notamment grâce à la technique d’amplification par dérive de fréquence mise au point par le Français Gérard Mourou et la Canadienne Donna Strickland, prix Nobel 2018 [3]. En effet, cette méthode permet d’augmenter l’énergie d’une impulsion laser tout en contournant l’endommagement des composants internes du laser qui la limitaient

auparavant. Ceci est obtenu simplement en jouant sur la durée de l’impulsion avant et après l’amplification, de façon à répartir l’énergie dans le temps et à éviter une énergie instantanée trop élevée dans la cavité laser.

Ces impulsions ultracourtes peuvent être utilisées pour exciter tous types de matériaux, magnétiques ou non. Pour analyser la réponse de ces systèmes, il faut alors pouvoir détecter les changements des propriétés du matériau après l’excitation optique. Malheureusement, il n’existe pas de détecteurs fonctionnant à la femtoseconde. Pour détecter des réponses ultrarapides, une technique connue sous le nom de « pompe-sonde » est employée ; elle permet l’utilisation de détecteurs lents pour capturer des événements extrêmement courts. Le principe est simple [4] : imaginons vouloir faire une vidéo au ralenti de la trajectoire d’une balle lancée en l’air avec une résolution d’une milliseconde, mais que cette résolution soit beaucoup trop importante pour votre caméra. Une manière de contourner la lenteur de votre caméra est d’utiliser un simple flash. La méthode serait alors :

- 1) d’éteindre la lumière de la pièce,
- 2) d’ouvrir l’obturateur de la caméra pour commencer à prendre la photo,
- 3) de lancer la balle en l’air,

AVANT L’EXCITATION LASER



3. Aimantation ultrarapide induite par une impulsion laser.

(a) Avant l’excitation laser, l’aimant est à température ambiante, parfaitement aimanté.
 (b) Après l’excitation laser (nommée « pompe »), le film magnétique est chauffé, l’aimantation est réduite (du désordre magnétique est généré) et une partie du moment angulaire sort du film magnétique sous la forme de courant polarisé.

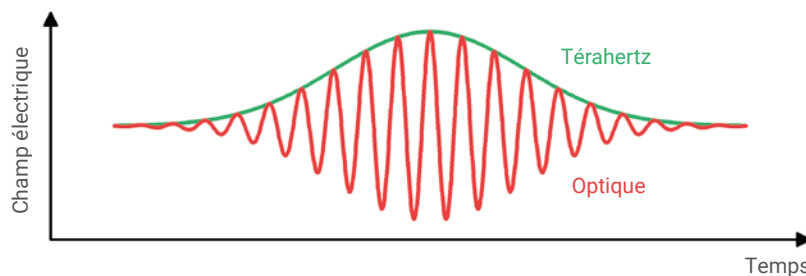
4) d'illuminer la pièce avec le flash (d'une durée d'une milliseconde), puis 5) de refermer l'obturateur pour finir l'exposition.

La photo contiendra l'information d'un moment instantané, la milliseconde exposée par le flash. Si ce processus est répété avec un délai différent entre le lancer et l'actionnement du flash, et seulement si le lancer est toujours identique, alors un film avec une super-résolution temporelle pourra être reconstitué.

De façon similaire, dans une expérience pompe-sonde, le laser impulsional est divisé en deux faisceaux (pompe et sonde) ; le premier est utilisé pour exciter le matériau au moment t_0 et initier la dynamique (pomper), et le second pour exposer l'échantillon ainsi que le détecteur (sonder) un moment plus tard ($t_0 + \Delta t$). La sonde optique peut, à travers l'interaction lumière-matière, voir la réflectivité, le spectre ou la polarisation du matériau changer, ce qui permet d'obtenir des informations sur ses propriétés. En particulier, le magnétisme est directement observable par l'effet Kerr magnéto-optique, qui fait tourner la polarisation de la sonde. Plus l'aimantation est élevée, et plus l'axe de polarisation tourne.

Le femtomagnétisme

Quand un faisceau intense de lumière de quelques femtosecondes excite un film magnétique, l'énergie optique est absorbée directement par les électrons, qui sont donc rapidement chauffés. Ces électrons excités commencent alors à subir des collisions avec le réseau des noyaux atomiques, ce qui, sur une échelle de temps de quelques picosecondes, résulte en un chauffage des mailles cristallines (excitation de phonons). Le chauffage des électrons se traduit par une perte de l'aimantation du film magnétique dans une échelle de temps tout aussi rapide (fig. 3). Ceci fut observé pour la première fois par une équipe française au laboratoire IPCMS de Strasbourg en 1996. À cause de la loi de conservation du moment angulaire, une perte d'aimantation implique un transfert de moment angulaire en dehors du système. La question qui taraudait les chercheurs du domaine était la suivante : où finit ce moment angulaire



4. Illustration de la différence entre une impulsion optique ultracourte et une impulsion térahertz ultracourte. L'impulsion optique contient des fréquences très élevées ; donc une impulsion de 0,1 à 1 picoseconde contiendrait plusieurs périodes. Au contraire, une impulsion térahertz peut ne contenir qu'une ou une demi période.

et via quel mécanisme ? Nous savons maintenant qu'au moins une partie de ce moment angulaire peut être transférée vers d'autres couches métalliques par des courants électroniques polarisés et ultrarapides (fig. 3). Depuis, ceci est devenu une technique pour induire des *couples de transfert de spin* à l'échelle de la femto et de la picoseconde en injectant ces courants polarisés dans une deuxième couche magnétique, avec l'espoir de pouvoir ainsi manipuler l'aimantation de façon ultrarapide.

En 2006, il a été découvert qu'un certain alliage magnétique composé de gadolinium, fer et cobalt (GdFeCo) avait la propriété de retourner son aimantation après une impulsion optique femtoseconde. Plus incroyable encore, le retournement de l'aimantation ne prenait que quelques picosecondes. Ce phénomène est nommé le *retournement tout-optique*. Il faut savoir que le GdFeCo est un matériau ferrimagnétique [5] : il contient un sous-réseau ferromagnétique de gadolinium couplé antiferromagnétiquement au sous-réseau ferromagnétique de fer et de cobalt (les spins du Gd et du Fe/Co sont antiparallèles). L'aimantation est donc réduite et, à une certaine composition et température, elle peut même être parfaitement compensée. Nous savons maintenant qu'après l'excitation femtoseconde, les sous-réseaux sont chauffés et désaimantés, ce qui induit des transferts de moment angulaire. Une

partie du moment angulaire du Gd est transférée vers le Fe/Co, et *vice-versa*, ce qui favorise le retournement des deux sous-réseaux, et au final celui de l'aimantation totale. Depuis la découverte du retournement tout-optique, d'autres structures magnétiques contrôlables optiquement ont été découvertes. Dans ce domaine, l'Institut Jean Lamour de Nancy est une référence mondiale.

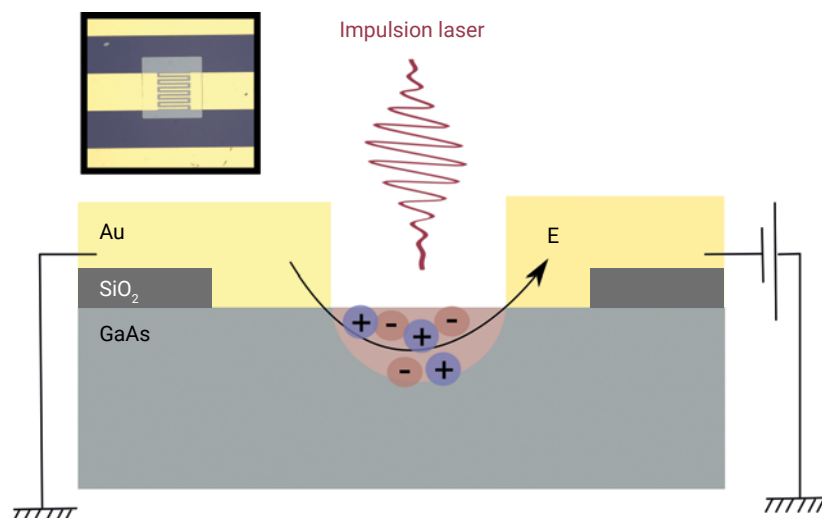
L'électronique de spin térahertz

Une des dernières évolutions dans l'étude du magnétisme ultrarapide est, depuis 2016, le retour à des fréquences plus basses. En effet, avec une impulsion optique femtoseconde (fs), le champ électrique oscille toutes les ~ 3 fs, alors que l'enveloppe des oscillations est plus large (fig. 4). Dans ce cas, les électrons dans le matériau suivent les oscillations du champ électrique, mais le magnétisme ne peut pas réagir aussi vite. En revanche, en réduisant la fréquence des oscillations vers le térahertz, il est possible d'avoir un champ électrique qui oscille plus lentement, tout en conservant une durée d'impulsion très courte. On peut alors obtenir une impulsion quasiment unipolaire, avec une direction bien définie pour les courants électroniques, pour agir sur l'aimantation. L'électronique de spin térahertz ouvre donc de nouvelles possibilités, en alliant électronique de spin classique et magnétisme ultrarapide.

>>>

>>>

Pour générer ces impulsions térahertz, qui ne font que quelques picosecondes, une possibilité est d'utiliser des commutateurs photo-activés nommées "Auston switch" (fig. 5). Ce type de commutateur est chargé par une tension, et ensuite une irradiation par laser femtoseconde est capable de le « fermer » (augmenter sa conductivité électronique) pendant une durée proche de la picoseconde, ce qui permet une décharge courte de l'énergie stockée. Les impulsions résultantes sont intenses et courtes, et peuvent être utilisées pour induire des couples de transfert de spin ultracourts. Puisque ces commutateurs sont actionnés avec les impulsions d'un laser femtoseconde, il est automatiquement possible d'utiliser les méthodes pompe-sonde pour étudier la dynamique de l'aimantation. Les études récentes [6] nous montrent que, suite aux impulsions picosecondes, l'aimantation suit une trajectoire complexe dominée non seulement par les couples de transfert de spin, mais aussi par la désaimantation de la couche due au chauffage térahertz. Curieusement, quand l'impulsion



5. Schéma d'un commutateur Auston switch. Une tension génère un champ électrique entre les électrodes d'or (en jaune). Suite à l'impulsion laser, des charges + et - sont générées dans le substrat de GaAs (en gris) et sont accélérées par le champ électrique. À cause du court temps de vie des charges (~ 1 ps), le courant résultant ne perdure que quelques picosecondes.

Encadré en haut à gauche : photo d'un commutateur vu du haut.

picoseconde est finie, l'aimantation n'arrête pas d'évoluer. Il ne s'agit pas d'inertie dans ce cas, mais seulement que la nouvelle position d'équilibre de l'aimantation après l'excitation n'a pas encore été atteinte. Il faudra attendre une bonne centaine de picosecondes pour que le système se retrouve retourné et relaxé, et donc proche de son état final.

Conclusion

En réponse à la question initiale, nous n'avons pas encore atteint la limite de la vitesse de contrôle de l'aimantation. Cette limite devrait être repoussée au fur et à mesure que les développements techniques nous le permettront. Nous avons vu les différentes manières d'agir sur l'aimantation aux échelles ultrarapides, à travers la lumière et les ondes térahertz. En utilisant la chaleur et les couples de transfert de spin, nous appliquons des « champs » magnétiques virtuels à l'échelle de la picoseconde et manipulons des aimants, parfois de façon surprenante. Ce type de travail pourrait venir enrichir les modèles magnétiques actuels, en permettant de mieux comprendre les interactions entre spins dans les différents systèmes à des échelles de temps fondamentales. De même, la compréhension de la physique ultrarapide en jeu, ainsi que les systèmes magnétiques à propriétés

ultrarapides découverts, pourraient jouer un rôle important dans l'accélération et la réduction en énergie des technologies spintroniques du futur.

Deux exemples d'applications remarquables sont les mémoires vives magnétiques (MRAM) ultrarapides, et les sources térahertz basées sur l'électronique de spin. Les MRAM par exemple sont déjà sur le marché, et permettent un démarrage instantané des ordinateurs avec un minimum de consommation. Ceci est dû au fait que ce sont des mémoires non volatiles, c'est-à-dire qui n'ont pas besoin d'être alimentées pour garder l'information (l'aimantation est stable). Au contraire, les mémoires RAM à charge classiques doivent être toujours sous tension, et donc consomment même en mode de veille. Les études de retournement de l'aimantation ultrarapide pourraient donc permettre d'accélérer l'écriture de ce type de mémoire et de généraliser son déploiement. En ce qui concerne les sources térahertz, la spintronique ultrarapide pourrait permettre le développement de nouvelles sources plus flexibles, simples et performantes, de façon à les intégrer dans les scanners biomédicaux et de contrôle de sécurité (sans rayons X). Notamment, l'étude des sources térahertz spintroniques fait l'objet d'un grand financement national « PEPR exploratoire » [7]. ■

1• « Dossier spintronique » de

Reflets de la physique, téléchargeable sur www.refletsdelaphysique.fr, rubrique « Dossiers ».

2• F. Cadiz *et al.*, « Le spin des électrons se transporte-t-il comme leur charge ? », *Reflets de la physique* **65** (2020) 6-11. <https://doi.org/10.1051/refdp/202065006>

3• F. Druon *et al.*, « Générer des impulsions laser ultra-brèves de très haute intensité : la technique du CPA », *Reflets de la physique* **61** (2019) 13-25. <https://doi.org/10.1051/refdp/201961013>

4• J. Bobroff *et al.*, « Animations quantiques : technique pompe-sonde », <https://youtu.be/mFKmmR5Hh5s>

5• J. Bobroff *et al.*, Animations sur le magnétisme : ordres magnétiques, https://youtu.be/_t6MDnJ4_Y

6• Actualité scientifique du CNRS Physique (18 décembre 2020) : <https://cutt.ly/cnrs-vitesse-decriture-memoire-magnetique>

7• <https://cutt.ly/univ-lorraine-pepr-spin-retenue-et-finance>