Plaque de silicium portant des puces de mémoire magnétique à accès aléatoire MRAM.

De nouveaux matériaux pour l'électronique de *spin*

Agnès Barthélémy¹, Martin Bowen², Joël Cibert³ (joel.cibert@grenoble.cnrs.fr)

1 - Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, 91767 Palaiseau

2 - Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg, 23 rue du Loess, BP 43, 67034 Strasbourg Cedex 2

3 - Institut Néel, CNRS / Université Joseph Fourier, BP 166, 38042 Grenoble

La magnétorésistance géante a été mise en évidence sur des multicouches métalliques. Mais depuis quelques années, certains matériaux non métalliques ont révélé des potentialités spintroniques remarquables.

Cet article présente les principaux résultats obtenus et les perspectives offertes par trois classes de matériaux :

les semi-conducteurs magnétiques dilués, les oxydes fonctionnels et les semi-conducteurs organiques.

Parmi les possibilités offertes par ces matériaux, citons l'obtention de très longs temps de vie de *spin*, la conversion d'effets optiques en effets électroniques et réciproquement, et la modification de propriétés magnétiques de composants spintroniques par des champs électriques.

Les articles d'Albert Fert (*Reflets* n°15, pp. 5-10) et de Bernard Dieny (*Reflets* n°16, pp. 6-11) ont décrit l'essor de la spintronique à partir des propriétés physiques exceptionnelles observées sur des échantillons incorporant une alternance de couches magnétiques et non magnétiques. La propriété qui est exploitée dans des composants maintenant très répandus – après avoir été découverte et étudiée dans un contexte de recherche fondamentale – est la forte sensibilité du transport de courant électrique à la présence d'un champ magnétique : on parle de magnétorésistance géante (GMR) lorsque le courant circule dans l'ensemble formé par une couche métallique prise entre deux couches magnétiques dont on renverse l'aimantation relative ; on parle de magnétorésistance tunnel (TMR) lorsque le courant circule perpendiculairement entre deux couches magnétiques séparées par une barrière isolante. Dans les deux cas, les propriétés de l'interface sont évidemment essentielles.

La spintronique a ainsi participé pleinement à la miniaturisation accrue de l'électronique. Celle-ci utilise désormais des composants de dimensions nanométriques à la fois pour traiter (dans des composants à base de silicium) et stocker (dans des structures magnétiques avec une lecture utilisant la GMR ou la TMR) plus rapidement une quantité accrue d'information, avec un coût en énergie moindre. Cette contribution à une meilleure efficacité énergétique est sans doute moins visible, mais tout aussi importante.

On sait cependant que des limites physiques ont été identifiées dans la course aux dimensions nanométriques, et qu'on doit donc trouver de nouvelles pistes. Un exemple est donné par B. Dieny : intriquer étroitement le stockage et le traitement de l'information dans une « spintronique logique ». Mais aussi piloter les propriétés magnétiques en utilisant non pas un champ magnétique (créé par un courant, donc gros consommateur d'énergie), mais un champ électrique (vecteur de base de la microélectronique). Ou encore intégrer d'autres fonctions, par exemple celles de l'opto-électronique.

Dans tous les cas, et les théoriciens de l'informatique comme P. Jorrand le savent bien : « pas d'information sans état de la matière, pas de calcul sans processus physique ». De façon concrète, cela impose de développer des matériaux aux propriétés physiques bien maîtrisées, et d'associer ces matériaux dans des composants (avec des interfaces) qui permettront de manipuler ces propriétés pour assurer des fonctions nouvelles.

Cet article décrit l'apport de trois classes de matériaux à cet effort : les **semi-conducteurs magnétiques dilués** [1, 2] qui visent à conférer des propriétés magnétiques aux semi-conducteurs traditionnels, les **oxydes fonctionnels** [3] et notamment parmi eux les multiferroïques [4], et les **semi-conducteurs organiques** [5], dont les propriétés spintroniques émergentes ne cessent de surprendre.

I. Les semi-conducteurs magnétiques dilués

Pourquoi ?

Rendre ferromagnétiques certains semi-conducteurs permettrait de construire une électronique de *spin* « tout semi-conducteur », et d'intégrer dans un même composant les fonctions de stockage de l'information, de traitement de celle-ci, voire différents capteurs et des émetteurs de lumière [6].

Le point de départ est donc un matériau semi-conducteur qui offre l'ensemble des possibilités qui ont permis le développement de la microélectronique : il est isolant lorsqu'il est pur, on sait le doper électriquement, et on sait manipuler les porteurs de charges en appliquant une configuration complexe de champ électrique (définie par des contacts électriques et des interfaces). En pratique, les contraintes industrielles requièrent en outre que ce semi-conducteur soit compatible avec les procédés technologiques et les matériaux actuellement utilisés en microélectronique ou opto-électronique : le silicium et le germanium, l'arséniure de gallium GaAs, le nitrure de gallium GaN.

Ce semi-conducteur devient un *semi-conducteur magnétique dilué* lorsqu'on y introduit une impureté magnétique comme le manganèse (Mn), qui porte un *spin* et donc un moment magnétique. Ce sont les porteurs de charges du semi-conducteur qui assurent le couplage ferromagnétique entre les moments magnétiques localisés sur les impuretés [1] : c'est un mécanisme qui existe dans les métaux magnétiques ; mais les densités de charges et les densités de moments magnétiques dans les semi-conducteurs magnétiques dilués sont beaucoup plus faibles et les températures critiques obtenues jusqu'à maintenant sont bien inférieures à la température ambiante.

Les recherches actuelles portent sur deux axes : d'une part, augmenter la température de Curie en améliorant la qualité d'un matériau donné, ou en cherchant des matériaux plus favorables ; d'autre part, apprendre à fabriquer des composants élémentaires de l'électronique de *spin* à partir des semi-conducteurs magnétiques dilués actuels.

Augmenter la température de Curie

Le matériau le plus étudié est (Ga,Mn)As, ou plus exactement $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, dans lequel une proportion x des atomes Ga est remplacée aléatoirement par des atomes Mn. Ces atomes Mn jouent le double rôle de dopant électrique et de dopant magnétique. Les introduire en substitution de Ga est un défi redoutable, aussi bien pour l'élaboration que pour la compréhension des propriétés, car il s'agit de contrôler des proportions de l'ordre de 10%, une valeur bien supérieure aux dopages habituels de la microélectronique.

De gros progrès ont été faits dans l'élaboration de (Ga,Mn)As en épitaxie par jets moléculaires [7]. Les premiers matériaux, à la fin des années 1980, étaient élaborés dans des conditions trop proches des conditions optimisées pour GaAs pur, ils restaient isolants et paramagnétiques. Un meilleur contrôle de la température de croissance et du flux d'arsenic a permis dans les années 1990 d'observer un comportement ferromagnétique avec des températures de Curie supérieures à 60 K, et un record à 110 K longtemps singulier. Des études plus récentes ont montré que les atomes de Mn avaient tendance à s'incorporer sous forme d'interstitiels : des recuits bien choisis ont permis d'éliminer ces interstitiels et de monter la température de Curie à 170 K. On tend actuellement vers 190 K, avec un bon espoir que cette limite n'est pas intrinsèque et pourra donc être repoussée par un contrôle encore meilleur du matériau. En effet, la température critique augmente régulièrement avec la proportion de Mn correctement incorporée en substitution du Ga (fig. 1).

Une grande partie de la communauté explore d'autres matériaux. La température de Curie est proportionnelle au carré du couplage entre les porteurs et les impuretés magnétiques (puisque le couplage entre deux *spins* traduit l'action exercée sur le second *spin* par les porteurs qui ont été orientés par le premier *spin*) : on a donc étudié des semi-conducteurs où ce couplage est particulièrement fort, comme les *semi-conducteurs à large bande interdite* tels que le nitrure de gallium GaN ou l'oxyde de zinc ZnO. Malheureusement, aussi bien les calculs *ab initio* que les mesures sur des matériaux contenant peu d'atomes magnétiques ont montré que ce renforcement du couplage *spin*-porteur s'accompagne d'une localisation des porteurs, qui ne peuvent plus assurer l'interaction ferromagnétique entre les impuretés magnétiques.

Une autre piste concerne des *matériaux inhomogènes*, dans lesquels des zones de forte concentration en atomes magnétiques assurent une température de Curie élevée, tout en étant fortement couplées aux porteurs de charges de la matrice qui les contient. Un exemple est donné sur la figure 2 : la matrice est du germanium, les nanocolonnes visibles sur l'image de microscopie électronique ont une composition proche de Ge_2Mn et sont ferromagnétiques bien au-dessus de la température ambiante, comme le montrent les courbes d'aimantation ; surtout, les propriétés de transport démontrent un fort couplage avec les propriétés magnétiques. Il reste à maîtriser parfaitement croissance et morphologie, et à optimiser les propriétés magnétiques et de magnéto-transport.

»»»

1. La maîtrise des matériaux (Ga,Mn)As croît année après année : température critique mesurée sur des couches optimisées, en fonction de la quantité d'impuretés manganèse correctement insérées sur le sous-réseau de gallium de la matrice GaAs. (Adapté des exposés de T. Jungwirth, téléchargeables sur [7]).

2. Un système très hétérogène : nanocolonnes de Ge_2Mn dans une couche de Ge. À gauche, microscopie électronique en transmission (vue en section et vue de dessus) ; à droite, aimantation en fonction du champ magnétique appliqué à différentes températures, montrant un comportement ferromagnétique au-dessus de la température ambiante. (Adapté de S. Tardif *et al.*, *SPIE Optics & Photonics Symposium*, preprint hal-00315739.)

3. Modification de la direction de l'aimantation M par l'application d'un champ électrique E , en l'absence de tout champ magnétique appliqué. (Tiré de D. Chiba *et al.*, *Nature* **455** (2008) 515.)

>>>

Réaliser des composants élémentaires

Même si dans les matériaux bien contrôlés la température de Curie reste plus basse que la température ambiante, et interdit toute application « grand public » à court terme, on peut tirer parti de la maîtrise des interfaces dans les semi-conducteurs usuels pour fabriquer des nanostructures réalisant des fonctions originales intéressantes pour l'électronique de *spin*. De nombreux dispositifs ont été réalisés. Nous décrirons à titre d'exemple le retournement de l'aimantation par application d'un champ électrique.

La structure « à effet de champ » est un classique de la microélectronique ; elle permet d'appliquer un champ électrique E qui module la densité de porteurs dans la couche (Ga,Mn)As. C'est un processus peu gourmand en énergie, car la structure présente une résistance élevée au passage du courant. Comme rappelé dans l'article de B. Dieny (*Reflets* n°16, pp. 6-11), cette structure avait déjà été utilisée pour moduler la température critique d'une couche (In,Mn)As. Dans cette nouvelle structure (fig. 3), on utilise le fait que l'anisotropie magnétique dépend fortement de la densité de porteurs pour changer la direction d'aimantation en appliquant une tension, en l'absence de tout champ magnétique appliqué.

II. Oxydes pour l'électronique de *spin*

Les avancées dans la maîtrise de la croissance des couches minces d'oxydes ont rendu possible l'obtention de films minces de très grande qualité cristalline et leur insertion dans des hétérostructures pour l'électronique de *spin* (fig. 4).

Intérêt des oxydes

Le rôle des oxydes dans l'électronique n'a cessé de croître ces dernières années. Ceci est dû à la grande diversité de propriétés physiques qu'ils présentent (ferro-électricité, magnétisme, caractère multiferroïque, comportement isolant / semi-conducteur / métallique, supraconductivité...) et à la possibilité de les moduler aisément par des facteurs extérieurs (contrainte, champs...). C'est donc tout naturellement que ces

matériaux ont trouvé leur place dans des hétérostructures pour l'électronique de *spin*, pour y apporter des fonctionnalités optimisées ou nouvelles [3].

Mentionnons d'abord brièvement deux domaines, pourtant très actifs.

(i) La recherche d'oxydes magnétiques semi-conducteurs dilués rejoint en l'élargissant le domaine des semi-conducteurs à large bande interdite, comme GaN ou ZnO. Des comportements ferromagnétiques à température ambiante ont été observés après incorporation d'impuretés magnétiques dans différents oxydes comme ZnO, TiO_2 , SnO_2 , In_2O_3 ou HfO_2 ... Les résultats sont ambigus, et les mécanismes (intrinsèques, ou extrinsèques : défauts, inhomogénéités) à l'origine du magnétisme de ces matériaux restent à élucider.

4. Image en microscopie électronique haute résolution d'une hétérostructure d'oxydes, réalisée par ablation laser pulsée, composée d'une couche mince de 2,4 nm d'épaisseur de SrTiO_3 prise en sandwich entre deux couches de LSMO. (Avec l'aimable autorisation de J.L. Maurice.)

(ii) La famille des oxydes comporte également des matériaux ferro- ou ferri-magnétiques isolants pouvant être utilisés comme barrière tunnel magnétique pour filtrer selon leur *spin* les électrons venant d'une électrode non magnétique [8]. De tels filtres en *spin* ont été obtenus en utilisant EuO , NiFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , BiMnO_3 et $\text{La}_{0,1}\text{Bi}_{0,9}\text{MnO}_3$ (LBMO) comme barrière. Le devenir de cette thématique dépend de notre faculté à conserver dans des couches nanométriques le caractère ferromagnétique de ces matériaux complexes.

Oxydes demi-métalliques comme électrodes pour les jonctions tunnel magnétiques

C'est en 1994, avec la croissance de films minces de manganites ferromagnétiques, qu'a débuté l'incorporation des oxydes dans des hétérostructures pour l'électronique de *spin*. Ces matériaux prédits demi-métalliques, c'est-à-dire ne présentant une densité d'états non nulle au niveau de Fermi que pour une seule direction de *spin* et donc une polarisation en *spin* théoriquement égale à 100%, trouvèrent naturellement leur place en tant qu'électrodes dans des jonctions tunnel magnétiques. Leur utilisation a permis d'obtenir des records de magnétorésistance tunnel encore inégalés (1800%) ; malheureusement, ces records ne sont obtenus qu'à très basse température du fait des températures de Curie relativement faibles de ces matériaux : la température de Curie la plus élevée, observée pour le composé $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO), n'est que de 350 K.

L'utilisation de ces demi-métaux a cependant permis d'aboutir à une meilleure compréhension de l'effet tunnel dépendant du *spin*, grâce à la simplicité de leur structure de bande. Utilisés comme électrode, ils constituent un analyseur de *spin* pour les électrons qui traversent la barrière par effet tunnel. L'étude de jonctions $\text{LSMO}/\text{SrTiO}_3/\text{Co}$ a ainsi révélé le rôle prépondérant joué par le couplage des fonctions d'onde progressives dans l'électrode ferromagnétique avec les fonctions d'onde évanescences dans la barrière tunnel. Une optimisation de ce couplage des fonctions d'onde à l'interface est aujourd'hui mise à profit pour obtenir de très forts effets de magnétorésistance tunnel à température ambiante avec des barrières de MgO pour la réalisation de mémoires magnétiques non volatiles (c.f. B. Dieny, *Reflète* n°16, p. 8).

Matériaux multiferroïques

Depuis 2000, de nombreuses équipes se sont également intéressées aux *matériaux multiferroïques*, dont la plupart sont des oxydes. Ces composés présentent au moins deux des trois types d'ordres ferroïques – ferro-élastique, ferro-électrique, ferromagnétique. Cette définition est généralement étendue pour inclure également les matériaux antiferroïques.

La multifonctionnalité de ces matériaux, en elle-même, en fait une classe de composés attrayants pour les applications. Par exemple, l'exploitation du caractère multifonctionnel d'un des seuls multiferroïques ferro-électriques et ferromagnétiques, $\text{La}_{0,1}\text{Bi}_{0,9}\text{MnO}_3$ (LBMO), a permis de réaliser des jonctions tunnel à quatre états de résistance (fig. 5). Ces jonctions présentent une magnéto-résistance tunnel *via* l'effet de filtrage de *spin* lié au caractère ferromagnétique de la barrière LBMO. De plus, le retournement de la polarisation électrique de LBMO modifie la hauteur de la barrière tunnel et la résistance du dispositif (effet d'électrorésistance tunnel, ou TER).

Dans certains matériaux, de nouvelles fonctionnalités proviennent des *couplages* pouvant exister entre ces différents ordres. Le couplage magnéto-électrique entre les ordres ferro-électrique et magnétique est

particulièrement intéressant pour la spintronique, car il rend théoriquement possible la manipulation d'une aimantation par un champ électrique. Des résultats en ce sens ont été obtenus avec des composés ferro-électriques/antiferromagnétiques présentant un couplage magnéto-électrique entre ces ordres, en les couplant par couplage d'échange à des couches minces ferro- ou ferrimagnétiques [3, 9]. Ces premiers résultats ouvrent la voie au contrôle de l'état de résistance d'une vanne de *spin* par un champ électrique. Ceci devrait permettre, notamment, la réalisation de mémoires non volatiles présentant les avantages des Fe-RAM et des MRAM, les MERAM, en combinant la non-volatilité du stockage magnétique à une écriture électrique de l'information, peu consommatrice de l'énergie et locale, et une lecture magnétique non destructive *via* la GMR.

Afin de pallier la rareté de composés à la fois ferro- ou ferrimagnétiques et ferro-électriques, des recherches sont actuellement menées sur des matériaux multiferroïques artificiels obtenus en combinant matériaux ferromagnétiques et matériaux ferro-électriques sous forme d'*hétérostructures* [4].

Les résultats prometteurs obtenus avec des barrières tunnel ferro-électriques [10] présagent des résultats intéressants pour la spintronique, en combinant ces barrières à des électrodes ferromagnétiques [11]. >>>

5. Variation de la résistance en champ magnétique d'une tricouche Au/LBMO 2 nm/LSMO après avoir appliqué un champ électrique positif ou négatif renversant la polarisation électrique du multiferroïque LBMO ($\text{La}_{0,1}\text{Bi}_{0,9}\text{MnO}_3$). Quatre états de résistance sont ainsi obtenus. Les transitions entre les états 1 et 2 et entre les états 3 et 4, résultent du retournement de l'aimantation (flèches blanches) du composé LBMO ; celles entre les états 1 et 3 et entre les états 2 et 4, sont liées au renversement de sa polarisation électrique (flèches rouges et noires). (Tiré de M. Gajek *et al.*, *Nature Materials* 6 (2007) 296).

III. La spintronique organique

Une convergence a lieu entre les domaines de l'électronique de *spin* [6] et de l'électronique organique [5], par la combinaison de matériaux magnétiques avec un espaceur organique qui va de la molécule unique au film mince. Certains avantages de ce mariage sont déjà identifiés, tandis que d'autres se révèlent progressivement et surprennent les deux communautés scientifiques explorant cette nouvelle frontière de la spintronique.

Pourquoi marier spintronique et matériaux organiques ?

Les *semi-conducteurs organiques* sont constitués de molécules assemblées à partir d'éléments atomiques très légers. Le faible couplage *spin*-orbite qui en résulte ouvrirait ainsi la possibilité d'un transport diffusif d'électrons au sein d'un tel matériau sur des distances de plusieurs microns, sans perdre l'information sur la polarisation en *spin* de ces porteurs [5]. Le mariage entre spintronique et semi-conducteurs organiques pourrait ainsi accomplir l'objectif d'une électronique où le *spin* est pris en compte dans la conception entière du circuit. De plus, un mariage réussi permettrait d'envisager des dispositifs spintroniques sur supports flexibles. Enfin, on peut espérer mettre à profit les propriétés intrinsèques des molécules, et leur sensibilité à des *stimuli* externes (lumière, champ magnétique), afin de réaliser des dispositifs aux fonctionnalités multiples.

L'interface ferromagnétique/organique

Notre compréhension actuelle du transfert de la polarisation de *spin* à travers une interface ferromagnétique/semi-conducteur met en jeu l'hybridation des fonctions d'onde de part et d'autre de l'interface [12] et la marche de potentiel à cette interface. Dans le cas d'un semi-conducteur inorganique, il se forme une barrière Schottky, avec une couche de désertion dont l'épaisseur est déterminée par l'écrantage de la charge des impuretés ionisées : elle peut atteindre le micron. En revanche, les états d'un semi-conducteur organique sont très localisés, permettant le transfert d'une forte densité de charge sur le premier plan organique à l'interface. Cette modification brutale de la structure de bandes des matériaux à

l'interface peut faire apparaître des propriétés intrinsèques, que l'on pourra façonner à volonté.

À titre d'exemple, il est possible de modifier la *conduction électronique* et le *magnétisme* de molécules de phthalocyanine (MPc = $MC_{32}H_{16}N_8$, où $M=H_2$, Co, Mn... ; voir l'encart de la figure 6) en jouant sur la nature chimique ou l'orientation cristallographique de la surface sur laquelle elles sont déposées. La figure 6(a) représente la densité d'états, mesurée grâce à un microscope à effet tunnel, d'une telle molécule. Sur une surface de cuivre d'orientation (111), la faible interaction électronique laisse la molécule dans un état *semi-conducteur* (le niveau de Fermi est entre deux orbitales moléculaires). En revanche, sur une surface de cobalt, un transfert de charge d'environ 0,6 eV de la molécule vers la surface du métal conduit au positionnement d'une orbitale moléculaire au niveau de Fermi – *la molécule acquiert donc un caractère métallique*.

Cette liaison forte entre une molécule organométallique et une surface ferromagnétique peut conduire à un *couplage ferromagnétique* entre la molécule et le substrat, dont le mécanisme peut être étudié par des expériences d'absorption de rayons X (XAS) réalisées auprès d'un synchrotron. La figure 6(b) montre des spectres acquis au seuil K de l'azote sur une couche de MnPc déposée sur une surface métallique

d'orientation (100) : pour un substrat de cuivre, l'énergie de seuil ne dépend pas de l'épaisseur de molécules déposée. Par contre, pour un substrat de cobalt, un décalage d'environ 0,5 eV apparaît pour une monocouche moléculaire et disparaît déjà presque totalement dès la seconde monocouche. On démontre ainsi que ces propriétés de spintronique très intéressantes relèvent exclusivement de sites azote à l'interface.

Transport polarisé en spin au travers des matériaux organiques

Élucider la nature électronique de l'interface entre un matériau ferromagnétique et un semi-conducteur organique permettra de mieux comprendre le transport polarisé en *spin* à travers des couches *ultraminces* et *minces* de cette classe de semi-conducteurs. Pour ce faire, on place de part et d'autre de la couche semi-conductrice des couches ferromagnétiques agissant comme injecteur et détecteur électrique de *spin*.

Dans une première configuration, le transport se fait par *effet tunnel* dans des couches isolantes ultraminces (< 3 nm) : les études les plus abouties utilisent une interface ferromagnétique/inorganique bien connue (par exemple Co/ Al_2O_3) pour former un côté de la jonction [fig. 7(a)], mais le transport par effet tunnel à travers une jonction entièrement organique connaît quelques premiers succès.

6. Modification de la structure électronique de la molécule de phthalocyanine lorsque celle-ci est déposée sur un substrat ferromagnétique. (a) Mesure par microscopie tunnel : la densité d'états d'une molécule de CoPc sur une surface de Co(111) (ligne rouge) est décalée de 0,6 eV par rapport à celle sur Cu(111) (ligne noire pointillée). (b) La sélectivité chimique de l'absorption de rayons X permet d'attribuer ce décalage aux sites d'azote de la molécule de phthalocyanine. Ce décalage n'affecte que la première monocouche (MC) de MnPc sur Co(100). La molécule de phthalocyanine est schématisée dans l'encart du panneau (a). (Tiré de (a) A.F. Takacs et al., *Phys. Rev. B*, **78** (2008) 233404, et (b) S. Javard et al.)

7. Transport polarisé en *spin*.

Mesure de la magnétorésistance MR (a) en régime tunnel dans le système Co/Al₂O₃(0,6nm)/ tris(8-hydroxyquinolino)aluminium [Alq3] (1,6nm)/FeNi et (b) en régime diffusif dans le système LSMO/Nanotube de carbone (2000 nm) /LSMO. Encart du panneau (a) : molécule d'Alq3. (Tiré de (a) T. S. Santos *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **98**, (2007) 016601 et (b) L.E. Hueso *et al.*, *Nature* **445** (2007) 410.)

La conservation de *spin* sur des distances plus grandes ouvrirait la voie à de nombreuses applications. Une démonstration de spintronique organique dans ce régime *diffusif* a été décrite en 2007 sur un dispositif comprenant un nanotube de carbone long de 2 μm et intégrant des électrodes de La_{0,7}Sr_{0,3}MnO₃ (LSMO) fortement polarisées en *spin*, fig. 7(b) [12]. Ce résultat, déjà signalé dans l'article d'Albert Fert, témoigne de l'intérêt grandissant pour ce type de matériau organique, ainsi que pour le graphène en raison de ses propriétés originales et modulables.

De nombreux aspects du transport diffusif polarisé en *spin* à travers des couches minces organiques restent à comprendre, avec pour enjeu notable l'amélioration du rendement lumineux de diodes organiques. On le ressent bien : notre compréhension actuelle de la spintronique organique n'en est aujourd'hui qu'à ses débuts.

Par ailleurs, la versatilité du génie chimique permet de façonner des molécules présentant des propriétés intrinsèques novatrices pour la spintronique, que l'on peut adresser par des *stimuli* externes électriques, magnétiques ou encore optiques [13].

À titre d'exemples, citons la classe des *aimants moléculaires* tels que Mn₁₂, qui présentent une aimantation spontanée sans besoin d'ordre à longue distance ; ou encore celle des *molécules photocommutables*, telle que Fe-phénanthroline, qui présentent une transition d'un état paramagnétique haut-*spin* à un état paramagnétique bas-*spin*, que l'on peut activer optiquement ou thermiquement. L'intégration de telles molécules au sein de dispositifs spintroniques permettra de marier ces multifonctionnalités avec la spintronique en vue de débouchés industriels stratégiques.

Conclusion

Les recherches sur ces nouveaux matériaux pour l'électronique de *spin*, décrits au sein de cet article, n'en sont qu'à leur début. Elles ont d'ores et déjà abouti à l'obtention de matériaux présentant de très

fortes polarisations en *spin*, des propriétés magnétiques pouvant être modulées par un champ électrique, de très grands temps de vie de *spin*... Elles ouvrent de nouvelles voies fascinantes et prometteuses d'applications,

fournissant les briques élémentaires qui pourront être assemblées pour définir demain une électronique de *spin* encore plus performante ou présentant de nouvelles fonctionnalités. ■

En savoir plus

- 1 • J. Gibert et D. Ferrand, « Ferromagnétisme contrôlé par les porteurs dans les semi-conducteurs magnétiques dilués », *Images de la Physique* (2003-2004) 99.
- 2 • L. Besombes *et al.*, « Semi-conducteurs magnétiques dilués », *Bulletin de la SFP*, n°153 (2006) 5.
- 3 • M. Bibes et A. Barthélémy, « Oxide spintronics », *IEEE Trans. Electron. Devices* **54** (2007) 1003.
- 4 • W. Prellier *et al.*, « Les matériaux multiferroïques », *Reflète de la Physique* n°8 (2008) 14.
- 5 • V. A. Dediu *et al.*, « Spin routes in organic semi-conductors », *Nature Mater.* **8** (2009) 707.
- 6 • I. Zutic *et al.*, « Spintronics: Fundamentals and applications », *Rev. Mod. Phys.* **76** (2004) 323.
- 7 • Beaucoup d'information (exposés et articles) disponible sur le site que Tomas Jungwirth a consacré aux semi-conducteurs ferromagnétiques : http://unix12.fzu.cz/ms/navigate.php?cont=public_in
- 8 • J. S. Moodera *et al.*, « The phenomena of spin-filter tunnelling », *J. Phys.: Condens. Matter* **19** (2007) 165202.
- 9 • Y.H. Chu *et al.*, « Electric-field control of local ferromagnetism using a magnetoelectric multiferroic », *Nature Mater.* **7** (2008) 478.
- 10 • V. Garcia *et al.*, « Giant tunnel electroresistance for non-destructive readout of ferroelectric states », *Nature* **460** (2009) 81.
- 11 • C. G. Duan *et al.*, « Predicted magnetoelectric effect in Fe/BaTiO₃ multilayers: ferroelectric control of magnetism », *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 07201.
- 12 • M. Bowen *et al.*, « Using half-metallic manganite interfaces to reveal insights into spintronics », *J. Phys.: Condens. Matter* **19** (2007) 315208.
- 13 • O. Sato *et al.*, « Control of Magnetic Properties through External Stimuli », *Angew. Chem. Int. Ed.* **46** (2007) 2152.