

Dossier : Le Stockage des Données

SOMMAIRE

Editorial (p. 3)

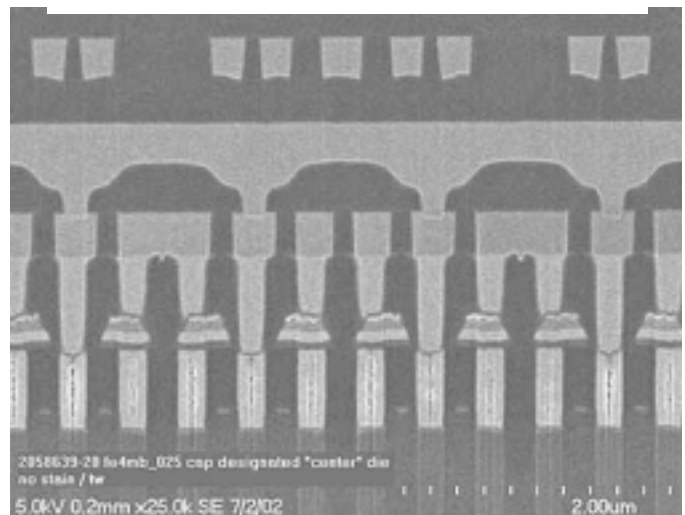
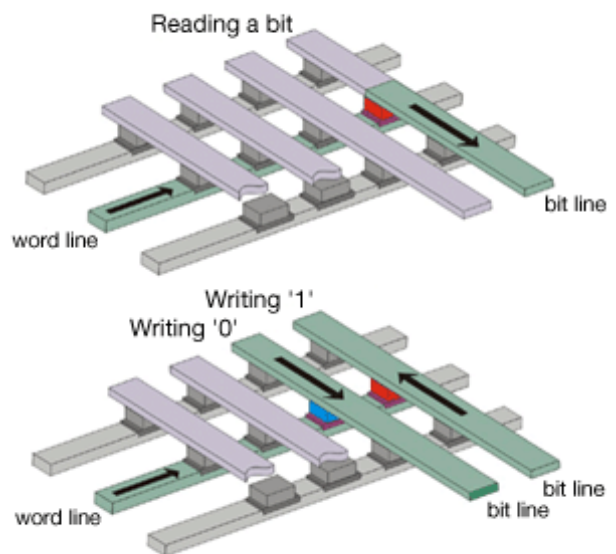
Dossier (p.4)

Le stockage des données a toujours été une composante essentielle de l'informatique et a connu régulièrement des évolutions. Les travaux de recherche qui continuent sur ce sujet vont à nouveau autoriser le développement de produits avec des capacités plus grandes, des temps d'accès plus courts et de nouvelles fonctionnalités. Ces progrès affectent les trois grandes familles d'enregistrement : les mémoires, les bandes magnétiques et les techniques optiques. Les technologies utilisées font appel pour la plupart aux propriétés magnétiques des matériaux aux très petites échelles. Des progrès sont également attendus dans la mise au point de nouveaux matériaux optiques, ou dans l'utilisation des découvertes récentes en nanotechnologies et en spintronique.

Références (p. 20)

Glossaire des sigles utilisés (p. 20)

MRAM Architecture



ÉTATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES

NANOSCIENCE, MICROÉLECTRONIQUE,
MATÉRIAU

N°07, OCTOBRE 2003

*Pour vous **abonner gratuitement** à la lettre ETATS -UNIS SCIENCES PHYSIQUES et être informé en priorité de la disponibilité des prochains numéros, il suffit d'envoyer un courrier électronique à l'adresse:*

subscribe.physiques.usa@adit.fr

Vous recevrez en retour une confirmation d'abonnement.

Directeur de la publication :
Christine BENARD

Rédacteurs en chef :
Serge HAGEGE
Christophe LEROUGE

Rédacteurs :
Ludovic VERGER
Jean-Philippe SCHWEITZER
Michael Ronan NIQUE

Mise en page et Publication :
Jean-Philippe SCHWEITZER
Raegen SALAIS

Ont collaboré à ce numéro :

ÉTATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES est une publication mensuelle (dossier hors série trimestriel) de la Mission Scientifique et Technologique de l'Ambassade de France aux Etats- Unis, dont le site internet est :
<http://france-science.org>

Vous y trouverez un archivage des anciens numéros de la lettre et découvrirez aussi les autres publications de la Mission Scientifique:

- ETATS-UNIS MICROELECTRONIQUE/
MATERIAUX (ARCHIVES PRÉCÉDANT LA FUSION)
- ETATS-UNIS ESPACE
- ETATS-UNIS ENVIRONNEMENT

Les Autres Publications de la Mission Scientifique

Vous pouvez également lire les dossiers et les périodiques suivants en vous adressant à l'ADIT (27bis quai Anatole France 75007 Paris - Monsieur Jérôme Gougeon - jg@adit.fr) ou à la Mission Scientifique de San Francisco (science@consulfrance-sanfrancisco.fr):

MICROELECTRONIQUE - TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Microsystèmes en France: Un regard américain
- Un aperçu de l'Economie de la Baie de San Francisco
- La microélectronique du futur aux USA
- Microsystèmes aux USA
- La santé sur internet
- La présence française dans les technologies de l'information autour de la baie de San Francisco et dans la Silicon Valley
- Biopuces : Présentation des principaux acteurs aux Etats-Unis
- Tendances technologiques : Les derniers investissements en capital-risque
- Electronique embarquée dans l'automobile

INNOVATION, TRANSFERT DE TECHNOLOGIES, UNIVERSITES

- Coopération Universitaire entre la France et les USA : l'exemple de Stanford.
- La Californie Pôle Scientifique et Technologique de l'Ouest.
- *Office of Technology Licensing* UC Berkeley, Stanford University.
- *UCSD CONNECT®*, un incubateur «sans murs».
- Relations Industrie/Université: l'exemple de l'Université de Californie.
- Le Système Universitaire Californien : fiches techniques.

GENIE GENETIQUE, BIOMEDECINE, ENVIRONNEMENT

- Le Fonds France-Berkeley
- L'Astrobiologie aux Etats-Unis
- Post-Genomics: A French-American Dialogue
- La Santé sur Internet
- L'université de Californie et l'industrie de biotechnologie
- L'industrie des biotechnologies dans le secteur des Neurosciences

MATERIAUX, NANOTECHNOLOGIE

- L'industrie lourde américaine à l'assaut du Business to Business.
- Les Nanotechnologies aux Etats-Unis

AUTRES

- (<http://www.cnrs.fr/DRI/Washington/Actualite/FTP/Index.html>)
- Présence Française en science et en ingénierie aux Etats-Unis
 - L'activité de recherche et de développement dans les universités américaines
 - Interactions entre la France et les Etats-Unis en science et ingénierie
 - L'évaluation des projets scientifiques au sein de la "National Science Foundation" américaine

Nous consacrons ce nouveau numéro à un sujet d'électronique. Au moment où la course à la surenchère technologique s'emballe entre les fondeurs pour mettre au point des processeurs toujours plus optimisés, il nous a semblé important de présenter l'état de l'art sur une autre fonction tout aussi importante de l'informatique et de l'électronique : le stockage des données. Avec l'explosion des technologies numériques, les besoins sont en effet considérables pour accroître les capacités et améliorer les fonctionnalités de ces composants. De nouvelles solutions sont développées et bientôt introduites sur le marché.

Ce numéro est une nouvelle fois l'occasion de montrer que le secteur de l'électronique bénéficie très rapidement des nouvelles avancées développées dans les milieux académiques (spintronique, nanotechnologies...). Dans ce domaine plus que dans d'autres, la course est permanente entre les entreprises aidées par les laboratoires académiques pour sortir avant les concurrents, de nouveaux composants plus performants, plus petits, moins gourmands en énergie...

La Californie, principalement dans la Silicon Valley, reste un des pôles mondiaux où cette électronique du futur se construit. Les liens entre les laboratoires universitaires et les entreprises y sont particulièrement étroits et permettent facilement les transferts de technologies débouchant sur des produits nouveaux.

Bien sûr, l'industrie des semiconducteurs évolue constamment et la région de San Francisco doit lutter pour conserver ses entreprises et son avance. Il y a vingt ans, les fondeurs de la Silicon Valley délocalisaient déjà la fabrication des composants électroniques en raison des coûts de fabrication et de main d'œuvre trop élevés dans la région. Aujourd'hui ce sont les équipes de R&D qui sont victimes de ce phénomène. Les ingénieurs et les chercheurs dans des pays comme l'Inde ou la Chine, ont un niveau de compétence et de formation tout aussi élevé qu'aux Etats-Unis, mais demandent des salaires dix fois moindres. Dans les entreprises américaines de haute technologie tout secteur confondu, un emploi sur trois serait concerné par ce risque de délocalisation. Si ce phénomène a lieu globalement des USA vers l'étranger, on l'observe également à l'intérieur même du pays, avec un déplacement des entreprises de la Silicon Valley vers d'autres états moins chers, comme le Texas.

Dans les médias californiens, ce sujet inquiète d'autant plus que l'économie globale peine à redémarrer. L'attractivité de la Californie serait-elle remise en question ? Voilà un beau sujet de réflexion et d'action pour le gouverneur Schwarzenegger nouvellement élu !

*Christophe Lerouge
Attaché pour la Science et la Technologie
San Francisco*

Le Stockage des Données

Marchés, Applications

Le stockage des données a toujours été une composante essentielle de l'informatique. Il a connu de nombreuses évolutions depuis les premières cartes perforées : disques durs inventés au milieu des années 50, bandes magnétiques, mémoires RAM créées par Intel en 1969 pour équiper son premier microprocesseur, disquettes, disques optiques... Plusieurs éléments montrent que ce secteur connaîtra des évolutions à plus ou moins long terme. Les progrès techniques vont autoriser le développement de nouveaux produits avec des capacités plus grandes, des temps d'accès plus courts et de nouvelles fonctionnalités. Ces innovations technologiques sont présentées en détail dans ce dossier. Par ailleurs, les "roadmaps" définies par les professionnels du secteur montrent que les technologies actuelles atteignent leurs limites (effet superparamagnétique, absence de matériaux optiques adéquats...) et n'arrivent plus à suivre le rythme imposé par les autres composants électroniques. Par exemple, pour les mémoires, les vitesses de lecture/écriture n'ont pas connu la même croissance que les évolutions des fréquences d'horloge des microprocesseurs. La vitesse de ces derniers double tous les 18 mois tandis que celle des mémoires double tous les 10 ans. Enfin parce que les besoins de stockage croissent de façon exponentielle dans tous les domaines professionnels comme grand public, en particulier à cause de la généralisation du traitement numérique des informations qui permet la convergence des technologies. Ces nouveaux usages, liés à l'engouement du grand public pour le numérique, tirent le marché et nécessitent **de nouvelles fonctionnalités : non volatilité des mémoires, consommations énergétiques plus faibles, capacité de stockage plus importante, sécurité accrue.**

On peut distinguer trois grandes familles de moyens d'enregistrement :

- Les mémoires sur circuits intégrés (RAM, ROM...);
- Les techniques magnétiques basées sur le principe de l'aimantation d'une couche magnétique ;
- Les techniques optiques avec gravure des informations sur une surface (disque) par modification physique de la couche d'enregistrement et lecture par système optique.

Ces deux dernières technologies étaient considérées comme des mémoires de masse sans concurrence avec les mémoires sur circuit. Cependant ces dernières ont connu récemment un tel développement qu'elles permettent désormais de stocker une quantité d'information très importante.

En 2002 le **marché mondial des mémoires** (DRAM, SRAM, mémoires flash, EPROM) **s'est élevé à 28,4 milliards de \$** en hausse de 6% par rapport à l'année précédente¹. Le marché a connu son pic en 2000 avec un montant de 45 milliards de \$ pour s'effondrer l'année suivante avec l'explosion de la bulle Internet. Dans ce contexte, les mémoires flash ont connu la croissance la plus forte de ces dernières années, grâce à la diffusion massive des téléphones portables, des appareils photos numériques et des autres outils électroniques nomades. Une attention particulière doit être portée aux petits périphériques de stockage, utilisant des mémoires flash et connectés par une interface USB (Universal Serial Bus) qui connaissent une croissance fulgurante depuis le début de l'année.

D'après les prévisions du NSIC², **le nombre de disques durs** vendus par an est en croissance et devrait atteindre plus de **180 millions de vente en 2006**. Ces ventes résultent de la croissance du nombre d'ordinateurs personnels vendus, mais sont aussi soutenues par l'explosion des appareils portables embarquant un disque dur, tel que le lecteur mp3 iPod d'Apple ou les magnétoscopes à disques. La totalité des unités de stockage de données (appareils) vendues en 2001 était de 528 millions d'appareils, dont 38 % de disques durs, 33 % de systèmes optiques et 29 % de disquettes. Ces ventes représentaient un marché global de stockage de données (support) en 2001 de 35,5 Milliards de \$, répartis de la manière suivante : 58% Disque Dur ; 27% Optique ; 10% Bande ; 5% Disquette.

Les critères de choix entre les différentes technologies se feront sur : la **sécurité** (sûreté des sauvegardes), les **fonctionnalités** (volume, vitesse, consommation d'énergie) et le **coût**. Les solutions actuelles les plus abordables sont les clés USB avec 256Mo (Méga octet) pour moins de 100\$. Viennent ensuite les mini-disques d'une capacité de 1,5 Go (Giga octet) et les disques durs externes portables pour une capacité de 20 à 60Go. Autre solution à plus long terme, les DVD enregistrables avec un minimum de 5Go. Les professionnels s'attacheront plutôt au coût par unité de données enregistrées. En 2002, le stockage d'un Giga octet coûtait : 100 \$ sur un disque dur ; 50\$ avec une DRAM, 10\$ sur un disque optique ; 0,5\$ sur une bande magnétique.

Magnétisme

Classes des matériaux en fonction de leur comportement sous le champ H :

Les matériaux peuvent être classés à l'intérieur de groupes définissant leurs propriétés magnétiques:

- diamagnétiques ;
- paramagnétiques ;
- ferro et ferrimagnétiques.

(k = susceptibilité magnétique).

Si $k < 0$, on parle de **diamagnétisme**. Si le matériau est placé dans un champ magnétique extérieur, l'intensité de la magnétisation induite est dans la direction opposée au champ inducteur. Phénomène faible, réversible, affectant tous les corps et souvent caché par un autre phénomène. (Ex.: quartz, feldspath, sel.)

Si $k > 0$, le matériau est alors **paramagnétique**. Comme le diamagnétisme, c'est un phénomène faible et réversible. Mais dans ce cas le champ induit renforce l'action du champ inducteur. Le champ induit décroît cependant avec la température. (Ex.: les métaux, gneiss, pegmatite, dolomie, syénite.)

Dans le cas de corps **ferromagnétiques**, les moments magnétiques de chaque atome s'alignent spontanément dans des régions appelées domaines et cela même en l'absence de champ magnétique externe. En général, le moment magnétique total est nul parce que les différents domaines ont des orientations différentes et leurs effets s'annulent. Le ferromagnétisme disparaît si on dépasse une certaine température, appelée température de Curie.

Si les moments magnétiques d'une substance sont anti-parallèles dans les domaines et de grandeurs différentes, le moment magnétique total est différent de zéro. La substance est alors appelée **ferrimagnétique** (Ex.: magnétite, ilménite). Dans le cas d'une substance ferrimagnétique dont la somme de moments parallèles et anti-parallèles est nulle, on parle d'**anti-ferromagnétisme**.

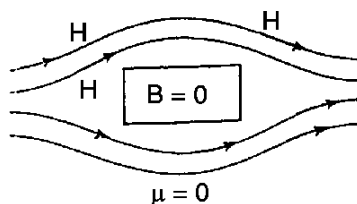
Les électrons sont la cause des propriétés magnétiques de la matière. Ils génèrent des moments magnétiques qui ont deux origines :

- la rotation de l'électron autour du noyau atomique : le moment orbital ;
- le spin de l'électron ou moment cinétique intrinsèque. Dans un champ magnétique extérieur, le spin de l'électron peut prendre uniquement deux orientations, parallèle "spin up", ou antiparallèle "spin down".

Le diamagnétisme :

Dans les corps diamagnétiques, il n'existe pas de moment magnétique permanent. L'application d'un champ magnétique externe induit un moment orbital des électrons, qui crée un moment magnétique opposé au champ extérieur appliqué. Un matériau diamagnétique parfait offre une grande résistance au passage du champ magnétique. Les lignes de champ H ne pénètrent pas dans le matériau. La perméabilité est donc nulle (cf. Figure1).

Figure 1:

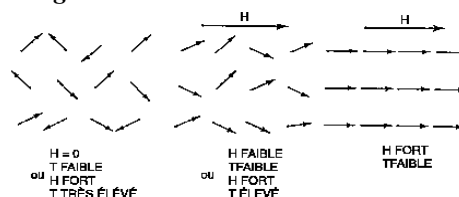


Comportement d'un matériau diamagnétique parfait placé dans un champ magnétique.

Le paramagnétisme :

Dans les matériaux paramagnétiques, les atomes ont un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, ces moments magnétiques s'orientent dans la direction du champ et augmentent le champ H appliqué (cf. Figure2).

Figure 2:

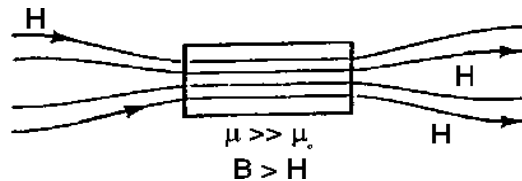


Action combinée de la température et d'un champ extérieur sur un matériau paramagnétique. Les vecteurs symbolisent les courants magnétiques atomiques.

Le ferromagnétisme :

Dans les corps ferromagnétiques, les moments magnétiques sont déjà ordonnés et alignés dans une même direction. Cette orientation peut se faire spontanément, en l'absence d'un champ H extérieur. La région de l'espace dans laquelle tous les moments magnétiques sont orientés selon une même direction s'appelle un domaine (de Weiss) et les limites entre ces domaines, des parois (de Bloch). Si on place un matériau ferromagnétique dans un champ H extérieur, les parois vont se déplacer de manière à renforcer le champ H extérieur. Si H augmente beaucoup, le domaine favorablement orienté occupera tout le volume du matériau qui est alors magnétisé à saturation (cf. Figure 3).

Figure 3:



Comportement d'un matériau ferro ou ferrimagnétique dans un champ magnétique H

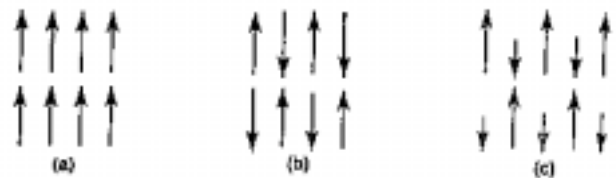
L'antiferromagnétisme :

Lorsque la somme des moments magnétiques des sous-ensembles parallèles et antiparallèles est nulle dans un matériau qui autrement serait considéré comme ferromagnétique, la susceptibilité résultante sera très faible, de l'ordre des substances paramagnétiques. Ces substances sont nommées antiferromagnétiques. (L'hématite est un minéral possédant cette propriété).

Le ferrimagnétisme :

Ce sont des matériaux dans lesquels les domaines magnétiques sont subdivisés en régions qui peuvent être alignés dans des sens opposés les uns aux autres, mais dont le moment magnétique total n'est pas nul lorsque le champ extérieur est nul.

Figure 4:



Répartition des moments magnétiques élémentaires: a. ferromagnétiques, b. antiferromagnétiques et c. ferrimagnétiques

Sauvegarde Magnétique :

Les principaux enjeux pour les futures générations de système de stockage de données concernent d'une part l'**augmentation de la densité** des mémoires, et d'autre part la mise au point de **mémoires non volatiles** et rapides. Le caractère volatile des mémoires augmente considérablement leur **consommation énergétique** (nécessité de réécrire la même information en permanence pour ne pas la perdre), et constitue un facteur limitant pour les applications (un ordinateur qui disposerait de RAM non volatile pourrait à l'allumage revenir «instantanément» dans sa configuration d'extinction). Les **mémoires magnétiques** sont dès lors intéressantes: les propriétés magnétiques se conservant sans alimentation énergétique, ces mémoires gardent les données sans consommation électrique.

Augmenter la densité des mémoires consiste à diminuer la taille physique utilisée pour représenter un bit (0 ou 1). Cette diminution de taille s'accompagne de plusieurs problèmes :

1/Disque Dur, milieu continu, couplage :

Le stockage magnétique de données sur les disques durs se fait sur un **milieu continu**. Un bit est représenté par une orientation d'un moment magnétique du milieu. Pour augmenter la densité de stockage, il faut augmenter le nombre de moments polarisés par unité de surface. Au-delà d'une certaine densité, les moments deviennent trop proches et, le milieu étant continu, commencent à interagir et à se coupler. Il n'est alors plus possible de contrôler l'écriture des bits.

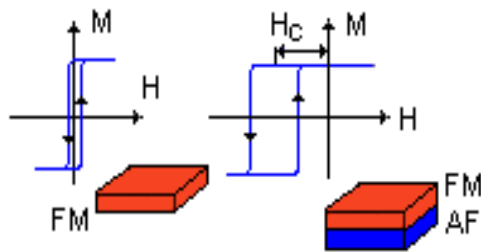
Une solution consiste à «discrétiser» le milieu, i. e. supprimer son caractère continu en introduisant une ligne de défaut entre 2 bits pour limiter le couplage. Lorsque l'on souhaite atteindre de grandes densités, les dimensions caractéristiques deviennent nanométriques et la lithographie optique n'est plus suffisante. Il faudrait donc utiliser d'autres lithographies (ionique, électronique) qui ne sont plus des procédés en parallèle mais en série, c'est à dire trop lents et trop chers pour l'industrie des semiconducteurs.

Limite superparamagnétique :

Lorsque l'on atteint de très petites tailles, le moment magnétique représentant un bit est d'autant plus faible. De même, la **barrière magnétique** (champ H extérieur minimal à fournir) pour changer l'orientation d'un moment magnétique dans le matériau ferromagnétique diminue et peut devenir de l'ordre de kT . L'**agitation thermique** peut donc suffire pour changer l'orientation des moments magnétiques : le matériau perd son caractère ferromagnétique en devenant **superparamagnétique**. Dès lors, la stabilité d'un bit n'est plus garantie et ses propriétés de mémoire disparaissent. Cette limite est de l'ordre de 1 Tbit/inch^2 (bsi : bit/square inch : bit par pouce carré).

La **superposition** (Cf. figure 5) de matériaux ferromagnétiques et antiferromagnétiques semble repousser cette barrière. Mais ces systèmes sont mal connus aux dimensions nanométriques. Une conséquence d'une telle superposition est le **BIAS** : c'est le décalage vers la gauche de la courbe d'hysteresis de magnétisation en fonction du champ appliqué. Ce BIAS fait l'objet de nombreuses études, notamment pour connaître son influence sur l'ordonnée à l'origine de cette courbe, c'est à dire le moment magnétique rémanent après extinction du champ appliqué. C'est typiquement ce moment qui va déterminer l'utilisation éventuelle de tels systèmes comme mémoire : est-il suffisamment élevé pour être facilement détectable ? D'autre part, il faut être capable de distinguer sans équivoque deux configurations différentes pour coder les états 0 ou 1 des bits.

Figure 5 : Superposition de matériaux FM sur AF. Le décalage de la courbe d'aimantation résulte de l'accumulation de spins non compensés à la surface, ce qui crée une anisotropie du système.



3/ Fabrication :

De telles structures de dimensions nanométriques ne sont aujourd'hui pas réalisables par lithographie optique, qui offre l'avantage de gravures parallèles, donc rapides et peu chères. Ce n'est pas le cas pour des motifs de très petites dimensions (nm) où des technologies de gravures plus «dures» sont nécessaires (faisceaux ioniques, électroniques) qui sont des procédés en série et ne pouvant traiter que de faibles surfaces à la fois ($\sim 100 \times 100 \mu\text{m}^2$). Ces méthodes sont trop lentes et chères pour des fabrications industrielles.

Une des alternatives explorées repose sur l'auto-assemblage de structures nanométriques. D'après Igor Roshchin de UCSD, ces méthodes sont non seulement peu chères, mais de surcroît «naturelles». En effet, le contrôle de l'assemblage est assuré en jouant sur l'énergie globale du système qui atteint son équilibre et sa configuration finale en minimisant son énergie globale.

Enjeux Technologiques

Si les disques durs fonctionnent depuis longue date en utilisant les propriétés magnétiques des matériaux, cette tendance semble désormais concerner les mémoires vives avec le développement des MRAMs. De nombreux concepts sont alors communs et il est fondamental de comprendre les propriétés magnétiques des matériaux aux très petites échelles (nanomagnétisme). Ces concepts sont présentés dans l'encadré sur le magnétisme pages 5 et 6.

RAM : Vers des nouvelles mémoires indélébiles

Les mémoires vives (RAM : random access memory), qui sont de plus en plus denses et rapides, ne sont pas capables de conserver l'information sans alimentation électrique : les données doivent être en permanence réécrites. Aujourd'hui, les

seules mémoires non volatiles sur le marché sont les mémoires Flash. Elles sont très présentes dans les téléphones portables, les appareils photos numériques etc. Malheureusement, les mémoires flash sont lentes d'accès (environ 1 microseconde, contre quelques dizaines de nanosecondes pour les RAMs), et de surcroît ne supportent qu'un nombre de cycles de lecture/écriture limité (environ 1 million de cycles). Utilisée comme mémoire principale d'un PC, une mémoire flash commencerait à se détériorer après quelques semaines.

Le caractère non volatile d'une mémoire est essentiel : il permet d'une part de diminuer considérablement la consommation énergétique de l'appareil (puisque'il n'est pas nécessaire de réécrire en permanence l'information pour ne pas la perdre), et d'autre part de conserver sans alimentation des instructions essentielles au fonctionnement de l'appareil électronique, notamment son allumage. Ainsi, un ordinateur muni de mémoire vive non volatile pourrait retrouver à l'allumage sa configuration avant extinction instantanément, sans période de

démarrage et de chargement du système en mémoire.

De nombreuses recherches sont donc actuellement menées afin de développer des mémoires qui soient capables de cumuler les avantages des mémoires Flash et des RAM actuelles, ce qui pourrait révolutionner l'industrie de l'électronique. En effet, **les ventes regroupées de mémoire Flash et DRAM représentent de l'ordre de 15% du marché global des semi-conducteurs**. Ces ventes ont été estimées en 2002 à 22 Milliards de \$ et en 2003, à plus de 25 Milliards de \$: la compétition est donc rude pour proposer le premier une nouvelle solution et remporter ce marché (source : data corp, ieee spectrum march 2003).

Outre les mémoires Flash, trois voies principales sont explorées (Cf. figure 6):

- les mémoires ferroélectriques profitant du champ électrique présent dans certains atomes et de son orientation (FRAM),
- les mémoires magnétorésistives qui stockent des données suivant une orientation parallèle ou antiparallèle de petites zones dans des matériaux ferromagnétiques (MRAM),
- Les mémoires Ovonic Unified Memory fonctionnent sur le principe du matériel qui peut commuter entre des phases cristallines et amorphes (OUM).

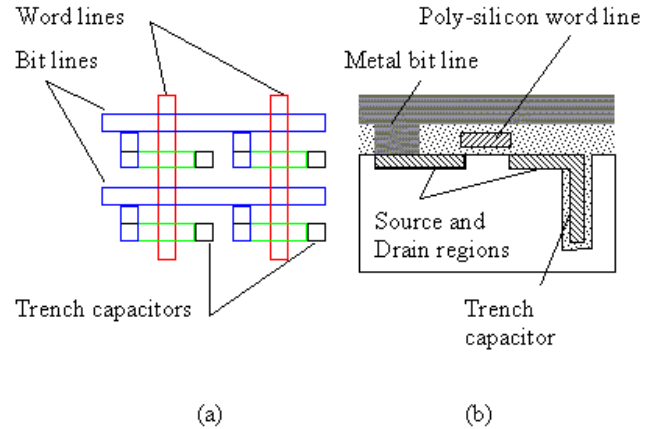
Tableau 6 : tableau comparatif des mémoires non volatiles

	Flash	FRAM	MRAM	OUM
Capacité (Mo)	256	64	1	4
Endurance, Cycles	10 ⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁴	10 ¹²
Voltage (V) lecture/écriture	2/12	1.5/1.5	3.3/3.3	0.4/1
Vitesse (ns) lecture/écriture	20/1000	40/40	50/50	50/50
Masques supplémentaires	6-8	2	4	3-4
Production	Oui	Oui	2004	Oui
Industriels	*AMD *Intel *SST *Sharp *Toshiba *STM	*Fujitsu, *Ramtron, *Samsung, *TI	*IBM *Infineon *Motorola *NEC *Toshiba	*BAE *Intel *Ovonyx *STM

Mémoires DRAM et SRAM

La cellule mémoire élémentaire d'une DRAM (Dynamic RAM) est composée d'un couple transistor - condensateur (Cf. figure 7). Le terme dynamique correspond au fonctionnement interne des composants qui nécessitent un rafraîchissement constant : il est nécessaire de réécrire le bit après l'avoir lu. Les cellules sont organisées en matrices et montées sur des barrettes enfichables sur des connecteurs appropriés. A partir des composants élémentaires, les constructeurs ont fabriqué toute une famille de mémoire dans laquelle on distingue l'ancienne génération asynchrone (FPM, EDO) et la nouvelle génération de mémoires asynchrones (SDRAM, RAMBUS, VC-SDRAM, DDR-SDRAM).

Figure 7 : Cellule mémoire d'une DRAM



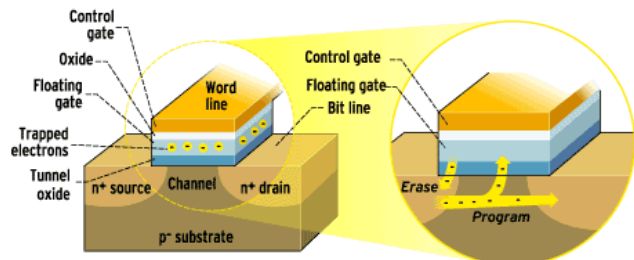
La cellule mémoire élémentaire d'une SRAM (Static RAM) est composée d'une bascule flipflop. Ces bascules sont constituées de 6 transistors montés de telle sorte que l'ensemble ne peut prendre que deux états très stables. Les SRAM ne nécessitent quasiment pas de rafraîchissement et sont donc plus rapides mais aussi plus coûteuses que les DRAM. Elles sont utilisées principalement pour les mémoires cache dans les microprocesseurs.

Mémoires Flash

Contrairement aux DRAM, les mémoires Flash permettent de conserver l'information stockée quand l'alimentation électrique est coupée. Elles ont été initialement développées au milieu des années 80 par Toshiba pour pallier les inconvénients des mémoires non volatiles de type EPROM nécessitant un rayonnement ultraviolet pour l'effacement des données et EEPROM beaucoup plus coûteuses.

La technologie Flash fonctionne par stockage d'électrons dans une couche mince de polysilicium en suspension dans un oxyde, sous une grille de contrôle "on-off" d'un transistor (Cf. figure 8). Ce que l'on appelle «grille flottante» est une couche électriquement isolée par de l'oxyde environnant : une grille de contrôle au-dessus et un canal de transistors en dessous. La lecture de la cellule Flash est simple : il s'agit de mesurer si une tension appliquée à la grille de contrôle allume ou non le transistor. L'écriture est plus complexe et s'effectue en 2 phases : tout d'abord il faut enlever les charges d'un bloc de cellules mémoires (un bloc peut comporter plusieurs milliers de transistors). Ensuite, la cellule est programmée par injection (ou non) d'électrons dans la grille flottante. Cette opération nécessite une énergie élevée pour faire passer les électrons à travers la barrière d'oxyde isolante. Cette dernière opération endommage la couche isolante, ce qui explique l'altération rapide des performances des mémoires flash avec le temps.

Figure 8 : Source : IEEE Spectrum Mars 2003



Principe de fonctionnement d'une mémoire flash : grille flottante. Dans une mémoire flash, la cellule de mémoire est un transistor CMOS modifié par l'ajout d'une grille de polysilicium et d'une jonction oxyde tunnel en dessous.

Pour écrire dans la cellule, les électrons sont injectés à travers la barrière d'oxyde et stockés (emprisonnés) dans la grille. Pour effacer les données, on force le départ des électrons, souvent par effet tunnel à travers le même oxyde. Pour lire la cellule, les lignes de bits et de mots (word and bit lines) sont mises sous tension, et on mesure le courant circulant dans la ligne de bit. S'il y a un excès d'électrons dans la grille flottante, le courant dans la ligne de bit est faible. Sinon, il est élevé.

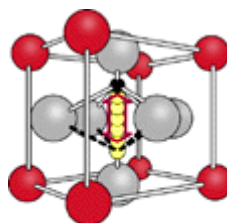
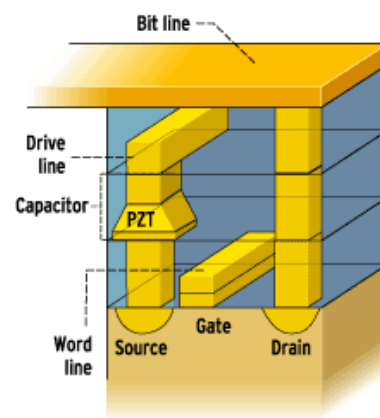
Les mémoires Flash ne disparaîtront pas tout de suite car elles sont peu chères. Elles continueront donc à être utilisées dans des applications " low end ", comme les téléphones portables, les PDA, les sticks mémoires USB, etc...

Mémoires Ferroélectriques : FRAM

Déjà en vente, la RAM ferroélectrique est l'alternative principale aux mémoires flash. Le pionnier de cette technologie, Ramtron International Corp. (Colorado Springs, CO) vend des FRAM depuis 1992, mais avec de faibles capacités (la plus grande faisant 256 Kb). Les FRAMs actuelles souffrent en effet de besoins en alimentation électrique trop élevés et d'une taille de gravure pas assez fine. Afin d'augmenter la densité des FRAM, Ramtron souhaite passer d'une technologie de 0,5 µm fonctionnant avec 3 V, à une technologie de 0,35 µm pour une alimentation de 1,8 V. Texas Instrument (TI) a de son côté annoncé en novembre dernier avoir mis au point une FRAM de 64 Mb avec une largeur de trait 0,13 µm, sur une technologie licenciée de Ramtron.

Le cœur d'une FRAM est composé d'un matériau cristallin ferroélectrique, généralement un alliage PZT, Plomb-Zirconium-Titane (Cf. figure 9). Chaque cellule unité du matériau ferroélectrique possède un champ électrique permanent. Cela résulte d'un décalage entre le barycentre géométrique des électrons et celui des protons, ce qui crée un dipôle électrique. De nombreux matériaux forment des dipôles électriques. Les matériaux ferroélectriques présentent la caractéristique que des millions de dipôles, dans une région appelée domaine, pointent dans la même direction. En appliquant un champ électrique

Figure 9 : Une cellule mémoire de RAM Ferroélectrique fonctionne à partir d'une capacité avec un isolant de PZT (Plomb-Zirconium-Titane). La donnée codée est 0 ou 1 en fonction de l'orientation up ou down du domaine ferroélectrique. Afin de programmer la cellule, on applique un champ extérieur afin d'orienter le domaine (up ou down).



Ferroelectric Crystal: The center atom moves to store ones and zeros.

Pour lire la cellule, les lignes de bits et de mots sont mises sous tension et un faible pulse électrique est appliqué à la capacité, par la « drive line », ce qui crée un champ électrique. S'il est dans la même direction que le champ du domaine, un faible courant apparaît dans la ligne de bit (donnée=0). S'ils sont de directions opposées, un courant fort (donnée=1) résulte du retournement du champ du domaine.

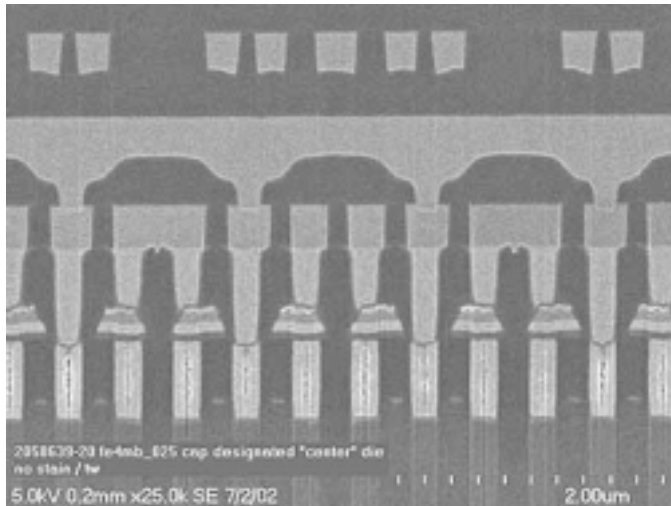
Source : IEEE Spectrum Mars 2003

opposé, les dipôles se retournent afin de pointer à nouveau dans la direction du champ.

La lecture d'une donnée dans une cellule FRAM détruit la donnée stockée dans la capacité. Il est ainsi nécessaire de réécrire le bit après l'avoir lu, comme dans une DRAM. Une FRAM est en fait identique à une DRAM, à une différence majeure près : les capacités des cellules DRAM sont en matériau non ferroélectrique (généralement dioxyde de silicium). Ainsi, une charge stockée dans ces cellules «fuit» vers le substrat de silicium quasiment immédiatement, à moins qu'elle ne soit réécrite en permanence. Ceci augmente considérablement la consommation électrique et engendre évidemment une perte d'information sans alimentation. En raison des structures et des principes de fonctionnement très similaires des DRAM et des FRAM, on peut s'attendre à ce que les FRAM fonctionnent à terme aussi vite que les DRAM. Aujourd'hui, elles restent 50% plus lentes.

Texas Instrument (TI) s'intéresse aux FRAM pour des applications embarquées. La plus grosse barrière pour intégrer de grosses mémoires sur une puce provient de leurs consommations énergétiques, notamment pour les applications sans fil. Il est donc primordial de s'intéresser à des technologies d'intégration de mémoire réduisant la puissance statique au maximum. Si chacune des trois nouvelles technologies de mémoire (FRAM, MRAM, Ovonic) présentent des puissances statiques nulles, Texas Instrument a décidé de se concentrer sur les FRAM pour des raisons économiques. Aujourd'hui, la fabrication d'une puce nécessite en moyenne entre 20 et 26 masques (plus il y a de masques, plus c'est long et cher). D'après Denis

Figure 10 : Vue en coupe de FRAM TI 64 Mb



Source : Texas Instrument

Buss de TI³, l'intégration d'une FRAM ne nécessiterait que 2 masques supplémentaires au procédé de fabrication (contre 4 pour les MRAM). Fujitsu et Ramtron ont vendu plus de 100 millions de puces intégrant des FRAM 256 Kb. TI veut atteindre des densités bien supérieures. Aujourd'hui, TI utilise des mémoires Flash pour répondre aux besoins en mémoires non volatiles, et espère lancer la production de systèmes intégrant des mémoires FRAM d'ici 2005.

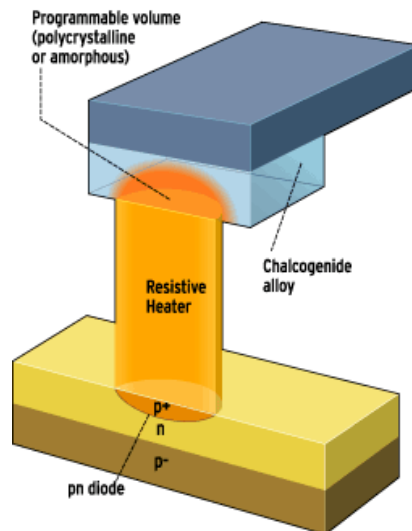
Mémoires sous verre

Le fonctionnement des mémoires sous verre réside dans l'utilisation de Chalcographe, un alliage à base de soufre, sélénium ou tellurium. Les chalcogénides sont présents dans les fibres optiques, et les CDs et DVDs réinscriptibles. Le produit développé par Ovonyx⁴ utilise un alliage de germanium, antimoine et tellurium. Il est utilisable comme mémoire grâce à la commutation rapide de ce matériau entre une phase amorphe stable et une phase cristalline, quand il est chauffé puis refroidi. Ces deux phases représentent les états 0 ou 1. En phase amorphe, le matériau présente une haute résistivité et une faible réflectivité, au contraire de la phase cristalline. Une cellule mémoire est composée d'une électrode, d'une couche de chalcogénide, et d'une résistance chauffante (Cf. figure 11). La base de la résistance chauffante est connectée à une diode. Comme les MRAM (Cf. partie suivante), la lecture de la cellule se fait en lisant sa résistivité, mais contrairement à la MRAM, le changement de résistivité entre les phases est très grand, d'un facteur 100. Pour écrire dans la cellule, le chalcogénide est chauffé au dessus de sa température de fusion puis rapidement refroidi afin d'obtenir la phase amorphe. Pour le rendre cristallin, il est chauffé juste en dessous de sa température de fusion pendant 50 ns, le temps de laisser les atomes adopter une configuration ordonnée.

On envisage d'utiliser des mémoires OUM pour stocker des données depuis les années 60. Cette solution était proposée

Figure 11 :

Le fonctionnement de la mémoire OUM (Ovonic Unified Memory) repose sur un alliage chalcogénide qui, après avoir été chauffé puis refroidi, adopte une des 2 phases stables et programmables : polycristalline ou amorphe. La résistance de la première phase est faible et celle de la 2ème phase élevée. L'état 1 ou 0 dépend de la phase dans laquelle se trouve le volume programmable et qui est déterminée en mesurant sa résistance.



Source : IEEE Spec-

trum Mars 2003

alors par Stanford Ovshinsky⁵. Mais les produits développés à cette époque étaient bien trop gourmands en énergie et trop lents pour s'imposer. Le second souffle actuel des OUM est une conséquence du succès de l'industrie du stockage de données optiques réinscriptibles (CDs et DVDs), qui a développé des matériaux à très grande vitesse de cristallisation, dont l'alliage germanium-tellurium-antimoine est aujourd'hui utilisé par Ovonyx.

Un enjeu pour le développement de mémoires OUM est de diminuer la taille du design afin d'obtenir des mémoires plus denses. On peut se demander jusqu'à quel point deux cellules mémoires peuvent être proches sans que l'état de l'une influence celui de l'autre. Tyler Lowrey, CEO d'Ovonyx, avance que ceci ne devrait pas poser trop de problèmes car "en diminuant la taille des cellules, la chaleur nécessaire à l'écriture d'un bit de donnée diminuera aussi, et donc le profil thermique restera globalement identique".

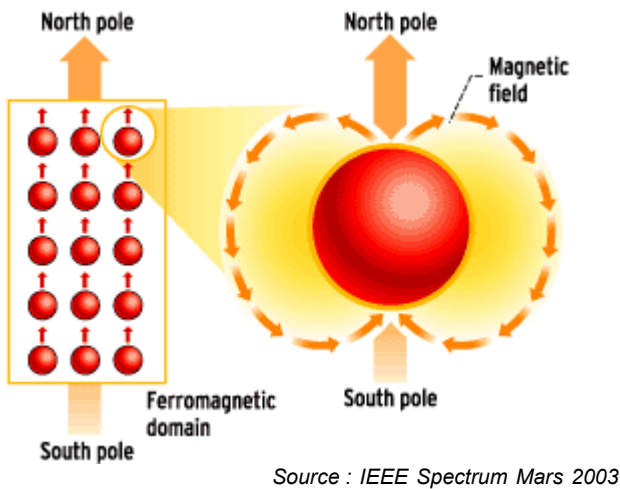
La plus grande mémoire OUM annoncée par Ovonyx est de 4Mb, et a été développée avec Intel Corp (Santa Clara, CA). Ovonyx a aussi signé des partenariats avec deux grands groupes européens, ST Microelectronics⁶ et BAE System⁷. Ces trois partenariats permettent à Ovonyx d'intégrer les mémoires OUM dans des lignes de production CMOS afin de les tester à large échelle.

Mémoires magnétiques : MRAM

La technologie qui semble la plus prometteuse pour s'imposer comme prochaine génération de mémoire vive utilise les propriétés ferromagnétiques de certains matériaux. Dans

ceux-ci, les atomes se comportent comme de minuscules "aimants" et, comme pour les milieux ferroélectriques, s'alignent dans la même direction ce qui engendre un moment magnétique résultant dans un "domaine" (Cf. encadré). Si on applique un champ magnétique extérieur, toutes les lignes de domaine vont s'orienter, et rester dans cette direction après l'extinction du champ extérieur. Si ensuite, un champ est appliqué dans une direction opposée, les domaines se retournent. Ces propriétés rendent les matériaux ferromagnétiques idéaux pour la réalisation de mémoire. (Cf. figure 12)

Figure 12 : Comportement d'un matériau ferromagnétique sous l'influence d'un champ extérieur.

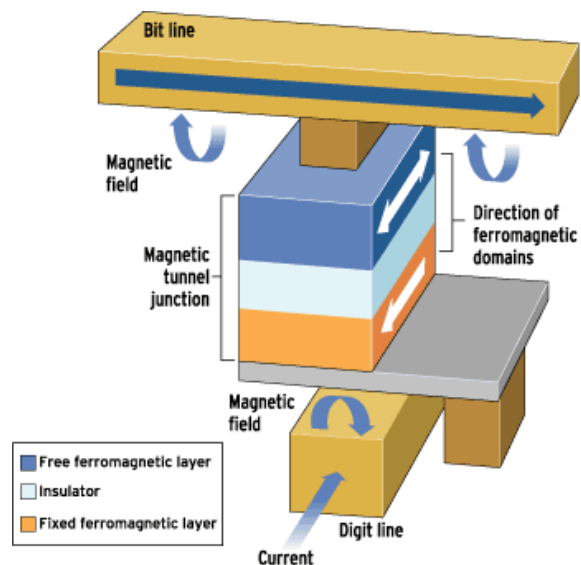


En 1996, la DARPA⁸ a lancé une initiative pour le développement de MRAM, des mémoires magnétiques combinant les avantages des SRAM (grande rapidité) et des DRAM (haute densité), tout en étant non volatiles. Elles concerneraient d'autres applications plus lentes. La DARPA a financé conjointement 3 entreprises pendant 5 à 6 ans: IBM, Motorola et Honeywell. Deux approches technologiques différentes ont été envisagées pour obtenir des MRAMs : la GMR (Giant MagnetoResistance), et la MTJ (Magnetic Tunnel Junction). La GMR, qui est aussi utilisée dans les têtes de lecture des disques durs, s'avère moins efficace pour les MRAM que les «jonctions magnétiques tunnels» car elle requiert 100.000 fois plus d'énergie électrique pour fonctionner. Motorola a donc abandonné cette voie pour rejoindre ensuite IBM qui avait initialement adopté les MTJ.

Motorola⁹ a finalement annoncé en juin dernier une MRAM de 1 Mb et espère entrer en phase de production en 2004. Ils ont choisi de fonder leur technologie sur les jonctions tunnel magnétiques (MTJ : Magnetic Tunnel Junction). Elles sont composées de 2 couches ferromagnétiques séparées par une couche isolante très fine, de quelques nanomètres d'épaisseur, qui bloque le passage des électrons tout en permettant à certains de passer par effet tunnel. Une des 2

couches ferromagnétiques présente des domaines de direction fixe. L'autre est libre, et le système peut donc adopter 2 configurations : parallèles ou antiparallèles, en fonction de l'orientation de la couche ferromagnétique libre. Ces 2 états représentent les 0 et les 1. La lecture des données est immédiate. Un transistor dans la cellule mémoire, qui isole la jonction MTJ du reste des éléments quand il est éteint, est allumé et la résistance de la jonction MTJ est mesurée. En configuration parallèle, la résistance est faible, et en configuration antiparallèle, elle est élevée. Pour être mesurée, cette résistance est en fait comparée à la résistance d'une cellule mémoire référence. La MRAM de 1Mb de Motorola nécessite 1 cellule de référence pour 64 cellules mémoires. L'écriture de données dans la cellule est assurée en faisant passer un courant électrique dans 2 câbles : une ligne de bits qui passe au dessus de la jonction MTJ, et une ligne "digit line" qui passe en dessous. La somme de ces 2 courants engendre un champ magnétique suffisamment intense pour orienter les domaines de la couche libre. (Cf. figure 13)

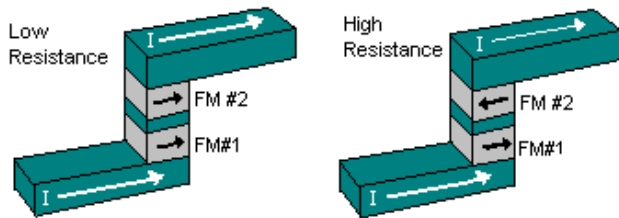
Figure 13-1 : Cellule mémoire élémentaire d'une MRAM.



Source : IEEE spectrum Mars 2003

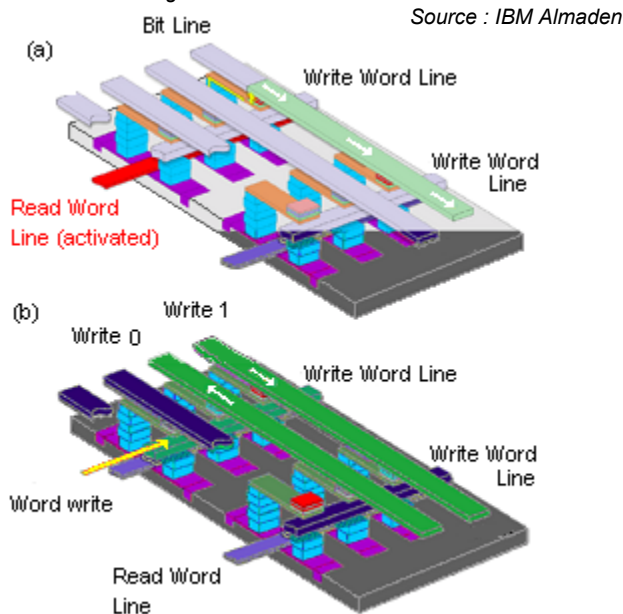
Il existe différents problèmes à résoudre pour le développement des MRAM. Le premier concerne la difficulté d'intégrer la fabrication de la jonction tunnel MTJ dans les lignes de fabrication CMOS, les matériaux magnétiques pouvant "tuer" les circuits intégrés s'ils contaminent le procédé de fabrication. D'après Saied Tehrani¹⁰ de Motorola, la solution consiste à contrôler très strictement les tranches de silicium après y avoir inclus les jonctions tunnel, et les nettoyer avant de les réintégrer dans la ligne de production CMOS. Un autre facteur déterminant est l'épaisseur de la couche d'oxyde isolant pour la jonction MTJ. Celle ci doit être uniforme sur toute la tranche, car la résistance de la jonction tunnel varie exponentiellement avec l'épaisseur de la couche. Motorola a obtenu une couche de 1,5nm d'épaisseur avec une variation de seulement 1% sur une

Figure 13-2 : Principe de fonctionnement d'une MRAM.



La résistance de la cellule dépend de l'orientation des champs magnétiques. Source UCSD physics department

Figure 13-3 : Lecture et écriture sur une mémoire magnétique à MTJ. (a) Lecture : Une tension est appliquée sur la ligne de lecture (read word line). On mesure le voltage sur la ligne de bit (bit line). Le transistor est activé uniquement si la jonction MTJ présente une résistance faible. (b) Ecriture : Le courant est injecté à travers les lignes de mots et les lignes de bits désirés. La superposition des champs générés par les deux courants oriente le moment magnétique de la MTJ dans la direction voulue. Cette orientation dépend du sens du courant dans la ligne de bit.



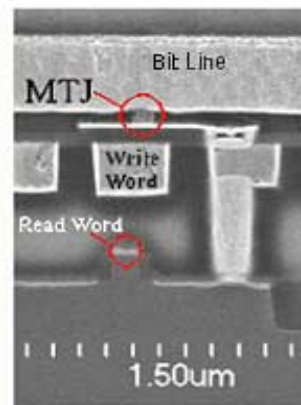
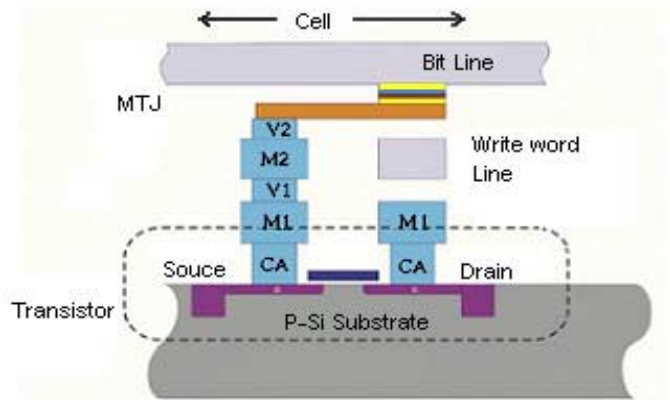
Source : IBM Almaden

tranche de 200 mm. Le troisième enjeu fondamental est d'obtenir une variation de résistance conséquente entre les 2 configurations parallèles ou antiparallèles, afin de pouvoir différencier les 0 des 1. Aujourd'hui, Motorola atteint une variation de résistance de l'ordre de 40 à 50 %.

IBM a fait partie des pionniers sur les mémoires magnétiques à l'instigation de la DARPA. IBM est toujours très actif dans le développement des MRAM.

En 1999, IBM a proposé un prototype de MRAM avec une grande rapidité d'écriture et de lecture : 2,5 et 2,3 ns, réalisé avec une technologie CMOS à 0,25 µm. Aujourd'hui, ils sont

Figure 14 : Vue en coupe d'une cellule mémoire MTJ.



Source : IBM Almaden

associés à Infineon et consacrent en tout environ 50 personnes pour mettre au point un prototype sur une technologie CMOS 0,18 µm, probablement d'ici un an. Un produit fini remplaçant les barrettes de mémoire dans les PC n'est pas à attendre avant 3 à 5 ans. Ceci se justifie notamment par l'approche d'IBM et d'Infineon qui veulent développer un produit à haute intégration (en intégrant une MRAM avec de la logique). Cypress opte pour une approche différente et devrait proposer d'ici la fin du trimestre des MRAM "bas niveau" pouvant remplacer le packaging "RAM+batterie" présent dans les bios. Cette solution serait beaucoup moins onéreuse, permettant de s'affranchir de l'intégration d'une pile sur la puce.

Les MRAM sont potentiellement plus rapides que les DRAM et les FRAM, tout en étant non volatiles et plus denses. La lecture d'une cellule dans une MRAM ne détruit pas la donnée, contrairement aux DRAM et FRAM, ce qui permet de raccourcir le temps entre 2 opérations successives de mémoire. Cependant, les mémoires Flash ne vont pas disparaître rapidement, car elles restent beaucoup moins chères. Elles vont continuer à être utilisées pour des applications plus lentes ne nécessitant pas de mémoire capable d'encaisser de très nombreux cycles d'écriture/lecture sans se détériorer. Typiquement, les mémoires flash continueront à dominer le secteur des appareils photos numériques, PDA etc...

Derrière le fonctionnement des mémoires magnétiques : Magnétorésistances.

Les mémoires magnétiques MRAM utilisent une propriété physique de certains matériaux qui, lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique extérieur, présente un accroissement de leur résistivité (ΔR). On parle alors de magnétorésistance. Il en existe de plusieurs types. Les recherches visent à accroître le rapport $\Delta R/R$ pour augmenter la capacité de stockage par unité de surface.

AMR (Anisotropic MagnetoResistance) : Elle résulte de la répartition dans un métal ferromagnétique des domaines avec des spins polarisés dans différentes directions. La résistance dépend de l'angle entre le champ magnétique extérieur et la direction du courant électrique.

CMP (Colossal MagnetoResistance) : Elle résulte des interactions entre atomes adjacents dans certain cristaux de perovskites.

GMR (Giant MagnetoResistance) : Dans les matériaux multicouches ou des alliages granuleux, elle résulte de l'interaction des spins polarisés dans des domaines ferromagnétiques ; ceux-ci étant séparés par une couche de matériau conducteur.

TMR (Tunelling MagnetoResistance) : Dans les MTJ (Magnetic Tunnel Junction), les électrons traversent par effet tunnel des isolants ferromagnétiques qui agissent comme des filtres à spins. La résistance du matériau varie en fonction de la polarisation du spin des électrons.

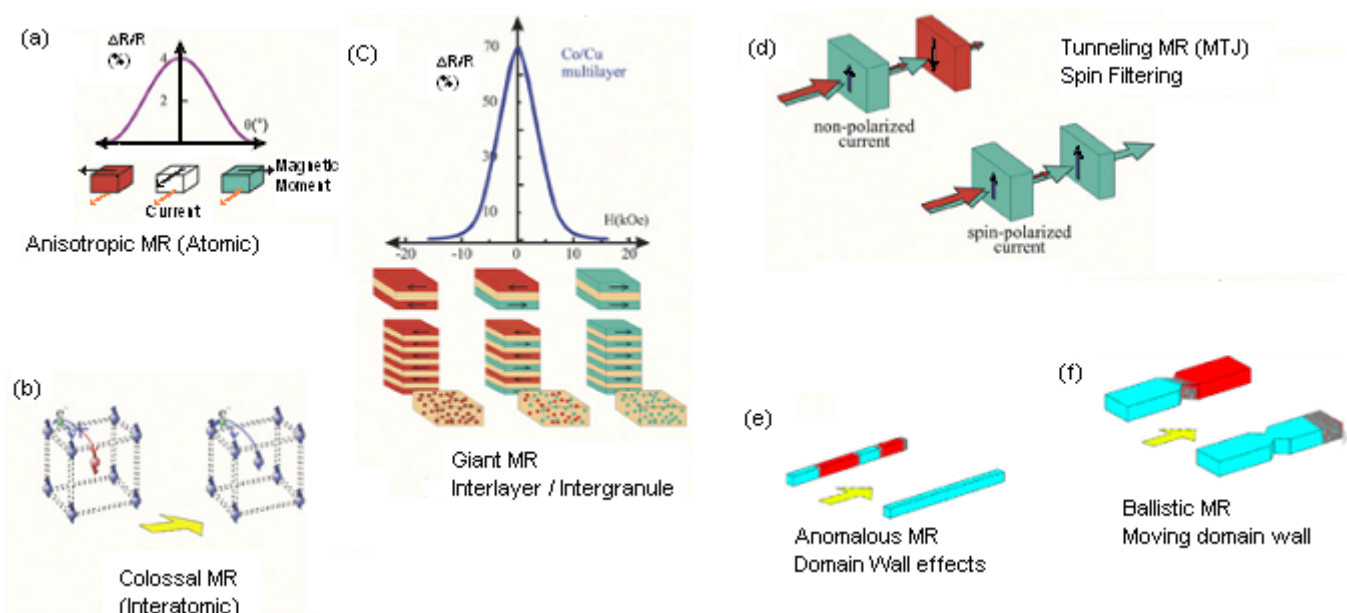
Anomalous MR : Elle a été observé dans des fils de fer ferromagnétique monocristallin ou des fils présentant des motifs magnétiques. Le comportement des électrons est similaire à celui observé dans la GMR.

BMR (Ballistic MagnetoResistance) : Dans des fils de taille réduite, les électrons sont contraints à se déplacer en ligne droite (trajectoire balistique). Si la taille du fil est suffisamment petite, la conductivité du matériau devient quantifiée et permet d'obtenir des variations de résistance très importantes.

EMR (Extraordinary MagnetoResistance) : Dans les matériaux EMR, les orbitales moléculaires des électrons sont modifiées par les variations de champ et influent sur la résistance électrique.

Figure 15 : Différents type de magnétorésistance.

Source : IBM Almaden



Les nouvelles technologies remplaceront les DRAM et SRAM actuelles dans le secteur de l'informatique.

Si les propriétés magnétiques de matériaux sont intéressantes pour réaliser des mémoires vives non volatiles, elles sont depuis toujours utilisées pour stocker des données sur les disques durs.

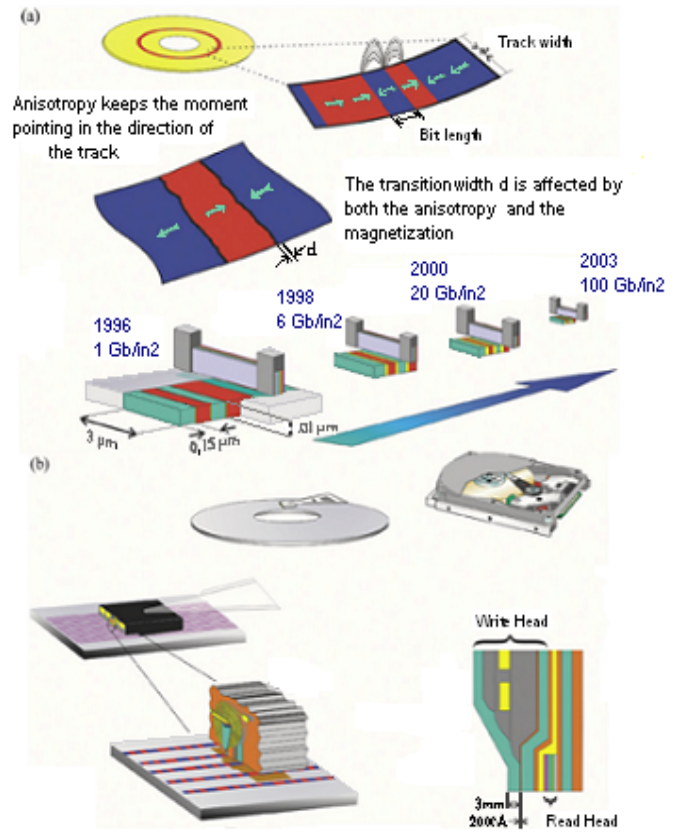
Disques Durs :

Dans les disques durs, l'information est stockée sur un film magnétique très fin déposé à la surface du disque. Les bits de données sont lus en détectant les variations de champs magnétiques quand le disque est mis en rotation sous la tête de lecture. La densité de stockage augmente régulièrement en parallèle avec la miniaturisation des têtes de lecture/écriture. Ces têtes intègrent à la fois un élément de lecture et un d'écriture montés sur un support en céramique (slider). La tête est maintenue au dessus de la surface du disque en rotation via une suspension en levier. Une unité de disque dur comprend généralement un empilement de disques - tête de lecture/écriture plus les moteurs et l'électronique de contrôle.

Depuis l'invention des disques durs au début des années 50, la densité de stockage (i.e. le nombre de bits stockés par unité de surface) n'a cessé de croître très rapidement. Ces dernières années l'utilisation de l'AMR (Anisotropic MagnetoResistance) et de la GMR (Giant MagnetoResistance) dans les têtes de lecture a encore augmenté le rythme de croissance. L'utilisation des nouveaux matériaux dans les disques eux mêmes a été de paire avec la mise au point de ces nouvelles têtes de lecture. En particulier les revêtements AFC (AntiFerromagnetically Coupled) ont permis de réduire la taille des pistes en éloignant la barrière de l'effet superparamagnétique. La figure 17 montre l'évolution dans le temps de la densité de stockage des disques durs. La densité actuelle est de l'ordre de 50Gbsi¹¹. Avec une croissance de l'ordre de 60% par an, la limite superparamagnétique sera atteinte dans 6 ans.

Pour les développements des prochaines générations de disque dur, l'objectif est de pouvoir encore accroître leur densité de stockage de données et leur rapidité. Augmenter cette densité consiste à diminuer la taille physique du bit. Cela pose de nombreux problèmes, notamment de couplage entre les bits et de modification des propriétés magnétiques des matériaux lorsque l'on atteint des dimensions nanométriques (limite superparamagnétique). D'après Stuart Parkin d'IBM Almaden, si l'on parvient à coder l'information sur les disques durs en combinant une couche AF et une couche FM en orientation antiparallèle, le moment magnétique global (par bit) résultant sera plus faible. Ceci permettrait de diminuer considérablement le couplage entre 2 bits et donc de repousser la limite à partir de laquelle il sera nécessaire de discrétiser le milieu magnétique

Figure 16 : Principes de fonctionnement d'un disque dur. Source : IBM Almaden

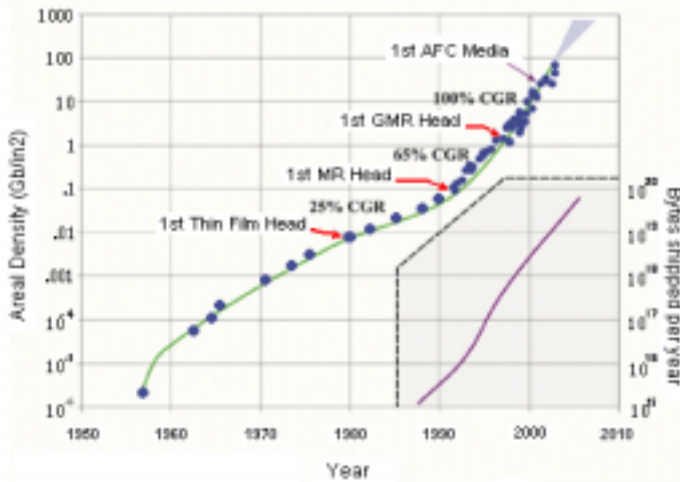


(aujourd'hui continu) sur lequel les bits sont stockés dans un disque dur.

Concernant la limite superparamagnétique (Cf. encart magnétisme), Seagate¹² estime qu'opter pour un enregistrement perpendiculaire au lieu d'un enregistrement longitudinal permettrait de repousser la limite en densité de 100 Gbsi¹³ à 1 Tbsi (cf. Figure 18). Ceci est envisagé à l'horizon 2006. Ensuite, en couplant cette technique avec un enregistrement magnétique assisté par chauffage (HAMR : Heat Assisted Magnetic Recording), Seagate pense pouvoir atteindre des densités de 5 Tbsi en 2008-2009. Finalement, le but ultime serait de combiner la technique HAMR avec l'autoarrangement de réseaux magnétiques (SOMA : Self-Ordered Magnetic Arrays) ce qui permettrait d'obtenir des densités de 50 Tbsi, mais pas avant 2015. Fujitsu travaille également sur cette nouvelle méthode d'enregistrement.

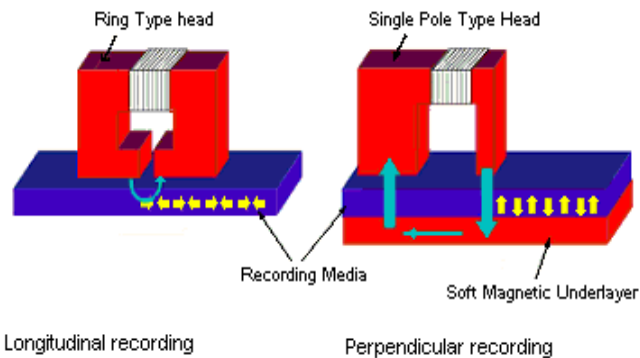
Les têtes de lecture actuelles utilisent la GMR (Giant MagnetoResistance). Cette technologie a remplacé les têtes de lecture film mince qui fournissaient des signaux de qualité moindre. Le niveau des signaux, issus des têtes GMR, est indépendant de la vitesse de rotation du disque. Grâce à cette technologie, la vitesse de rotation des disques a pu augmenter

Figure 17 : Tableau de l'évolution des densités des disques durs depuis 1950.



Source : Stuart Parkin, IBM

Figure 18 : Principe de l'écriture longitudinale et perpendiculaire.



L'écriture perpendiculaire permettrait de réduire les effets de bord des champs stockés, de potentiellement accroître leur amplitude, et d'accroître l'épaisseur du milieu d'écriture. Le tout permettrait d'obtenir une densité surfacique supérieure avec une meilleure stabilité thermique.

considérablement, et ainsi accroître leurs performances générales. L'utilisation de jonctions tunnel MTJ permettrait d'augmenter encore considérablement la densité. En effet augmenter le rapport $\Delta R/R$ permet d'affiner le pouvoir de résolution et autorise ainsi une densité de stockage plus importante. Il existe donc beaucoup d'études conjointes pour le développement des MRAMs ou des prochaines générations de disque dur. Toujours d'après Parkin, les jonctions MTJ sont très prometteuses et devraient s'imposer dans toutes les mémoires " Solid State ", car il existe un très grand nombre de matériaux aux propriétés intéressantes pour les MTJ. Les études actuelles se concentrent donc principalement sur la compréhension des propriétés de ces matériaux et sur l'opportunité de les utiliser pour les mémoires magnétiques.

La conférence du MRS¹⁴ (Material Research Society) qui s'est tenue à San Francisco fin avril 2003 a présenté de nombreux travaux sur la compréhension des propriétés magnétiques des matériaux, notamment à travers le symposium qui traitait du **nanomagnétisme** : Etude des propriétés magnétiques à l'échelle nanoscopique, caractérisation, contrôle. Plusieurs phénomènes physiques sont essentiels à comprendre et à maîtriser pour exploiter les propriétés magnétiques des nanomatériaux et les rendre fonctionnels (par exemple pour fabriquer des mémoires):

- Inversion du magnétisme (magnetization reversal). Par exemple pour passer d'une configuration FM à AF afin d'être capable de coder deux états distincts pour représenter deux bits distincts (0 ou 1)¹⁵.

- Commutation. La vitesse de commutation d'un matériau magnétique de l'état 1 vers l'état 0 déterminera la vitesse de fonctionnement de la mémoire magnétique bâtie dessus. Il est donc fondamental de maîtriser cette commutation afin de la rendre la plus efficace et rapide possible.

- Fonctionnement stable et fiable des jonctions par effet tunnel. La magnétisation par effet tunnel assure le caractère non volatile de ces mémoires. Les jonctions MTJ (Magnetic Tunnel Junction) doivent donc être rapides en lecture et en écriture, et surtout être fiables.

La vitesse d'écriture et de lecture de données sur un disque dur est aussi déterminée par la rapidité d'accès de la tête de lecture à la donnée sur le disque, ce qui dépend considérablement de sa précision. Ceci ne fera que s'aggraver avec l'augmentation de la densité de stockages des disques qui nécessitera un positionnement encore plus précis de la tête pour la lecture/écriture au-dessus du disque en rotation.

Pour remédier à ce problème, une équipe de Seagate¹⁶ envisage d'intégrer des **microactuateurs MEMS** (MicroElectroMechanical Systems) dans les disques durs afin d'accroître le contrôle et le positionnement de la tête. Une tête de lecture/écriture classique d'un disque dur (utilisée depuis des décennies) est composée d'un activateur rotor à un seul étage. Un système à deux étages, composé du rotor actuel pour l'ajustement de base, et d'un microactuateur disposé au bout de la partie en suspension de la tête pour un ajustement plus fin, permet d'améliorer le positionnement. Un tel système à 2 étages peut être implanté à trois différents niveaux : sur la partie en suspension, sur le slider, ou comme partie intégrée du capteur de lecture/écriture. Cette dernière méthode offre des avantages conséquents en matière de poids et de consommation énergétique, mais la fabrication et l'intégration posent de grosses difficultés. Les microactuateurs en suspension sont des structures plus grosses, typiquement des éléments piézo-électriques, qui peuvent déplacer toute la partie en suspension afin d'obtenir un positionnement plus fin du capteur de lecture/écriture. Les microactuateurs disposés sur le " slider " sont considérés comme des solutions intermédiaires sur la roadmap des disques durs. Ils sont attachés à l'extrémité de la partie en suspension et déplacent entièrement le corps de ce dernier (qui contient le capteur de lecture/écriture). Seagate se concentre

sur le développement d'un tel système, appelé MAGMA : Magnetic Microactuator. La solution magnétique est en effet une nouvelle fois préférée à la solution électrostatique car elle permet d'obtenir une force de déplacement équivalente pour une consommation énergétique bien inférieure. La fabrication est assurée en utilisant des méthodes conventionnelles de fabrication de MEMS. Ils ont été intégrés et testés avec succès dans les disques durs de Seagate, mais la décision de rendre cette technologie commercialement accessible dépend aussi des risques et des coûts encourus à l'introduction d'une nouvelle technologie. Une conjoncture économique plus porteuse serait sans doute bienvenue pour une telle introduction.

Stockage Optique de Données :

Après de nombreuses années de développement et d'évolution, et aussi de nombreux échecs commerciaux, le stockage optique de données s'est finalement imposé. Dans certains secteurs, il a supplanté l'enregistrement magnétique sur disque dur, souple ou sur bande. Le stockage optique offre des avantages en matière de reproduction et de distribution massive des contenus, et d'archivage. Les disques durs continuent cependant à offrir des capacités de stockage beaucoup plus importantes, des meilleures performances et un prix moindre (Cf. tableau suivant).

Déjà sur le marché	Disque dur (desktop 80 GO)	Disque optique (9,4 GO DVD-RAM)
Densité	32,6 Gbit/in ²	3,3 Gbit/in ²
Capacité par élément	40 Go (2 faces de 95 mm)	4,7 Go (2 faces 120mm)
Prix de l'unité (lecteur)	\$80-\$120	\$365
Prix / GO (lecteur)	\$1- \$1,5	\$39
Prix / GO (média)	---	\$1.5 - \$2
Temps de lecture	10 msec	75 msec
Taux de transfert (écriture)	436 Mbit/sec	22 Mbits/sec
En laboratoire	Disque dur (enr. longitudinal)	Disque optique (blue ray)
Densité	130 Gbit/in ²	16,8 - 19,5 Gb/in ²
Capacité par élément		27 Go
Taux de transfert (écriture)		36 Mbits/sec

Source : INSIC (Information Storage Industry Consortium) 2002

La technologie utilisée pour les disques optiques est désormais en route vers sa " troisième génération ", appelée " Blue Ray Disc " ou DVR. Annoncée en février 2002 par 9 entreprises¹⁷, elle doit permettre d'atteindre des capacités de 23 à 27 Go¹⁸ sur une technologie d'enregistrement par changement de phase, à une longueur d'onde de 405nm¹⁹. Les technologies basées sur les disques magnéto-optiques atteignent quant à elles leurs limites et perdent de leur intérêt. (D'après la roadmap de l'INSIC : Information Storage Industry Consortium)

Afin d'augmenter la densité de stockage des solutions optiques, il faut diminuer la taille physique sur laquelle est codé un bit et donc utiliser **des lasers à longueur d'onde de plus en**

plus courte. (CD $\lambda = 780\text{nm}$, DVD $\lambda = 650\text{nm}$, DVR $\lambda = 405\text{nm}$). De nombreux laboratoires travaillent sur ce thème. Ainsi, l'équipe de Peydong Yang de l'Université de Californie à Berkeley (UCB) étudie le développement de micro et nano lasers à faibles longueurs d'onde, typiquement bleues ou UV. Ils ont mis au point un nanolaser UV qui, intégré dans un système de stockage optique de données, devrait permettre d'obtenir une grande densité pour un encombrement et une consommation énergétique réduits. La course reste engagée entre laboratoires pour la mise au point d'un laser avec la longueur d'onde la plus petite.

L'absence de **matériaux adéquats** bride malheureusement le développement de mémoires tout optique, ce qui serait pourtant vital pour de nombreuses applications, comme la mise au point des réseaux tout optiques²⁰. De nombreuses pistes sont actuellement explorées par les chercheurs pour trouver ces nouveaux matériaux :

- Certains travaux portent sur le **ralentissement de la lumière** qui pourrait permettre de stocker l'information contenue (états quantiques) dans les pulses de lumière et de la lire plus tard. Les chercheurs utilisent pour cela l'effet Raman dans des cristaux de sodium ou de rubidium. Des équipes de Harvard, du MIT, du Air Force Research Laboratory, de Texas A&M et de l'institut d'optique de l'Université de Rochester travaillent notamment sur ce sujet²¹. Une application pourrait être dans les mémoires tampons des systèmes de télécommunications.

- Une équipe de UCSB (UC Santa Barbara) utilise un mélange de **couches minces et de " Quantum Dots "** (Nanostructure organique-inorganique de semiconducteurs à puits quantiques) qui présente des propriétés de photoluminescence dans le spectre visible (entre 400 et 700 nm). En excitant sélectivement des zones du matériau et en détectant la luminescence, ce procédé pourrait être utilisé pour réaliser des mémoires optiques. Pour un matériau semiconducteur à 0,1 % de CdSe (puits de 4,9 nm), l'intensité maximale émise se situe à une longueur d'onde de ~300 nm pour une géométrie «spun cast» et ~600 nm pour une géométrie «drop cast». Un problème à résoudre est la décroissance de l'intensité lumineuse émise avec le temps, en raison d'une fusion photo-thermique du matériau.

- Dans un autre domaine, des travaux de chercheurs de UC Irvine à Los Angeles²², ont synthétisé une nouvelle molécule comprenant une partie fluorescente (oxazine) et une partie mobile (fulgimide) qui prend une forme particulière ouverte/fermée en fonction de la lumière à laquelle elle est exposée. En illuminant la molécule par un faisceau laser de 530nm ou de 400nm, la molécule s'ouvre ou se ferme. La partie fluorescente n'est active que si la molécule est ouverte. Dans ce cas, en éclairant la molécule à une longueur d'onde de 650nm, la molécule se met à fluorescer à 700nm. On peut donc écrire, lire et effacer l'information²³.

De façon **encore plus prospective**, la " roadmap " de l'Optical Society of America prévoit déjà une quatrième génération de disques optiques utilisant des lasers UV ($\lambda < 405\text{nm}$)

pour une capacité de 100Go et un taux de transfert de 100Mbit/s. Les recherches portent sur les enregistrements holographiques, sur les disques en polymère, sur les enregistrements en multicouche dans le volume des disques²⁴, et sur l'utilisation de faisceaux multiples pour l'enregistrement sur des canaux en parallèle (afin d'améliorer le taux de transfert).

Bandes Magnétiques :

L'utilisation de ce type de support connaît une lente érosion. Pour les sauvegardes locales, les utilisateurs préfèrent en effet utiliser les disques optiques ou les disques durs, apparemment plus pratiques à manipuler. En outre, dans les grandes entreprises, les sauvegardes sont de moins en moins effectuées localement. Les données sont envoyées par le réseau pour être sécurisées par un service spécialisé, le "data center". Cette évolution entraîne naturellement une diminution forte de l'utilisation des bandes magnétiques dans les formats d'entrée de gamme. En revanche, le support reste utilisé dans le haut de gamme pour le stockage et l'archivage automatique des très grandes quantités d'information.

Les bandes magnétiques restent compétitives en raison d'un coût moindre d'utilisation (par unité de donnée sauvegardée), et aussi parce qu'il n'y a pas de limite fondamentale à la quantité de données qu'il est possible de stocker. Cette taille dépend de la densité de stockage (Cf. disque dur) mais aussi, et c'est ce qui compte dans ce cas, de la longueur de la bande. La densité de stockage actuelle des bandes magnétiques est de 0,1Gbsi²⁵, contre 50Gbsi pour les disques durs. Mais la surface totale d'enregistrement est de 14.000 inch² pour les bandes contre seulement 14 inch² par plateau de disque dur.

Les recherches actuelles portent sur l'utilisation de nouveaux matériaux magnétiques pour les bandes : réduction de la taille des particules, réduction de l'épaisseur des couches minces (films minces déposés par évaporation). Mais également sur les techniques d'enregistrement et de lecture : mise au point de nouvelles têtes (avec des technologies similaires à celle utilisées pour les disques durs : têtes GMR), l'augmentation de la vitesse de défilement sur des bandes de plus en plus minces, ou bien sur la mise au point de nouveaux codes correcteurs d'erreurs (turbo code).

Technologies du Futur :

Spintronique :

Un des enjeux majeurs du futur de l'électronique concerne l'utilisation du spin de l'électron. Jusqu'à récemment²⁶, l'électronique utilisait uniquement la charge de l'électron pour porter l'information. L'utilisation de leur spin comme degré de liberté supplémentaire ouvre désormais la voie à une nouvelle discipline : la spintronique. A terme, elle devrait permettre de

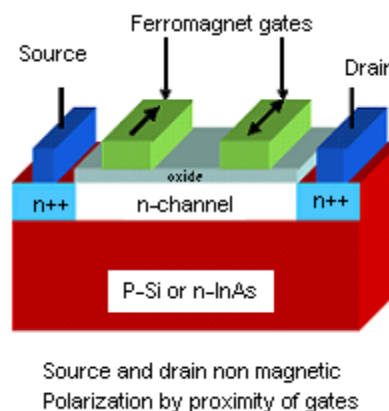
concevoir de nouveaux circuits logiques, d'améliorer les performances des composants (vitesse des processeurs et consommation), et d'accroître la capacité des mémoires. Ainsi, la magnétorésistance que présente certains matériaux (Cf. encart) résulte en fait des interactions du spin électronique avec les propriétés magnétiques des matériaux multicouches. C'est bien le cas dans les MRAM dont le fonctionnement repose sur des propriétés des spins électroniques.

Pour utiliser le spin des électrons dans les technologies des semiconducteurs, un certain nombre de problèmes techniques doivent encore être résolus : générer, injecter et transporter un courant polarisé en spin dans un semiconducteur ; mesurer et contrôler sa polarisation.

Une des difficultés majeure est d'injecter un courant polarisé en spins dans un matériau semiconducteur adapté, ce qui se fait souvent par l'intermédiaire d'un matériau ferromagnétique. Une équipe de UCSD²⁷ utilise un milieu ferromagnétique (polysilicium contenant des particules de cobalt) pour former deux grilles dans un même transistor (Cf. figure 19). Le matériau ferromagnétique polarise en spin le courant dans le semiconducteur : La densité de spin up ou down diffère selon l'orientation parallèle ou antiparallèle des deux grilles. Les applications visées sont principalement la réalisation de fonctions logiques et de mémoires spintroniques. Ces recherches sont financées par la DARPA/ONR et la NSF.

Mark Friesen de l'Université du Wisconsin à Madison²⁸ propose une architecture d'appareil à puits quantiques semiconducteurs SiGe qui devrait permettre de lire et d'initialiser des états de spin, ouvrant la voie à l'informatique quantique et aux mémoires spintroniques. Un SET (Single Electron Transistor) intégré sert de lecteur/initialiseur (Cf. figure 20). La vitesse de fonctionnement est bornée supérieurement par la vitesse de

Figure 19 : Transistor MOSFET à deux grilles ferromagnétiques.

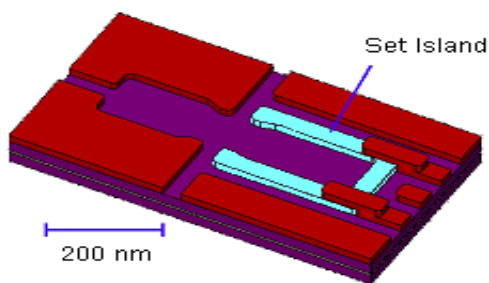


Source UCSD

fonctionnement du SET et la vitesse de lecture doit être supérieure à la vitesse d'initialisation (17 Mhz d'après les simulations) ou de perte de cohérence des états de spins. Le «temps de cohérence» correspond à la durée pendant laquelle il est possible de conserver les informations quantiques. L'utilisation de SiGe permet d'augmenter ce temps. En revanche, pour des applications de puits quantiques, le SiGe est peu développé par rapport aux autres technologies, comme par exemple le GaAs.

D'après Friesen, l'architecture proposée est un candidat viable à l'initialisation, le stockage et la lecture de spins électroniques isolés. Ce n'est pas le premier à proposer un tel appareil, mais celui-ci comporterait plusieurs avantages sur les designs précédents. Ainsi, un seul puits quantique serait nécessaire à l'écriture et à la lecture, qui pourraient de surcroît être contrôlées électriquement. Ceci est fondamental pour assurer la possibilité de réduire la taille de l'appareil facilement. Un des inconvénients de ce design serait l'introduction de micro-ondes qui pourrait engendrer une surchauffe ainsi que des perturbations extérieures pour les spins.

Figure 20 : SET développé par Marc Friesen de l'Université du Wisconsin



La spintronique d'un seul électron représente un enjeu considérable car il s'agirait de manipuler les bits d'information sur un espace réduit : l'électron. D'autres vont même encore plus loin : David Awschalom, directeur du Center for spintronics and quantum computation à l'Université de Californie à Santa Barbara s'intéresse au spin du noyau. Selon lui, la partie subatomique pourrait contenir des données et l'électron agirait comme un bus pour transporter l'information de, et vers le noyau par des rayons de lumière.

Les applications à large échelle ne sont cependant pas envisageables avant de nombreuses années. En effet, les propriétés recherchées n'apparaissent que pour des appareils de dimensions nanoscopiques. La spintronique résultera donc en partie des progrès réalisés dans les nanotechnologies et la mise au point de nouveaux matériaux.

Polymères :

Les polymères permettent de contrôler les propriétés optiques et magnétiques des semiconducteurs, ce qui est

opportun pour des applications de mémoire. C'est ce qui ressort de travaux effectués à UCLA²⁹ où des chaînes de polymères sont intégrées à un réseau de pores dans un matériau semiconducteur.

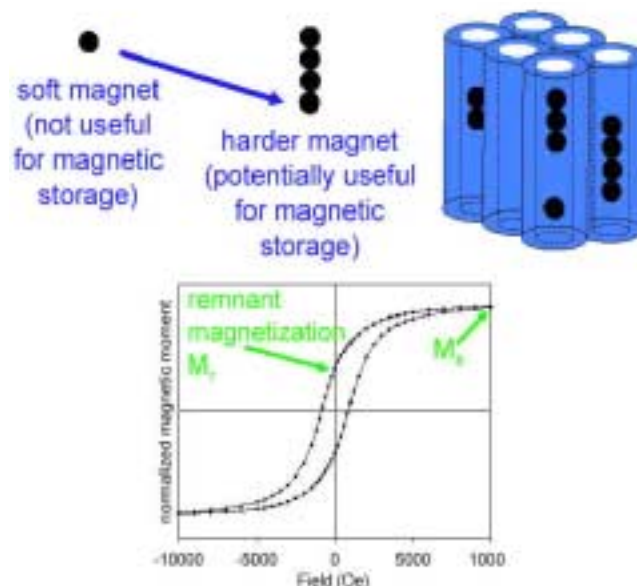
Optique : L'orientation de la chaîne, dépendant de la taille des pores, modifie la polarisation du rayonnement. De plus, le film de polymère augmente l'indice diélectrique du milieu, ce qui provoque un décalage vers le rouge du spectre lumineux. Finalement, la chaîne de polymère influence la création de paires électrons/trous comme porteurs : avec une seule chaîne, une telle création n'est pas possible (les paires s'annihilent après création), alors que c'est réalisable avec plusieurs chaînes.

Magnétique : la méthode de fabrication est la même, mais cette fois des nanoparticules de Cobalt sont incorporées aux pores. Des dipôles magnétiques se forment. Ce couplage magnétique résulte des interactions particule-particule, qui sont très fortes lorsque les particules de Cobalt sont confinées dans un pore. Une magnétisation rémanente apparaît et peut être exploitée dans des mémoires. Ces travaux sont financés par la NSF, l'ONR, et le Beckman Institute.

Les nanotechnologies pour le stockage de données :

Les nanotechnologies constituent un sujet qui agite grandement toute la communauté scientifique. Des investissements très importants sont consacrés à leur développement par les autorités américaines. Un des domaines d'application concerne l'utilisation des nanomatériaux dans les composants électroniques. C'est certainement dans cette industrie que les applications des nanotechnologies apparaîtront à relativement court terme.

Figure 21 : Nanoparticules de cobalt incorporées dans des pores de semiconducteur.



Source : UCLA Dept of Chemistry and Biochemistry Sarah H. Tolbert.

Nantero³⁰, une startup fondée par des anciens étudiants de Harvard et basée à Woburn, Massachusetts, a récemment annoncé³¹ avoir développé des mémoires à base de nanotubes de carbones : NRAM (Nonvolatile Random Access Memory). Ces nanotubes ont été découverts en 1991 par Sumio Ijima de l'université Meijo au Japon. En électronique, ils ont jusqu'à présent été testés pour en faire des transistors ou des connexions électriques. Nantero les utilise comme unités de mémoires. Une fine couche de nanotubes conducteurs et alignés est en suspension au-dessus d'un substrat en silicium. Les tubes se rapprochent ou s'éloignent du wafer en fonction des impulsions électriques auxquelles ils sont soumis. Les positions hautes ou basses correspondent alors aux bits d'information stockés. Les mémoires prototypes réalisées ont une capacité de 10Gb, gravées sur des wafers de 4 inch. Des capacités plus importantes seront permises en affinant la finesse de lithographie. En théorie, une densité de 1Terabit par centimètre carré est possible. La vitesse d'écriture/lecture est estimée à 2GHz et pourrait atteindre 200GHz. La consommation électrique par bit est plus faible que dans toutes les autres mémoires disponibles actuellement. La NRAM pourrait être fabriquée dans toutes les usines de composant CMOS sans modification de la chaîne de production.

Motorola³² a de son côté développé une mémoire utilisant des nanocristaux de silicium. La technologie est celle des couches minces. Motorola dépose une couche de nanocristaux de silicium d'un diamètre de 50 Angstroms entre deux couches d'oxyde de silicium. La taille de ces sphères et leur agencement empêchent les échanges de charges électriques entre elles. La difficulté pour Motorola a été de maîtriser la taille et la disposition des nanocristaux pour que la couche mince ait une épaisseur uniforme. Cette technologie permettrait de développer des mémoires plus petites, plus fiables, et moins gourmandes en énergie que les mémoires flash actuelles. En effet, avec le développement de la technologie à 90nm (lithographie), le voltage nécessaire pour lire et enregistrer les données sur les mémoires flash classiques devient trop élevé. Les prototypes présentés ont une capacité de 4Mb. La mise en production est envisagée pour 2005.

On peut citer également la **technologie "nanomécanique"** du Millipède développée en juin 2002 par IBM Zurich³³ similaire à la technique ancienne des cartes perforées. Cette technologie consiste à percer des trous dans un polymère. Elle permettrait de stocker 80Gbit par centimètre carré (15 fois plus que les disques durs actuels). Le Millipède est composé de pointes (32x32) unités dont l'extrémité, d'un diamètre de 40nm, se déplace sur la surface plastique. Ces pointes sont chauffées par un courant électrique et font fondre le polymère créant des trous codant les informations. Pour lire les informations, on chauffe les pointes à une température inférieure à celle de fusion du polymère en les déplaçant sur la surface. Lorsqu'une pointe tombe dans un trou, sa chaleur se dissipe et une baisse de température est détectée.

Financement, Transfert de Technologies :

Les acteurs industriels américains sont bien connus. Pour les mémoires, il s'agit des très grandes entreprises présentes sur le secteur des semi-conducteurs : Intel, Motorola, IBM, TI... Elles sont en concurrence directe avec les entreprises asiatiques : japonaises, coréennes et taïwanaises. Pour les disques durs, on trouve essentiellement HP, IBM et Seagate.

Les entreprises américaines investissent dans le design et font fabriquer leurs nouveaux composants par des fondeurs installés à l'étranger. C'est le concept des entreprises "fabless", sans usine. Le coût gigantesque (qui croît suivant la fameuse loi de Moore) d'investissement dans les unités de production rend peu probable toute entrée d'un nouvel acteur pour la production de masse. Toute technologie introduite sur le marché nécessitera des investissements considérables. En particulier, il y aura nécessairement des difficultés techniques inhérentes au passage du stade de développement à celui de la production de masse en série.

La recherche très appliquée a lieu dans les grandes entreprises. Le monde académique se consacrant essentiellement aux avancées fondamentales en particulier en spintronique et en nanotechnologie. C'est certainement dans ces deux secteurs qu'apparaîtront de nouveaux acteurs : startups directement issues des laboratoires de recherche universitaires.

L'INSIC³⁴ (Information Storage Industry Consortium) recense les principaux programmes de recherche industrielle. Les entreprises sont organisées en consortium et financent elles-mêmes leurs développements. Ces programmes bénéficient également des aides fédérales : NIST/ATP et DARPA.

L'Advanced Technology Program (ATP) du National Institute for Standard and Technology (NIST) dépend du département américain du Commerce. Il favorise le développement du secteur industriel en finançant des projets très innovants ou à opportunité d'applications à très long terme. Ces programmes sont considérés comme risqués et n'ont pas obtenu de soutiens plus traditionnels. La DARPA, agence militaire américaine de financement de la recherche, bénéficie de budgets considérables. Elle finance largement les laboratoires et les entreprises dès lors que les technologies sont considérées comme critiques à plus ou moins long terme pour la suprématie américaine.

*Jean-Philippe Schweitzer,
Christophe Lerouge,
San Francisco*

Références :

- ¹ Source Gartner Dataquest.
- ² NSIC : National Storage Industry Consortium : www.nsic.org qui devient le INSIC : Information Storage Industry Consortium : www.insic.org
- ³ Denis Buss, vice président de la R&D à TI
- ⁴ Ovonyx, Santa Clara, CA. <http://ovonyx.com>
- ⁵ Stanford Ovshinsky, cofondateur président et CEO de Energy Conversion Device Inc. (Rochester Hills, Michigan)
- ⁶ ST Microelectronics, Genève, CH. www.st.com ST souhaite remplacer les mémoires flash par les OUM
- ⁷ BAE Systems, Farnborough, UK. <http://www.baesystems.com/> BAE s'intéresse aux OUM pour les applications spatiales, car elles ne patissent pas de radiations cosmiques, contrairement aux DRAMs.
- ⁸ DARPA : Defense Advanced Research Program Agency : <http://www.darpa.mil>. Agence militaire, dépendant du DOD (Dpt of Defense) de financement de la recherche américaine.
- ⁹ <http://www.motorola.com/>
- ¹⁰ Saied Tehrani est directeur technologique de Motorola Semiconductor Products Sector (Austin, TX).
- ¹¹ Gbsi = Gb/sq inch : Gigabit par pouce carré
- ¹² www.seagate.com
- ¹³ Gbsi = Gb/sq inch : Gigabit par pouce carré. A titre d'exemple, une densité de 33 Gbsi permet d'obtenir des disques durs de 40 GB (ou 40 Go. rem : il y a 8 bits dans un Byte (octet))
- ¹⁴ www.mrs.org
- ¹⁵ Magnetization Reversal Details in Exchange Biased Fe/FeF₂ à UC Davis.
- ¹⁶ Roger Hipwell, Kyle Bartholomew, Wayne Bonin, Zindedine Boutaghou, Seagate Technology, Bloomington, Minnesota.
- ¹⁷ Hitachi, LG Electronics, Matsushita, Pioneer, Philips, Samsung, Sharp, Sony, Thomson
- ¹⁸ soit une densité de 16,8 à 19,5 Gbsi.
- ¹⁹ A titre de comparaison, les CDs fonctionnent avec un laser de longueur d'onde 780 nm (capacité: 0,7 Go) et les DVDs avec un laser de longueur d'onde 650 nm (capacité : 4,7 Go).
- ²⁰ cf Lettre Etats-Unis Sciences Physiques n1 : Photonique, liens optiques.
- ²¹ Rubys slows light : optical data storage applications, source : microelectronics 04/11/03 ; Light/Atom memory, source microelectronics alert 05/30/03
- ²² PM Rentzepis, Department of Chemistry, University of California Irvine
- ²³ Microelectronics alert 5/8/03
- ²⁴ Cf. développement récent d'une technologie de gravage double couche mise au point par Philips et Mitsubishi.
- ²⁵ Gbsi = Gb/sq inch : Gigabit par pouce carré.
- ²⁶ La découverte de la GMR par des équipes françaises et allemandes date de 1988.
- ²⁷ C. Ciuti, JP McGuire, LJ Sham, Dept of Physics, University

of California San Diego, La Jolla, CA

²⁸ Mark Friesen, University of Wisconsin, Madison, WI : Spin read-out and initialization in a silicon-germanium quantum dot QuBit

²⁹ Sarah H. Tolbert, Adam F. Gross, Ashley Cadby, Andrew PZ Clark, William Molenkamp, Department of chemistry and biochemistry, UCLA, Los Angeles, CA

³⁰ Nantero Inc, 25-D Olympia Avenue, Woburn, MA 01801, info@nantero.com

³¹ Cette information a déjà été rapportée par la lettre USA-sciences physiques n°6.

³² Motorola Inc., 3501 Ed Bluestein Blvd, Austin, TxX 78229 : Joe Mogab Advanced Product Research and Development Lab, Semiconductor Products Sector.

³³ <http://www.zurich.ibm.com/st/storage/millipede.html>

³⁴ www.insic.org/programs.html

Glossaire des Sigles Utilisés :

SDRAM : *Synchronous Dynamic Random Access Memory* : Technologie de DRAM qui utilise une horloge afin de synchroniser l'entrée et la sortie des signaux sur une mémoire.

FRAM : *Ferroelectric RAM* : Type de mémoire non volatile fonctionnant suivant la polarité des cristaux en fonction du courant appliqué.

DDR-SDRAM : *Double Data Rate - SDRAM* : Dernière génération de technologie SDRAM. La vitesse de mémoire double sans augmenter la fréquence d'horloge.

FPM : *Fast Page Mode* : Forme ancienne de DRAM.

EDO : *Extended Data-Out* : Technologie de DRAM qui raccourcit le cycle de lecture entre la CPU (Central Processing Unit - Unité centrale) et la mémoire.

EPROM : *Erasable Programmable Read Only Memory* : Mémoire programmable et réutilisable qui conserve les données jusqu'à ce qu'elles soient effacées par une lumière ultra-violette.

EEPROM : *Electrically Erasable Programmable Read Only Memory* : Forme de ROM qui peut être effacée électriquement (à la différence des EPROM, qui utilise une lumière UV) et reprogrammée par la suite.