

# Detection d'un spin nucléaire unique à l'aide d'un transistor de spin

Romain Vincent

Novembre 2012



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Spintronique moléculaire</b>	<b>1</b>
1.1	La spintronique . . . . .	1
1.2	Les aimants moléculaires . . . . .	2
1.2.1	Définition . . . . .	2
1.2.2	Propriétés . . . . .	2
1.2.3	L'exemple du Fe <sub>8</sub> . . . . .	3
1.3	La spintronique moléculaire . . . . .	5
1.3.1	État de l'art . . . . .	5
1.3.2	La spintronique dans notre groupe . . . . .	5



# Chapitre 1

## Spintronique moléculaire

### 1.1 La spintronique

La spintronique est une branche de l'électronique où, en plus de la charge, le degré de liberté du spin est utilisé. Elle est notamment à l'origine des avancées technologiques les plus récentes telle que la MRAM ou bien encore les têtes de lecture des disques durs. Une des applications les plus célèbres reste la vanne de spin. Ce dispositif permet de filtrer les électrons en fonction de l'orientation de leur spin (soit *up*, soit *down*), autorisant un couplage direct entre magnétisme et courant. La découverte du phénomène de magnétorésistance géante, à l'origine de ce filtrage, a d'ailleurs valu à ces découvreurs, Albert Fert et Peter Grünberg, le prix Nobel de Physique en 2007.

Ces applications technologiques restent cependant cantonnées au stockage de l'information [1]. Des propositions de spin-transistor directement commandé par le spin de l'électron et non plus sa charge ont pourtant été faites [2] et certains dispositifs ont également été réalisés [3, 4].

Cependant, l'électron n'est pas le seul objet possédant un spin et d'autres "acteurs" de la spintronique peuvent être envisagés. Les aimants moléculaires, notamment du fait de l'émergence de l'électronique moléculaire, sont des candidats sérieux dans la fabrication de dispositifs toujours plus performants. Avant de voir comment ces derniers pourraient être utilisés dans l'électronique de demain, nous allons définir ce qu'est réellement un aimant moléculaire et quelles sont ses caractéristiques.

## 1.2 Les aimants moléculaires

### 1.2.1 Définition

Un molécule, pour recevoir le qualificatif d'aimant, doit remplir deux critères. Tout d'abord, elle doit posséder un moment magnétique. Celui-ci résulte, en général, de l'interaction entre plusieurs centres magnétiques et donne lieu à une configuration où la résultante des moments magnétiques des différents centres est non nulle.

Il faut en outre que ce moment magnétique ait une orientation préférentielle, le long de laquelle il va venir s'aligner. Les deux directions associées à cette orientation représentent les deux configurations d'énergie minimale séparées par une barrière de potentiel. Afin qu'un aimant moléculaire conserve ses propriétés, il faut que l'énergie associée à l'agitation thermique soit plus faible que cette barrière. Dans le cas contraire, la température suffit à retourner aléatoirement le moment magnétique.

Certains aimants moléculaires, en plus de l'axe facile, possèdent également un plan difficile dans lequel l'énergie du moment magnétique est la plus grande. Cela donne naissance à une physique beaucoup plus riche de part l'apparition de phénomènes quantiques tels que le retournement de l'aimantation par effet tunnel (QTM) ou bien encore la phase de Berry, que nous détaillerons dans la suite.

Malgré ces restrictions, la zoologie des aimants moléculaires est plutôt riche avec des moments magnétiques allant de un à plusieurs dizaines  $\mu_B$ .

### 1.2.2 Propriétés

Les aimants moléculaires possèdent de nombreuses propriétés susceptibles de les rendre indispensables aux dispositifs électroniques de demain. Leur taille tout d'abord, en deçà des techniques lithographiques, permettrait d'augmenter les densités de stockage, chaque molécule codant une information à travers l'orientation de son moment magnétique. Une telle application est notamment motivée par le faible taux de relaxation, de l'ordre de quelques années en dessous de 2 K, qui permettrait d'en faire des éléments de stockage de l'information fiable.

De plus, certains aimant moléculaires peuvent être sensible à un stimulus extérieur tels que la température, la lumière, la pression, un champ électrique ou magnétique ou bien encore un déplacement de charge. Ils peuvent ainsi osciller entre deux configurations magnétiques différentes : "haut spin" et "bas spin". Ces interrupteurs moléculaires pourraient également constituer le composant élémentaires des mémoires de demain.

Les aimants moléculaires peuvent également jouer un rôle non négligeable dans l'information quantique. Cette dernière vise à utiliser les propriétés des systèmes quantiques afin d'obtenir des algorithmes plus efficaces pour la factorisation des nombres premiers (avec des applications dans la cryptographie notamment) ou bien encore la recherche dans les bases de données. Des phénomènes quantiques tels le QTM ou bien la phase de Berry pourrait être utilisé dans ce cadre.

Nous allons maintenant illustrer certaines de ces propriétés à travers l'exemple d'un aimant moléculaire bien connu le octanuclear fer(III) oxo-hydroxo cluster dont la formule est  $[\text{Fe}_8\text{O}_2(\text{OH})_{12}(\text{tacn})_6]^{8+}$  ou  $\text{Fe}_8$ .

### 1.2.3 L'exemple du $\text{Fe}_8$

Le  $\text{Fe}_8$  se compose de huit atomes de fer de degré d'oxydation III, chacun de ces atomes constituant un centre magnétique de spin  $5/2$ . De part les différentes interactions qui les lient, ils adoptent la configuration présenté dans la Fig.1.1.b en encart avec un moment résultant total de  $S = 10$ , le moment magnétique des deux atomes centraux se trouvant dans la direction opposée aux six atomes latéraux.

Les propriété magnétique de ce système peuvent être décrite par l'hamiltonien suivant :

$$E = -DS_z^2 + \frac{E}{2}(S_+^2 + S_-^2) + g\mu_b BS_z \quad (1.1)$$

où  $D$  est le paramètre d'anisotropie axiale,  $E$  est le paramètre d'anisotropie transversale,  $S_z$  est la projection sur  $z$  du moment magnétique et  $S_+$  et  $S_-$  les opérateurs création annihilation.

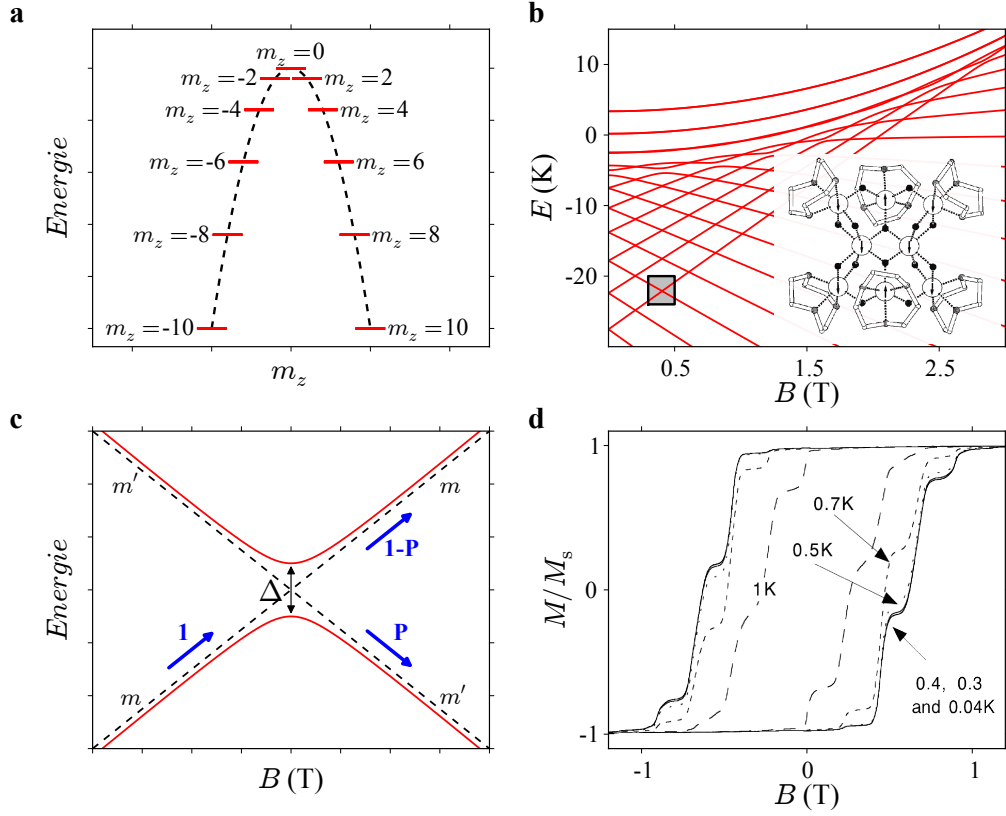


FIGURE 1.1 – **a** : énergie en fonction du nombre quantique  $m_z$ . Les deux orientations  $m_z = \pm 10$  sont séparées par une barrière d'énergie de hauteur  $|D|S^2$  [?]. **b** : diagramme Zeeman de la molécule  $\text{Fe}_8$  représentant l'énergie des différents états du système en fonction du champ magnétique. Certains croisements, comme celui marqué d'un carré, sont en fait des anti-croisements traduisant un couplage entre les états. **c** : anti-croisement représentant un couplage entre les états  $m$  et  $m'$ . **P** est la probabilité de transition entre les états  $m$  et  $m'$  lorsque l'on balaie l'anti-croisement en champ magnétique. **d** : mesure de l'aimantation d'un cristal de  $\text{Fe}_8$  obtenue par technique micro-squid pour différentes températures. Les anti-croisements sont visibles à travers les marches qui traduisent un renversement de l'aimantation d'un grand nombre de molécules pour des valeurs particulières du champ magnétique (extrait de [?]).



## **1.3 La spintronique moléculaire**

### **1.3.1 État de l'art**

### **1.3.2 La spintronique dans notre groupe**



# Bibliographie

- [1] David D. Awschalom and Michael E. Flatte. Challenges for semiconductor spintronics. *Nat Phys*, 3(3) :153–159, March 2007.
- [2] Supriyo Datta and Biswajit Das. Electronic analog of the electro-optic modulator. *Appl. Phys. Lett.*, 56(7) :665–667, February 1990.
- [3] Mark Johnson. The bipolar spin transistor. *Nanotechnology*, 7(4) :390–, 1996.
- [4] Biqin Huang, Douwe J. Monsma, and Ian Appelbaum. Experimental realization of a silicon spin field-effect transistor. *Appl. Phys. Lett.*, 91(7) :072501–3, August 2007.