

TOUT S'EXPLIQUE

PAR AUDE GANIER, EN COLLABORATION
AVEC BERNARD DIÉNY (CEA-IRIG)



Bienvenue en spintronique

Mariage entre électronique et magnétisme, cette discipline de rupture est utilisée dans de nombreux dispositifs. En plus de ses performances élevées, elle est frugale en énergie.

La spintronique, ou électronique de spin, a émergé dans les années 1980. Et c'est en 1991 qu'elle a vu le jour au CEA, « trois ans après la découverte par Albert Fert et Peter Grünberg du phénomène dit de "magnétorésistance géante" qui leur valut le prix Nobel de physique de 2007 », rappelle Bernard Diény, directeur de recherche au CEA-Irig à l'origine du laboratoire Spintec (voir focus). Des recherches expérimentales et théoriques ont alors commencé au CEA-Irig, puis quelques années plus tard au CEA-Iramis, en association avec le CEA-Leti pour l'utiliser dans divers dispositifs. Car en manipulant le spin des électrons plutôt que leur charge, la spintronique apporte de nombreux avantages telles qu'une électronique très basse consommation et de nouvelles fonctionnalités.

Le CEA pionnier

Cette technologie est aujourd'hui utilisée de façon universelle dans les mémoires magnétiques non volatiles MRAM (voir infographie pages suivantes). Dès 1998, elle fut intégrée dans les têtes de lecture des disques durs d'ordinateurs grâce à des travaux de Bernard Diény, permettant un doublement chaque année de la capacité de stockage.

De nombreuses applications

Autres dispositifs : les capteurs de champ magnétique, très utilisés dans les secteurs de l'automobile, la robotique, les biotechnologies et le biomédical. « Les recherches profiteront à terme à d'autres domaines comme le calcul dans la mémoire, la cybersécurité, les télécommunications, les data centers, l'intelligence artificielle... », indique Lucian Prejbeanu, directeur de Spintec, en ajoutant que cette discipline devenue incontournable est inscrite dans les stratégies d'accélération du plan France relance 2030.

FOCUS

Spintec, laboratoire d'excellence

« Centrés sur la spintronique, les travaux de Spintec vont des concepts émergents (matériaux, phénomènes physiques, théorie) jusqu'au développement de dispositifs innovants et au transfert de technologies ; ce qui constitue une démarche assez rare en France. Sa production excellente, tant en quantité qu'en qualité, se compare (...) aux meilleures unités mondiales du domaine », souligne en 2020 le Haut conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres).

Créé en 2002 par le CEA et le CNRS à Grenoble, avec douze chercheurs, le laboratoire Spintec a notamment contribué à l'émergence des mémoires MRAM. En 20 ans, il a déposé plus de 80 brevets, et essaimé quatre start-up dont trois sont toujours en activité : Crocus Technology, Hprobe et Antaios. Spintec compte aujourd'hui une centaine de membres.

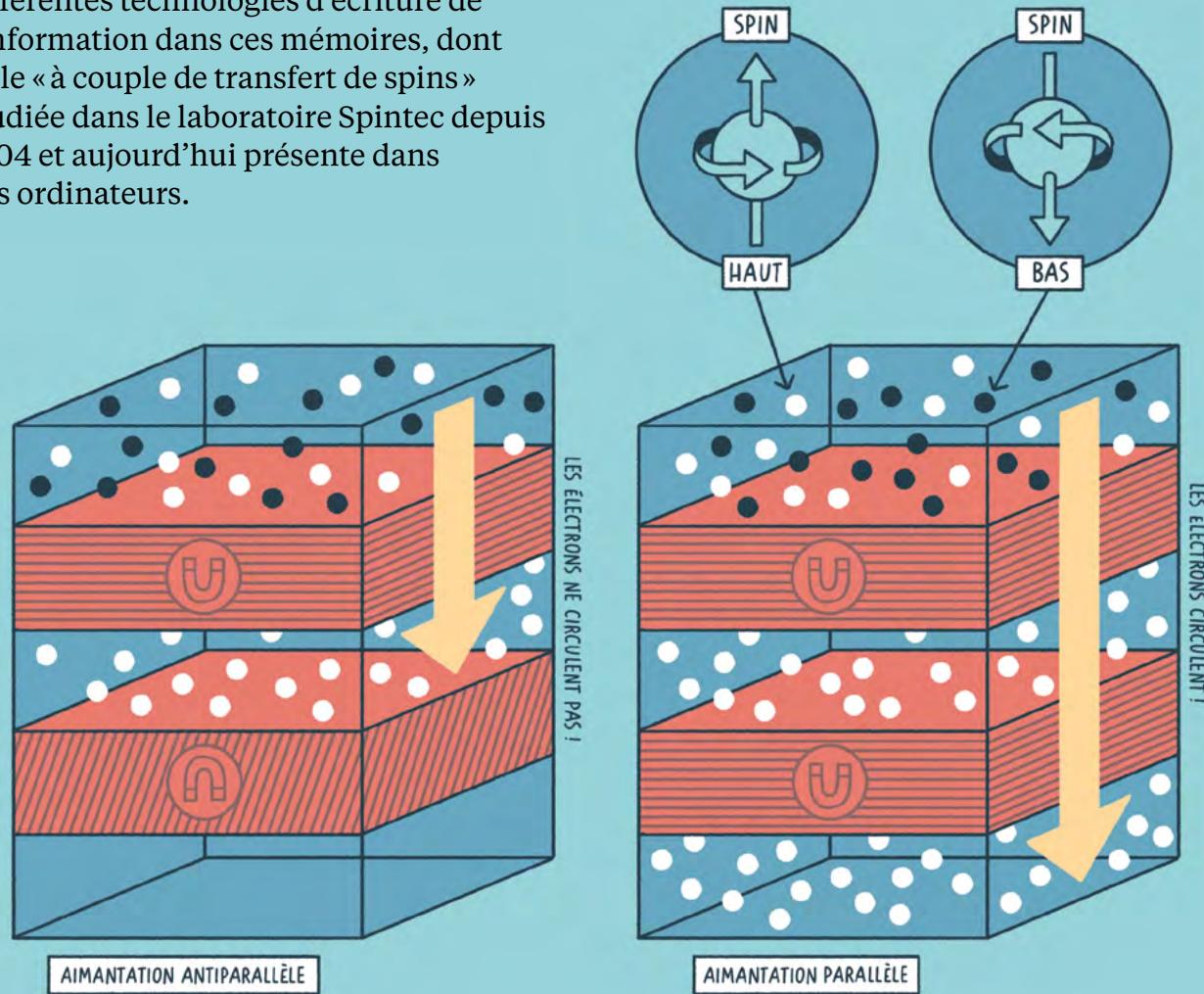
FOCUS

Avantages pour les MRAM

- **Non-volatilité** : les données sont stockées sous la forme d'une orientation magnétique, celle des couches des jonctions tunnel qui demeure en l'absence d'alimentation électrique.
- **Vitesse d'écriture** : jusqu'à 0,3 nanoseconde, soit 1 000 à 100 000 fois plus rapide qu'une mémoire flash.
- **Endurance à l'écriture** : les matériaux ferromagnétiques autorisent plus de cycles d'écriture-lecture que les mémoires impliquant des déplacements atomiques (matériaux à changement de phase ou oxydes résistifs).
- **Faible voltage utilisé** : qui permet d'être 400 fois plus économe en énergie qu'une mémoire flash lors de l'écriture.

La mémoire MRAM

La *Magnetic Random Access Memory* est une mémoire non volatile (conservant les données sans alimentation électrique) qui utilise le spin des électrons. Il existe différentes technologies d'écriture de l'information dans ces mémoires, dont celle « à couple de transfert de spins » étudiée dans le laboratoire Spintec depuis 2004 et aujourd'hui présente dans nos ordinateurs.

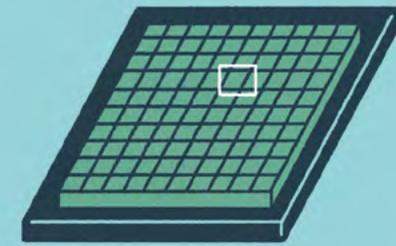


LE SPIN
Les électrons ont deux caractéristiques : leur charge électrique et leur masse. S'ajoute le spin, propriété quantique de « moment angulaire » de l'électron, à l'instar d'une toupie aimantée. Selon le sens de rotation de l'électron sur lui-même, le spin a une orientation-aimantation vers le haut ou vers le bas.

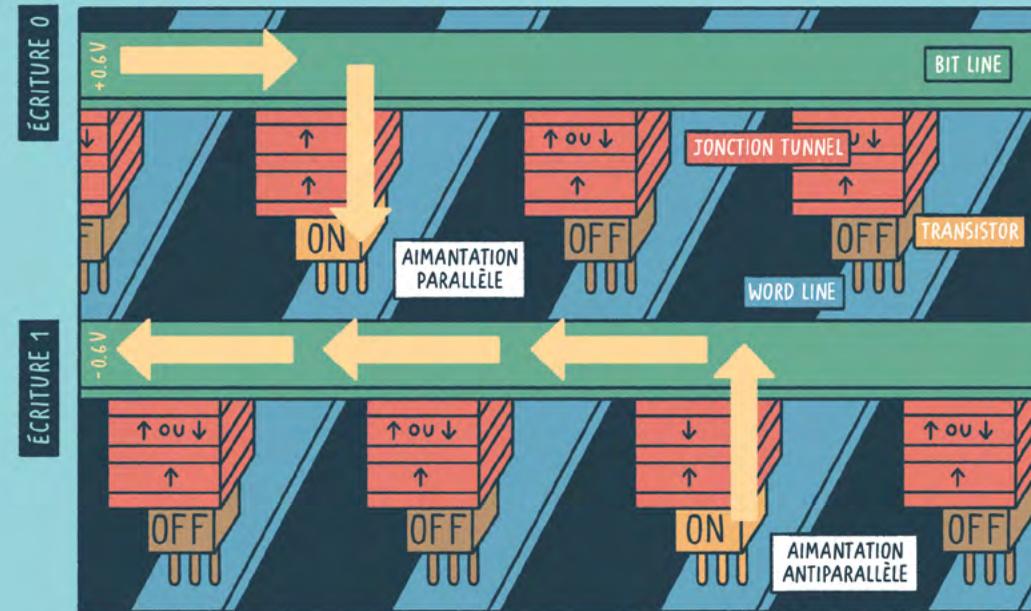
LA SPINTRONIQUE
Alors qu'en électronique, les électrons sont manipulés grâce à leur charge électrique ; en spintronique, le spin est utilisé comme un degré de liberté supplémentaire pour agir sur les électrons. Les dispositifs comprennent souvent deux couches magnétiques dont l'orientation relative des aimantations peut être modifiée, laissant circuler ou non les électrons selon l'orientation de leur spin.

LA JONCTION TUNNEL MAGNÉTIQUE
Une jonction tunnel est constituée de deux couches magnétiques séparées par une couche isolante que les électrons traversent par « effet tunnel » (phénomène quantique). Selon lui, une particule peut franchir une barrière de potentiel même si son énergie est inférieure à la hauteur de la barrière d'énergie. Comme les électrons sont polarisés en spin dans une jonction tunnel, leur passage à travers la barrière dépend de l'orientation des aimantations des deux couches. Cela se traduit par une variation de résistance électrique de la jonction (appelée « magnétorésistance tunnel »).

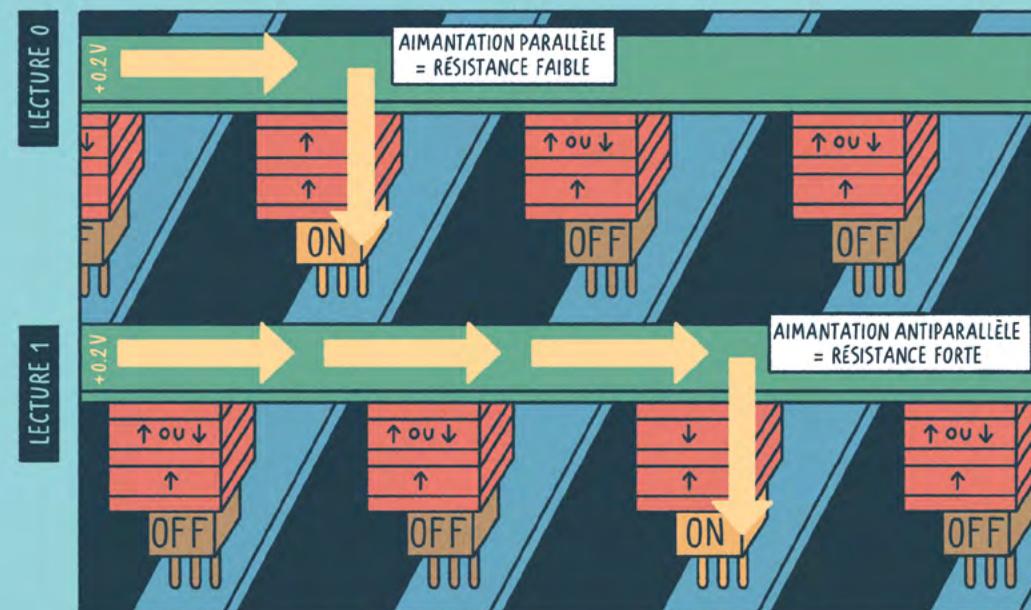
La MRAM
Une MRAM est un réseau de lignes (*bit* et *word lines*) qui connectent des jonctions tunnel à des transistors pour former des points mémoire. L'information binaire (0 ou 1) est codée dans une jonction tunnel par l'orientation de l'aimantation de ses couches magnétiques : celle dite de référence est fixe ; celle du stockage peut être modifiée. Cette orientation est pilotée par l'application de tensions successives (on ne peut pas coder en même temps deux jonctions) effectuée par l'électronique du programme informatique.



1 Gbit
Capacité de stockage d'une mémoire composée d'1 milliard de jonctions tunnel



Écriture par transfert de spins
Pour écrire 0 sur une jonction tunnel donnée, une tension (0,6 V) est appliquée sur la *bit line* correspondante et une autre sur la *word line* du transistor pour le rendre passant (ON). Une circulation importante des électrons se produit de la couche de référence (↑) vers la couche de stockage (transfert de spins), forçant l'aimantation de cette dernière à devenir parallèle (↑) à celle de référence.
Pour écrire 1, une tension inverse (-0,6 V) est appliquée, les électrons circulent alors de la couche de stockage (↓) vers la couche de référence (↑), induisant leur aimantation antiparallèle.



Lecture par mesure de la résistance électrique
La lecture consiste à mesurer la résistance électrique des jonctions tunnel, en appliquant une tension plus faible (0,2 V). «0» correspond à la mesure d'une résistance faible (de l'ordre de 5 kilo-ohms) qui indique que la jonction est en configuration magnétique parallèle.
«1» correspond à une résistance forte (15 kΩ) car la configuration est antiparallèle.