

sus sont plus agressifs et plus menaçants, mais ils ne deviennent pas violents. Les menaces maintiennent les congénères à distance et évitent ainsi un contact indésirable. Les animaux limitent les interactions sociales actives : ils adoptent un profil bas pour fuir les ennuis.

Les chimpanzés, qui maîtrisent mieux leurs émotions, sont même moins agressifs quand ils sont entassés pendant une courte période. Cette réaction, nommée «effet ascenseur», face aux risques d'une promiscuité passagère, rappelle celle des personnes, dans un ascenseur, qui, pour réduire les frictions, restent immobiles, évitent le regard des autres et parlent à voix basse (voir la figure 4).

Nous sommes les descendants d'une longue lignée d'animaux sociaux, dotés d'importantes capacités d'adaptation à des situations aussi peu naturelles que les enclos bondés ou les rues surpeuplées des villes. Cette adaptation a un coût, mais elle est certainement préférable à l'anarchie des sociétés de rats.

Frans DE WAAL est directeur au Centre de recherches sur les primates d'Atlanta. Filippo AURELI est professeur de biologie à l'Université de Liverpool. Peter JUDGE est professeur à l'Université Bloomburg, en Pennsylvanie.

F. DE WAAL, *De la réconciliation chez les primates*, Flammarion, 1992.

F. DE WAAL, *La politique du chimpanzé*, Odile Jacob, 1995.

F. DE WAAL, *Morales de singe*, Bayard Éditions, 1997.

E.T. HALL, *The Hidden Dimension*, Doubleday, 1966.

A. BAUM, *Crowding*, in *Handbook of Environmental Psychology*, vol. 1, sous la direction de D. Stokols et I. Altman, Wiley, 1987.

F.B.M. DE WAAL, *The Myth of a Simple Relation between Space and Aggression in Captive Primates*, in *Zoo Biology Supplement*, vol. 1, pp. 141-148, 1989.

F. AURELI et F.B.M. DE WAAL, *Inhibition of Social Behavior in Chimpanzees under High-Density Conditions*, in *American Journal of Primatology*, vol. 41, n° 3, pp. 213-228, mars 1997.

P.G. JUDGE et F.B.M. DE WAAL, *Rhesus Monkey Behaviour under Diverse Population Densities: Coping with Long-Term Crowding*, in *Animal Behaviour*, vol. 54, n° 3, pp. 643-662, septembre 1997.

Une nouvelle rencontre de la science et de l'art.



LES SECRETS DE LA CASSEROLE

Comment préparer plus de 20 litres de mayonnaise à partir d'un seul jaune d'œuf ? En explorant la physique des émulsions. Comment obtenir un bon rôti ? En empruntant à la chimie ses études des sucres et des acides aminés. Comment obtenir de bonnes gelées ? En reprenant les résultats récents de la physico-chimie des gels. Code 1585-130 F 224 pages



RÉVÉLATIONS GASTRONOMIQUES

Encore un livre de recettes ! Oui, mais des recettes garanties par des expérimentations rigoureuses, par des analyses physico-chimiques des aliments et des tours de main culinaires. Chaque geste culinaire est ici disséqué, commenté du triple point de vue culinaire, physico-chimique et gastronomique. Code 1756-130 F 320 pages

Ces deux ouvrages ont obtenu le Prix de l'Académie nationale de Cuisine 1997.

LA CASSEROLE DES ENFANTS

Laissés seuls pour la soirée, deux enfants doivent cuisiner leur dîner. Mais leur sens aigu de l'observation et de l'expérimentation leur fait découvrir les bases de la chimie et de la physique. Ce livre pourrait être un manuel, s'il n'évoquait les molécules et leurs transformations de façon si simple et si amusante.

Code 2309-80 F-128 pages



BELIN

Voir bon de commande page 90

La mémoire des disques durs

JON TOIGO

Les physiciens et les ingénieurs de l'industrie micro-électronique devront mettre en œuvre des principes physiques nouveaux pour augmenter la capacité des disques durs

Dans de nombreuses entreprises, le volume de données informatiques stockées double chaque année. Regroupant des informations sur plusieurs disques durs, de nombreuses organisations gèrent aujourd'hui jusqu'à des téraoctets d'information (un téraoctet correspond à environ 10 000 milliards de chiffres 0 ou 1). Grâce à des programmes qui récupèrent les données et les analysent, les sociétés analysent des tendances, améliorent les services qu'elles proposent, coordonnent leurs lignes de production, etc. Parallèlement, les utilisateurs d'ordinateurs personnels conservent sans compter d'importantes quantités d'informations : messages électroniques, photographies, logiciels de jeux...

Ces applications ne sont possibles que grâce aux disques durs magnétiques qui ont été mis au point ces dernières années. L'évolution est fulgurante : aujourd'hui, la capacité de ces disques performants et peu onéreux double tous les neuf mois, alors que les performances des puces électroniques, qui suivent la loi de Moore, ne doublent que tous les 18 mois. Le prix moyen par million d'octets (un octet est égal à huit bits, ou chiffres binaires 0 ou 1), pour les disques durs, est passé de 70 francs en 1988 à 10 centimes en 1999, et l'on prévoit qu'il sera à moins de 2 centimes en 2002. Le marché des disques durs est considérable : 145 millions de disques durs ont été vendus en 1998 et 170 millions en 1999 (voir la figure 2).

Cette croissance se poursuivra-t-elle ? Et des progrès techniques sont-ils encore possibles ? On découvre aujourd'hui que la technique atteint

une limite due à l'«effet superparamagnétique». Cet effet apparaît quand l'énergie utilisée pour le stockage magnétique d'un chiffre binaire 0 ou 1 est comparable à l'énergie d'agitation thermique : les fluctuations perturbent le stockage. Cherchant à accroître la capacité des disques durs, les ingénieurs ont rétréci les zones magnétiques et s'approchent à grands pas de la barrière fatidique. La limite due à cet effet devrait être atteinte vers 2005. Comment progresser encore ? Plusieurs solutions sont étudiées.

Des merveilles magnétiques

Les disques durs contiennent aujourd'hui des piles de plateaux, formés chacun d'un support en aluminium ou en verre, recouvert de matériau magnétique et de couches protectrices. De part et d'autre de chaque plateau, des têtes d'écriture enregistrent des informations en aimantant de petits secteurs, nommés domaines, alignés dans le sens de la longueur selon des pistes concentriques (voir l'encadré des pages 68 et 69) ; des têtes de lecture récupèrent l'information en détectant les aimantations. Des bras mécaniques pilotés par des moteurs déplacent les têtes avec précision au-dessus des pistes, tandis qu'un système hydrodynamique ajuste la hauteur des têtes à quelques fractions de micromètres au-dessus de la surface des disques. Un moteur fait tourner la pile de disques à une vitesse de 3 600 à 10 000 tours par minute.

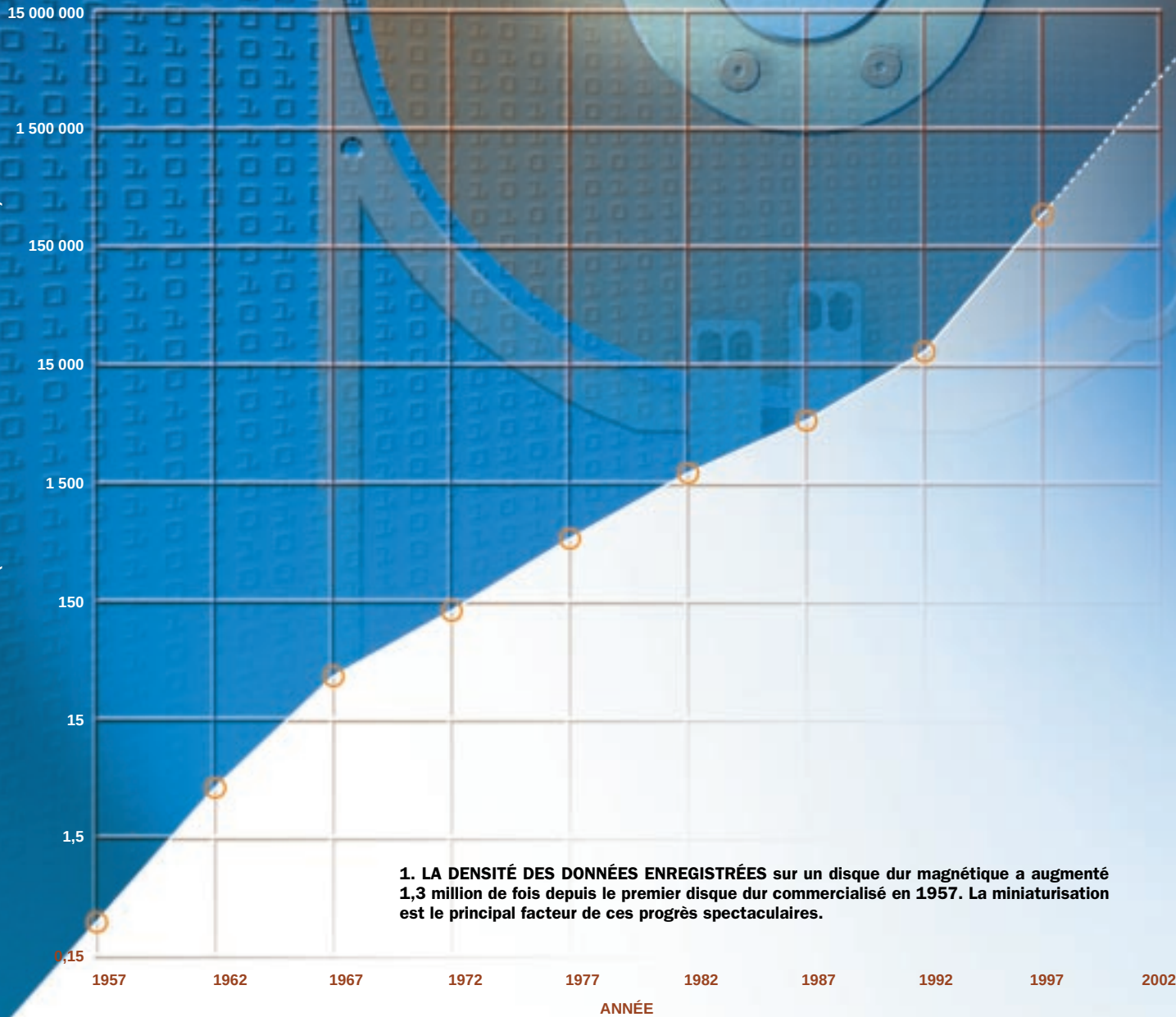
Quel progrès ! Le premier disque dur pesait une tonne : le RAMAC construit

par la Société IBM en 1956 stockait seulement cinq millions d'octets. De celui-ci jusqu'aux derniers disques durs d'ordinateurs de bureau, d'une capacité de plus de 70 milliards d'octets, les progrès ont essentiellement consisté en une miniaturisation : les têtes de lecture et d'enregistrement sont plus petites, les disques plus minces, les distances entre têtes et plateaux réduites...

Les premières têtes de lecture et d'écriture étaient en ferrite (un oxyde de fer et d'autres métaux). À partir de 1979, les ingénieurs mirent au point des procédés de fabrication des têtes à couches minces par les mêmes méthodes que celles de fabrication des puces micro-électroniques ; ces têtes lisaient et écrivaient des bits sur des domaines plus petits. Au début des années 1990, les têtes à couches minces qui lisaient directement les informations en détectant un courant électrique induit par le survol des zones aimantées ont été remplacées par des systèmes qui captent les infimes modifications de résistance électrique dues au champ magnétique. Observé pour la première fois par Lord Kelvin en 1857, cet effet de magnétorésistance conduit à des têtes plus sensibles, de sorte qu'on a rétréci les domaines de mémorisation des données.

Puis, en 1997, une équipe de la Société IBM perfectionna les têtes de lecture magnétorésistives en alternant deux couches de matériaux magnétiques avec une couche non magnétique. Ces têtes, nommées GMR (*Giant Magnetoresistive*, soit «magnétorésistance géante») sont environ quatre fois plus sensibles, car les deux couches magnétiques, à la manière

DENSITÉ D'INFORMATION (EN MILLIERS DE BITS PAR CENTIMÈTRE CARRÉ)



1. LA DENSITÉ DES DONNÉES ENREGISTRÉES sur un disque dur magnétique a augmenté 1,3 million de fois depuis le premier disque dur commercialisé en 1957. La miniaturisation est le principal facteur de ces progrès spectaculaires.

d'un polariseur et d'un analyseur de lumière, augmentent artificiellement la magnétorésistance de la tête : selon l'orientation du domaine lu, les électrons diffusent facilement ou non d'une couche magnétique de la tête à l'autre. Les disques durs stockèrent alors jusqu'à 15 milliards de bits par centimètre carré.

En 1998, certains experts avaient fixé la barrière de l'effet superparamagnétique à 4,5 milliards de bits par centimètre carré, mais les têtes GMR semblent fixer cette limite à 23 milliards de bits par centimètre carré : cette valeur est, pour les ingénieurs, l'objectif à atteindre, voire à dépasser.

Plus courts, donc plus denses

Jusqu'ici, c'est l'amélioration de la sensibilité des têtes de lecture qui a conduit à l'augmentation des capacités des disques. Cependant, des ingénieurs s'attachent à réduire la taille des éléments binaires jusqu'à la limite de l'effet superparamagnétique. La stabilité thermique du support devient alors l'élément primordial, ainsi que sa coercivité (sa résistance aux champs magnétiques ambiants). La question fondamentale est la suivante : combien de grains, c'est-à-dire de petits cristaux magnétiques, sont-ils nécessaires pour obtenir une aimantation qui résiste à l'effacement thermique ? La réponse dépend de l'organisation des grains

Jusqu'ici, 500 à 1 000 grains de matériau magnétique étaient utilisés pour l'enregistrement d'un bit. Toutefois, en mars 2000, des ingénieurs de la Société IBM ont mis au point un procédé d'auto-assemblage de cristaux magnétiques de cobalt et de platine grâce à des micelles (de microscopiques gouttes de lipides) qui sont déposées sur le disque, puis éliminées. Les grains sont alors plus réguliers, plus petits et mieux organisés : un bit requiert moins de grains, et les densités peuvent être supérieures à 20 milliards de bits par centimètre carré.

La réduction de la taille des bits de données à l'aide de grains de matériau magnétique plus petits et moins nombreux semble une façon évidente d'augmenter la capacité des disques durs. Cependant, on doit simultanément empêcher l'interférence des bits adjacents : des ingénieurs étudient ainsi certaines terres rares et des éléments de transition très stables magnétiquement, tels des alliages fer/platine ou

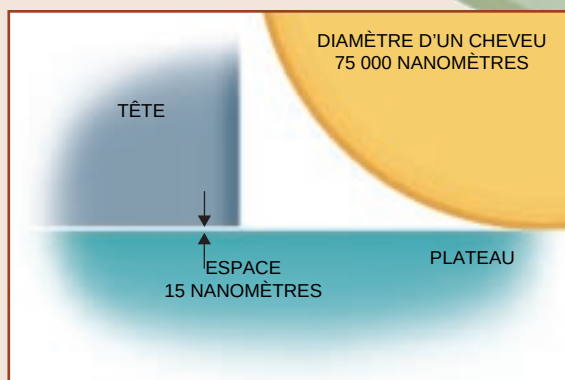
Fonctionnement d'un disque dur

Le disque dur actuel contient un empilement de plateaux en rotation sur lesquels les données sont mémorisées et lues par plusieurs têtes. Les données sont codées par l'aimantation d'une couche disposée à la surface des plateaux. Un même fichier peut être réparti sur plusieurs zones et plusieurs plateaux.

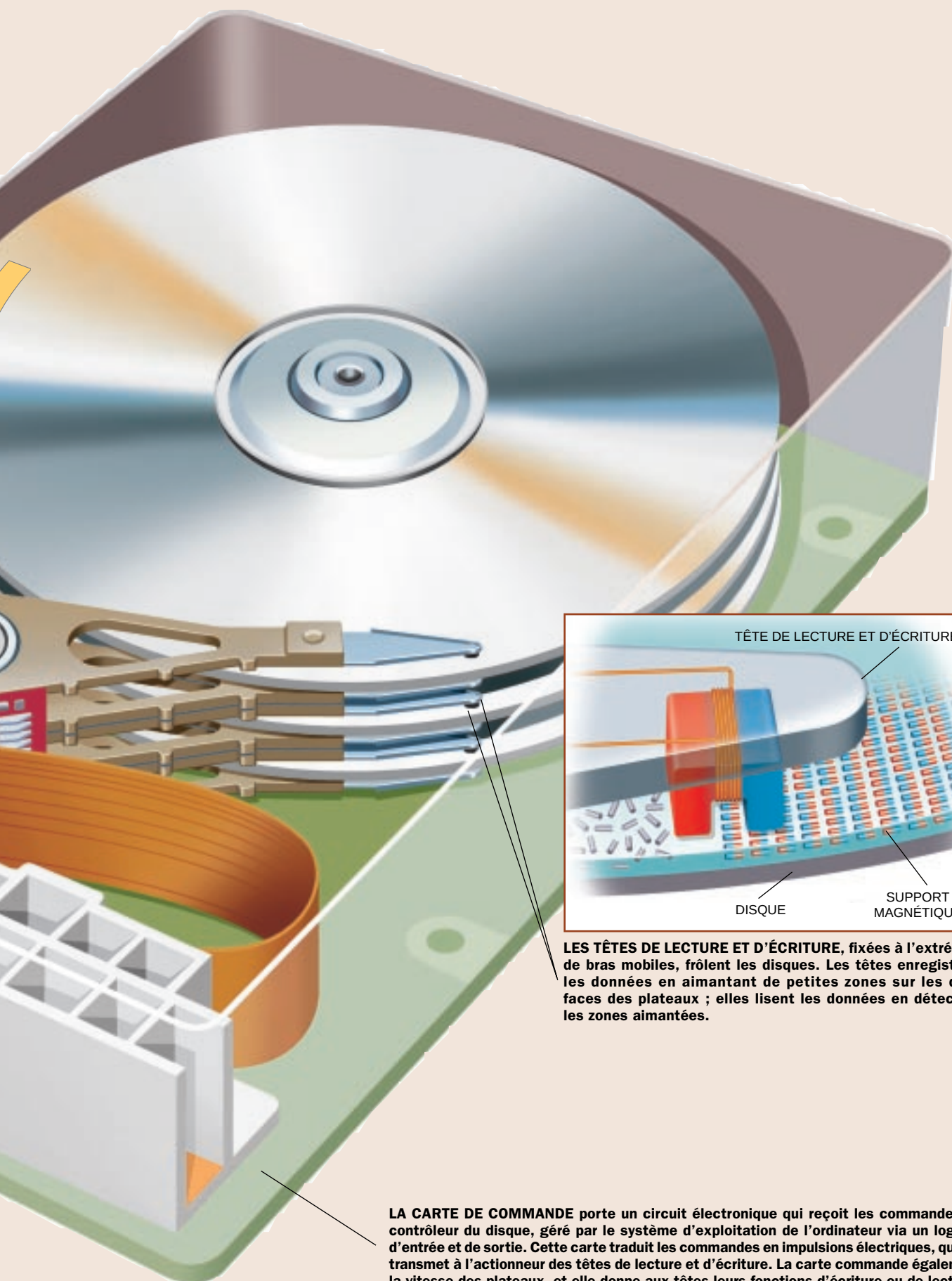
LES PLATEAUX, constitués de métal ou de verre, sont recouverts d'une couche magnétique. Ils tournent à une vitesse de plusieurs milliers de tours par minute, entraînés par un moteur électrique. La capacité du disque dépend du nombre de plateaux (jusqu'à huit) et du revêtement magnétique.

L'ACTIONNEUR DE LA TÊTE déplace et aligne avec précision les bras des têtes de lecture et d'écriture près des pistes concentriques à la surface des plateaux.

BOÎTIER DE PROTECTION



L'ESPACE entre la tête de lecture et d'écriture et la surface du plateau est 5 000 fois inférieur au diamètre d'un cheveu humain.



TÊTE DE LECTURE ET D'ÉCRITURE

DISQUE

SUPPORT
MAGNÉTIQUE

LES TÊTES DE LECTURE ET D'ÉCRITURE, fixées à l'extrémité de bras mobiles, frôlent les disques. Les têtes enregistrent les données en aimantant de petites zones sur les deux faces des plateaux ; elles lisent les données en détectant les zones aimantées.

LA CARTE DE COMMANDE porte un circuit électronique qui reçoit les commandes du contrôleur du disque, géré par le système d'exploitation de l'ordinateur via un logiciel d'entrée et de sortie. Cette carte traduit les commandes en impulsions électriques, qu'elle transmet à l'actionneur des têtes de lecture et d'écriture. La carte commande également la vitesse des plateaux, et elle donne aux têtes leurs fonctions d'écriture ou de lecture.

cobalt/samarium. En jargon industriel, ces métaux dont la coercivité est élevée sont nommés matériaux «durs».

Toutefois, l'écriture sur les matériaux durs est difficile : ceux-ci sont «ramollis» par un laser qui, en les chauffant, réduit la coercivité des grains ; les données sont alors écrites (voir la figure 4). Lorsque le matériau refroidit, son «durcissement» protège les informations contre l'effet superparamagnétique.

La largeur des pistes

Comment lire les informations stockées dans des zones réduites ? La plupart des têtes expérimentales ont une largeur de trois pistes, de sorte qu'elles captent du bruit indésirable pendant la lecture.

Néanmoins, si les têtes étaient plus étroites, leur disposition au-dessus des pistes devrait être plus précise. On pourrait utiliser un laser de guidage, mais celui-ci augmenterait la complexité et le coût de l'ensemble du disque.

Une autre solution est l'utilisation d'un support composé d'une couche de mémoire permanente, placée au-dessous d'une couche de lecture : pour lire les informations, on effacerait l'aimantation de la couche de lecture, puis un laser bien focalisé chaufferait la piste appropriée de la couche de mémoire, afin de transférer les données dans la couche de lecture par un procédé de couplage magnétique. Seules les informations transférées dans la couche de lecture seraient alors lisibles, et les informations des autres pistes ne perturberaient pas le signal enregistré. Une tête de lecture large suffirait.

Évidemment, le guidage du faisceau laser doit être très précis : on doit éviter de chauffer accidentellement des bits adjacents à ceux que l'on écrit, car on effacerait des informations mémorisées antérieurement. Afin d'éviter cet écueil, les ingénieurs de la Société *Seagate* utilisent un disque sur lequel des sillons séparent les pistes circulaires de bits. En augmentant la surface qui sépare deux pistes, ces

sillons empêchent la chaleur du laser de se propager aux pistes voisines.

Des ingénieurs d'autres sociétés explorent d'autres moyens d'augmenter la capacité des disques durs en organisant les supports de mémoire, par exemple en séparant les bits de mémoire par des barrières. On étudie ainsi des «supports structurés», où le disque porte des bosses et des creux à sa surface ; chaque relief mémorise un bit. En théorie, un bit de données (un 0 ou un 1) peut être mémorisé dans un seul grain magnétique. Ainsi, avec un diamètre de grain de sept à huit nanomètres, ce type de support contiendrait plus de 1 500 milliards de bits (ou 1,5 téraoctet) par centimètre carré (voir la figure 3).

Pour créer les reliefs et les creux, les ingénieurs s'inspirent des procédés photolithographiques utilisés par l'industrie micro-électronique : un laser ou un faisceau d'électrons impressionne une couche photosensible, puis l'attaque chimique des couches non exposées laisse des reliefs à la surface du disque. Cependant, les procédés photolithographiques actuels créent au mieux des reliefs d'environ 80 milliardièmes de mètre de diamètre, dix fois plus larges que le diamètre requis.

La capacité des disques augmentera ainsi avec le raccourcissement des zones élémentaires de stockage de l'information, mais aussi avec un rétrécissement des pistes qui portent ces zones. Aujourd'hui, les disques portent envi-

ron 8 000 pistes par centimètre ; elles sont distantes d'environ 100 nanomètres. Cette limite est imposée par la résolution des têtes d'enregistrement et par la précision du système de détection de la position sur les différentes pistes.

Des têtes bien faites

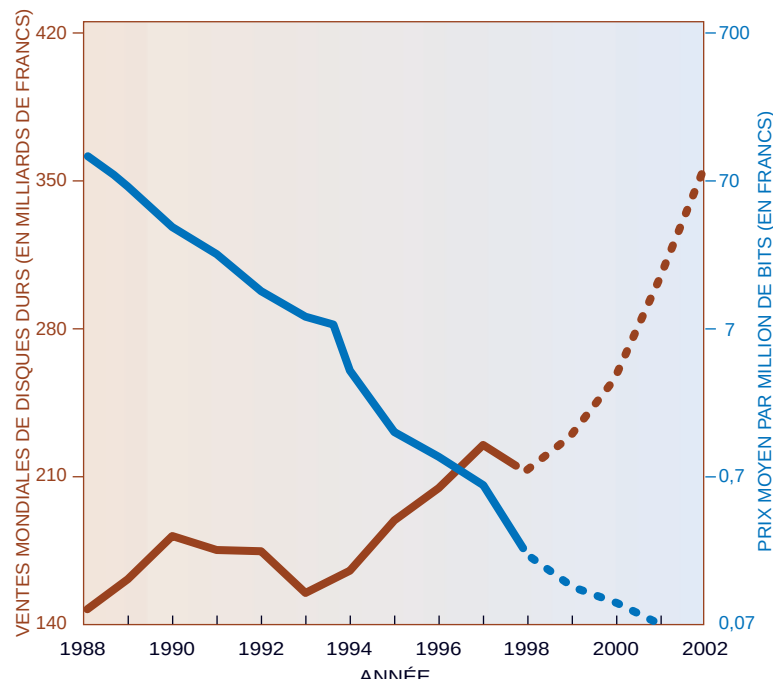
La plupart des têtes de lecture ont une forme de fer à cheval qui couvre la largeur d'une piste. Elles écrivent dans le sens longitudinal, c'est-à-dire le long de pistes circulaires, mais les champs magnétiques qu'elles créent s'étendent radialement, et des pistes insuffisamment

espacées entraînent la perte d'informations sur des pistes adjacentes.

Peut-on fabriquer des têtes d'enregistrement plus petites ? Si un faisceau abrasif d'ions peut affiner et équilibrer la tête d'écriture, ce qui réduit la largeur de la piste sur laquelle elle écrit, la tête de lecture, qui est une superposition de plusieurs éléments, est plus complexe à obtenir. En outre, une densité de 60 000 pistes par centimètre requiert des pistes de moins de 170 nanomètres de largeur : une telle taille demandera un positionnement plus précis ; un second actionneur différentiel, qui sera au premier ce que le poignet est à l'épaule, ajustera la position de la tête.

De surcroît, si l'on stocke les informations sur des secteurs plus courts de pistes plus étroites, les signaux seront plus faibles : la séparation de ces signaux et du bruit de fond nécessitera de nouveaux algorithmes pour retrouver les informations avec précision. Les programmes actuels analysent un rapport signal sur bruit de fond inférieur à celui requis pour des densités de mémorisation supérieure à 15 milliards de bits par centimètre carré.

Puisqu'on ne peut indéfiniment réduire la taille des domaines qui stockent les bits individuels, quand l'aimantation est parallèle à la surface des disques, pourrait-on aimanter les disques verticalement, c'est-à-dire en créant des champs perpendiculaires à la surface ?



2. LES VENTES DE DISQUES DURS ont considérablement augmenté, à mesure que le coût de l'unité de mémoire diminuait.

Serrés, debout

Selon les ingénieurs de la Société *TeraS-tor* qui mettent au point de tels dispositifs, la limite qu'impose l'effet superparamagnétique peut alors être dépassée, et les capacités peuvent atteindre 30 milliards de bits par centimètre carré.

Dans ces disques durs, un laser chauffe une petite zone qui devient ainsi aimantable. La densité d'information est alors considérable, parce que le faisceau laser est concentré sur un point d'un diamètre inférieur à un micromètre, grâce à une «lentille à immersion solide». Cette lentille, inventée à l'Université de Stanford, a une forme de sphère tronquée, et son principe ressemble à celui qui est utilisé dans la microscopie à immersion liquide : la lentille et l'objet à observer sont placés dans un liquide, souvent de l'huile, dont l'indice de réfraction, différent de celui de l'air, augmente l'agrandissement en focalisant les rayons lumineux. Grâce à ce principe, le faisceau laser est ici concentré. En outre, dans la technique de «champ proche» qui est utilisée, la distance qui sépare la tête de lecture et d'écriture du support de mémorisation est inférieure à la longueur d'onde du faisceau laser, ce qui réduit la dispersion de la lumière (voir la figure 3).

Le support d'enregistrement est une couche de matériau magnétique déposée sur un disque de plastique. Les bits d'information sont inscrits perpendiculairement à la surface du disque, et non plus horizontalement. Ainsi, les champs magnétiques des bits se renforcent mutuellement et ne sont pas soumis à l'effet superparamagnétique.

En outre, les zones chauffées par le faisceau laser pour l'enregistrement de chaque bit se chevauchent : ces derniers ont alors une forme de croissant ; cette méthode d'enregistrement double le nombre de bits écrits linéairement sur une piste. La lecture utilise l'effet Faraday : l'aimantation modifie la polarisation d'un faisceau laser réfléchi sur le disque ; selon cette aimantation, on obtient des directions de polarisation différentes, qui codent des 0 ou des 1.

Ces nouveaux disques durs seront commercialisés à la fin de l'an 2000. Toutefois, leur capacité sera seulement de 20 milliards d'octets, sur des supports amovibles de la taille d'un disque compact, alors que les disques durs actuels ont déjà des capacités supé-

rieures à 70 milliards d'octets. Les premiers modèles remplaceront peut-être, dans un premier temps, les actuels produits de sauvegarde d'informations pour lesquelles la vitesse d'accès est importante (à bandes et optiques).

Les ingénieurs qui travaillent à ce projet espèrent atteindre ensuite des capacités supérieures à 300 milliards d'octets. Ils sont optimistes, et certains estiment que les perfectionnements des matériaux, des techniques de fabrication et du traitement du signal permettront, d'ici à quelques années, de fabriquer des disques durs avec de telles densités de mémorisation. Leurs prévisions se fondent sur l'examen des progrès passés : l'introduction des têtes à couches minces a demandé près de dix ans, la mise au point des têtes magnétorésistives a nécessité six ans de plus, notamment pour mettre au point des éléments de lecture et d'écriture séparés pour la tête. Pourtant le passage aux disques GMR s'est fait en quelques mois.

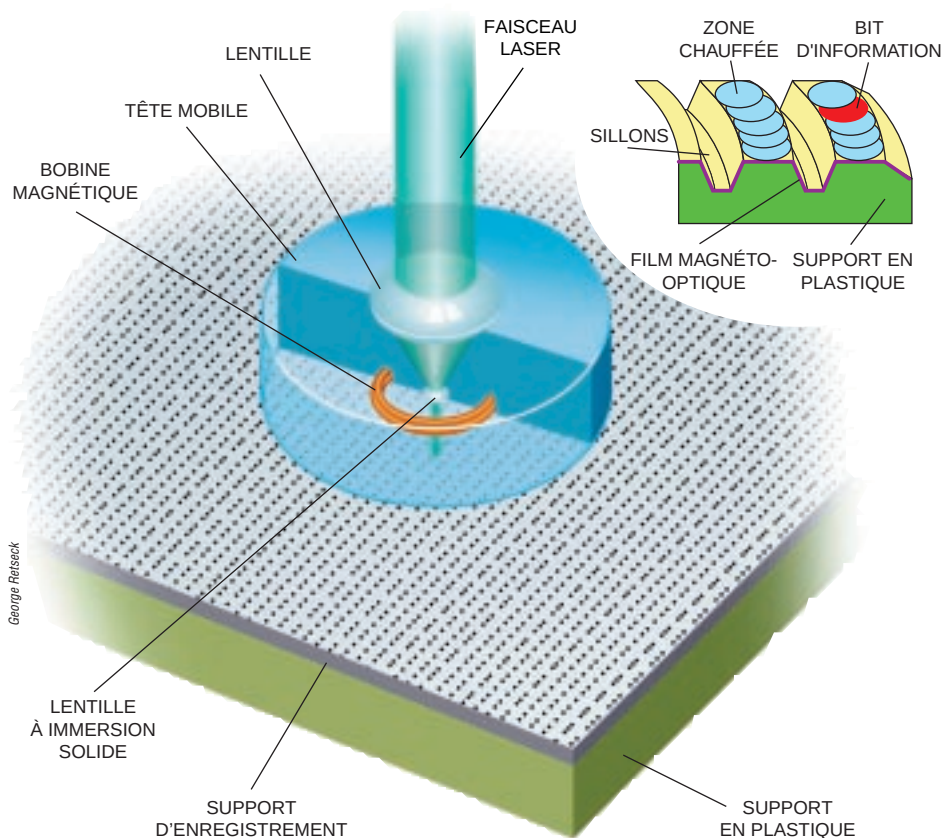
La transition a été rapide, car les têtes GMR n'imposaient que quelques

changements des composants périphériques des disques durs. L'augmentation des capacités jusqu'à plus de 20 milliards de bits par centimètre carré sera peut-être une simple évolution plutôt qu'une révolution.

Le problème de la vitesse

La performance des disques durs tient également à la vitesse d'accès aux données. Or, si la capacité des disques durs augmente de 130 pour cent par an, les vitesses d'accès ne progressent que de 40 pour cent.

Classiquement, les ingénieurs ont augmenté la vitesse de rotation des disques. Toutefois, lorsqu'un disque tourne plus vite, les turbulences de l'air et les vibrations entraînent parfois des erreurs d'enregistrement sur les pistes. Parmi les améliorations possibles, des paliers fluides dans le moteur peuvent remplacer les roulements à billes en acier et en céramique, qui s'usent et deviennent bruyants lorsque les plateaux tournent à plus de 10 000 tours par minute.



3. DANS LES SYSTÈMES MAGNÉTO-OPTIQUES, un faisceau laser chauffe un point minuscule sur le disque, ce qui permet à la tête de modifier les propriétés magnétiques du point. Une première lentille concentre le faisceau sur une lentille à immersion solide, laquelle focalise la lumière en un point d'un diamètre inférieur à un micromètre. Dans ce procédé, les zones chauffées se chevauchent : chaque bit, inscrit verticalement, a une forme de croissant (en haut à droite) ; la densité d'information est ainsi augmentée.

Apparemment, l'industrie du stockage des données envisage la production de disques durs de deux types : pour certains, la capacité sera privilégiée ; pour d'autres, ce sera la vitesse. Les premiers seront adaptés au stockage de masse, telles les sauvegardes des fichiers d'archives, les seconds à des applications pour lesquelles l'accès rapide aux données est primordial.

Naguère, les utilisateurs préféraient des disques plus volumineux aussi peu coûteux que possible, même quand l'accès aux données était ralenti. Toutefois, les nouvelles applications requièrent des disques rapides. Par exemple, le commerce électronique, via le réseau Internet, impose aux sociétés de stocker et de manipuler rapidement des volumes importants d'informations relatives aux clients.

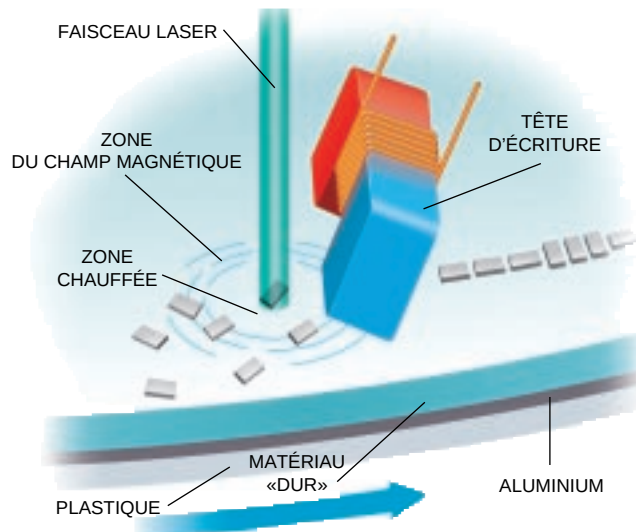
Le dilemme de la capacité et des performances s'aggravera probablement avec la mise en œuvre des solutions au problème de l'effet superparamagnétique. Certaines des solutions proposées s'enorgueillissent de grosses capacités de mémoire, mais leurs vitesses médiocres les confineront à certaines applications. Pour atteindre des densités de mémorisation supérieures à 20 milliards de bits par centimètre carré, les experts concluent qu'on devra utiliser des matériaux radicalement différents pour les supports de mémoire.

De nouveaux supports

Depuis près de 40 ans, la mémoire holographique est un Graal de l'industrie micro-électronique : on prévoit de stocker des billions d'octets (soit l'équivalent de millions de livres) dans un dé de matériau cristallin gros comme un morceau de sucre. En outre, la vitesse de recherche des données mémorisées serait bien supérieure à celle des méthodes magnétiques.

Seuls ou réunis en consortiums financés par des fonds publics, les principaux groupes informatiques s'efforcent de mettre au point un système à mémoire holographique pratique, commercialisable en 2010.

Comment fonctionnerait un tel système ? La mise en mémoire s'effectuerait par des méthodes optiques, dans



4. DANS LES DISQUES EN MATÉRIEAUX «DURS», on chauffe les points successifs des pistes à l'aide d'un laser, de sorte qu'une tête oriente ensuite spécifiquement les cristaux magnétiques éclairés.

des cristaux photosensibles. Les informations seraient stockées et extraites par pages entières de données. Chaque page contiendrait des milliers, voire des millions de bits. Les pages seraient inscrites successivement, à l'aide de deux faisceaux laser. À sa traversée d'un écran à cristaux liquides, nommé modulateur de lumière spatiale, l'un de ces deux faisceaux, nommé faisceau objet, formerait avec la page de données à mémoriser un motif de carrés clairs et opaques, analogue à une grille de mots croisés, qui s'afficherait sur un écran.

Un hologramme de cette page serait créé par l'interférence de ce faisceau objet et d'un second faisceau, nommé faisceau de référence, dans le matériau d'enregistrement photosensible. Selon la nature de ce matériau, le motif d'interférence optique serait inscrit par les changements physiques ou chimiques, telles des variations de l'indice de réfraction, des propriétés d'absorption de la lumière ou de l'épaisseur du matériau photosensible (voir la figure 6).

Une fois ce motif d'interférence mémorisé, son éclaircissement par l'un des deux faisceaux d'origine conduirait à une diffraction de la lumière qui reconstituerait l'autre faisceau. Ainsi, en éclairant le cristal par le faisceau de référence, on recréerait le faisceau objet, avec sa page de données. On détecterait ensuite le motif des données à l'aide d'une puce du type de celles qui sont utilisées dans les caméras numériques ; les données de la puce seraient alors transmises à l'ordinateur.

Le même cristal pourrait contenir de nombreux motifs d'interférence cor-

respondant chacun à une page de données. Pour sélectionner les pages, on modifierait la longueur d'onde du laser ou l'angle entre le faisceau objet et le faisceau de référence.

En 1999, un groupe de recherche composé de plusieurs sociétés a présenté une mémoire holographique d'où des données ont été extraites à une vitesse d'un milliard de bits par seconde : le support est un disque en polymère d'une taille voisine de celle d'un disque compact, capable de mémoriser des volumes de données très importants. De plus, les composants et les matériaux utilisés sont facilement

intégrables dans de futurs produits.

Simultanément, d'autres membres du même consortium ont présenté un autre dispositif pour lequel l'accès rapide a été privilégié, plutôt que les capacités de mémorisation. Doté d'un système de positionnement à très haute vitesse pour diriger son laser à travers un cristal de niobate de lithium, il accédait à une donnée choisie au hasard en moins de 100 millièmes de seconde. Cette vitesse est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celles des disques magnétiques (il faut plusieurs millisecondes pour rechercher une information stockée). Un temps d'accès aussi faible est possible grâce aux faisceaux laser, que l'on peut déplacer rapidement, sans inertie.

Bien qu'encourageants, ces résultats sont encore à compléter par d'autres innovations avant que la mémoire holographique ne soit commercialisable. Par exemple, l'image de la page de données sur la puce doit être parfaite pour que la mémorisation et la récupération des informations fonctionnent convenablement.

Trouver le bon matériau pour le support de mémoire est également une difficulté : les cubes de niobate de lithium et d'autres substances inorganiques, ainsi que des polymères sont à l'étude par diverses entreprises telles Bayer, IBM, Lucent ou Imation. Pourtant, aucun d'eux ne semble être l'idéal pour un système de mémorisation.

Alors que plusieurs groupes perfectionnent leurs prototypes, quelques équipes explorent les propriétés de tels systèmes. L'«associativité», c'est-à-dire

la capacité de regrouper des informations analogues, est l'une des plus intéressantes.

Aujourd'hui, on retrouve les informations mémorisées sur les disques grâce à leur adresse, et non pas d'après leur contenu. Avec la mémoire holographique, les données sont comparées optiquement sans être extraites ; lors de recherches dans de grosses banques de données, on est immédiatement dirigé vers ce qui correspond le mieux.

Après la mémorisation, la projection d'une page de données reconstruit tous les rayons de référence des données dont le motif est similaire. L'intensité de chaque rayon de référence indique le degré de correspondance entre le motif des données mémorisées et la page de données désirée.

Le stockage à résolution atomique

Les systèmes de mémoire holographique remplaceront peut-être un jour les disques durs magnétiques de nos ordinateurs de bureau, mais ils ne conviendront pas au stockage de masse dans des systèmes miniatures, telles les montres ordinateurs, ou dans les véhicules spatiaux, où la forme, la masse et la consommation électrique sont des critères prépondérants.

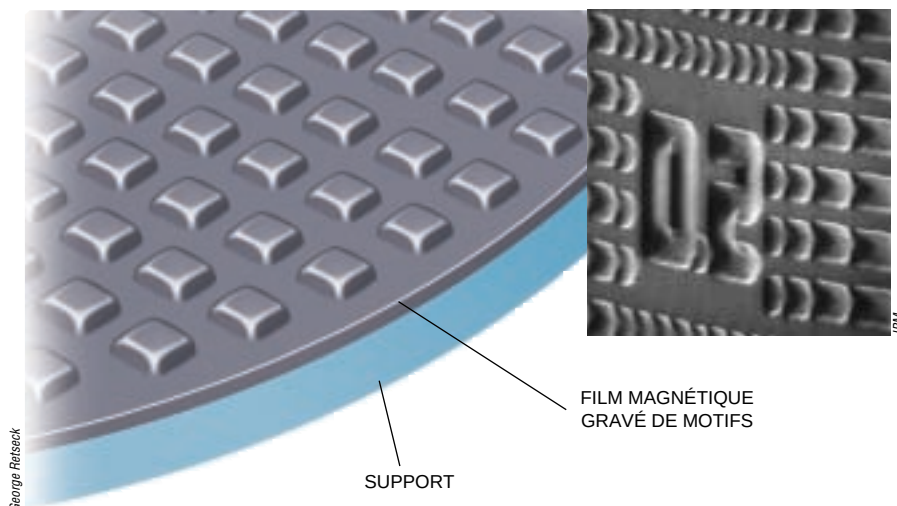
Inspirés par les progrès en microscopie à sonde atomique, où une pointe microscopique survole la surface d'un matériau, formant des images d'une précision de quelques nanomètres, les ingénieurs de la Société *Hewlett Packard* étudient un dispositif gros comme un ongle qui stockerait plus de 150 milliards de bits par centimètre carré. Ce «système de mémoire à résolution atomique» utilise un réseau de points pour lire et écrire les données. Un micro-actionneur déplacera le support sous les pointes (voir la figure 7).

Les ingénieurs chargés du projet doivent résoudre quatre difficultés principales. La première est le choix d'un support de mémoire approprié. Aujourd'hui, ils ont sélectionné un matériau qui présente deux états physiques différents, stables à température ambiante. L'une des phases est amorphe, et l'autre cristalline. Les bits sont inscrits sur ce «support à changement de phase» par un chauffage : le matériau passe alors d'un état à l'autre.

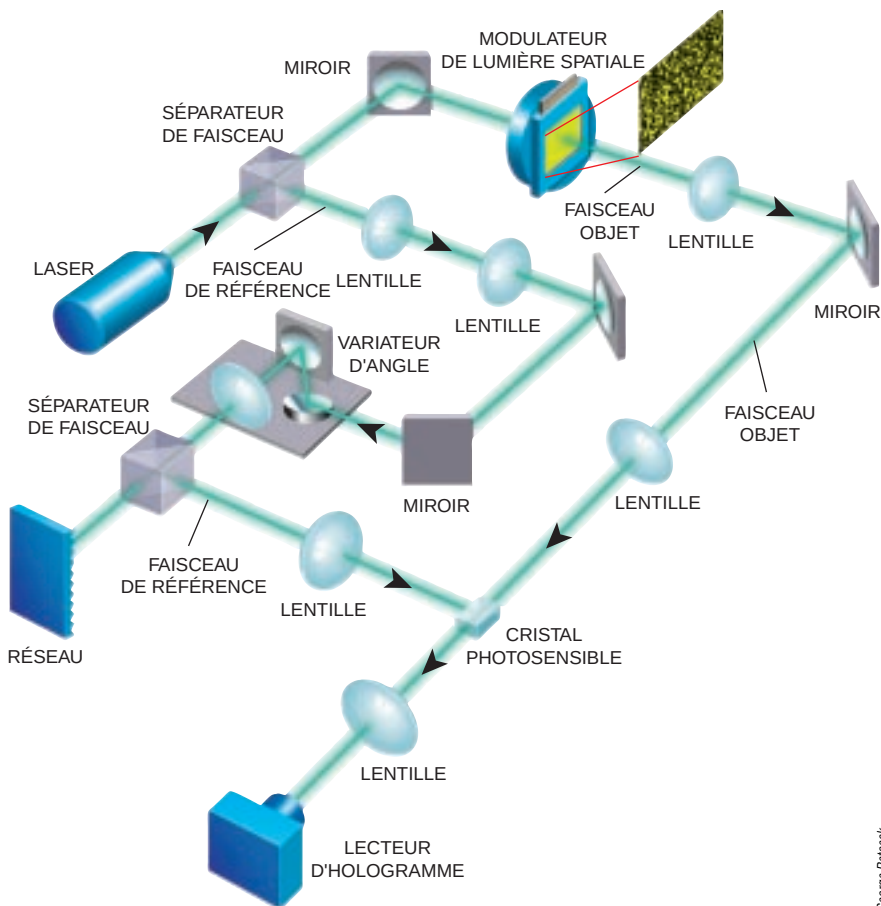
La deuxième difficulté réside dans la réalisation des pointes, qui doivent émettre un faisceau d'électrons dans

une direction précise lors de l'application de la tension électrique. Le faisceau doit être puissant quand il chauffe les points de données du support, afin d'écrire ou d'effacer les informations,

et il doit être plus faible quand il lit les informations en détectant la résistance des points de données (on peut également détecter d'autres propriétés électriques des points). On explore



5. DES BOSSES ET DES CREUX créés sur des disques magnétiques éviteraient la désaimantation des zones de données par l'effet superparamagnétique. Ici, chaque bit est enregistré dans une bosse dont la largeur ne doit pas dépasser huit nanomètres pour atteindre les densités souhaitées. La Société *IBM* a créé de telles structures (à droite), d'une taille de 100 à 200 nanomètres.



6. LES MÉMOIRES HOLOGRAPHIQUES stockent les données page par page dans des cristaux photosensibles. Un faisceau objet capte les données lorsqu'il traverse un modulateur de lumière spatiale. Puis on enregistre dans un cristal la figure d'interférences de ce faisceau et d'un faisceau de référence. Un dispositif mécanique modifie l'angle du faisceau de référence pour enregistrer une autre page.

notamment des techniques de lecture optique à «champ lointain», où la pointe est à un micromètre du support.

Troisièmement, on cherche à construire des micro-actionneurs qui déplacent le support avec une précision de l'ordre du nanomètre. Enfin, de tels dispositifs doivent être logés dans des boîtiers robustes, à côté d'autres éléments. Les éléments mobiles du dispositif devront probablement fonctionner sous vide ou, au moins, dans une atmosphère contrôlée, afin de réduire la dis-

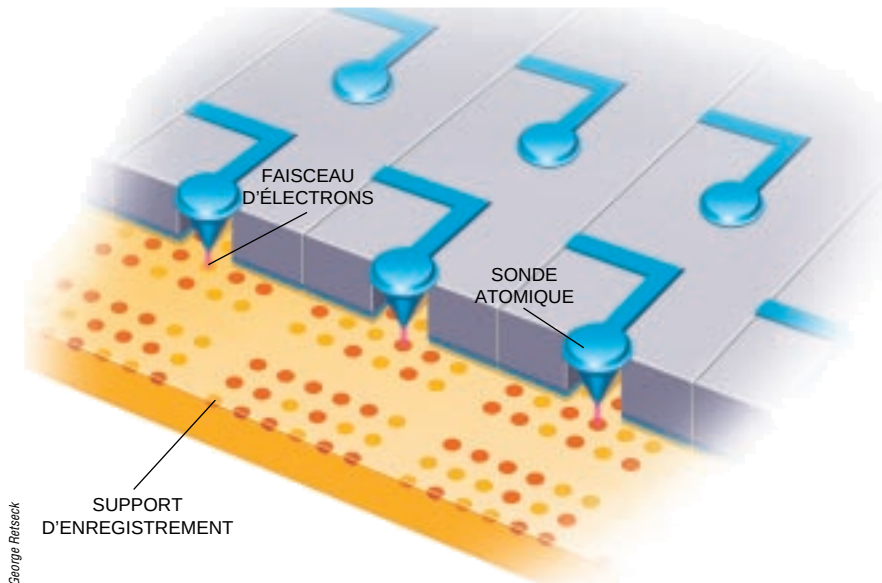
persion des électrons émis par les pointes et de diminuer la propagation de la chaleur par le gaz au-dessus du support.

Malgré la miniaturisation croissante des disques durs magnétiques, les dispositifs de stockage à résolution atomique seront compétitifs pour de nombreuses applications. Ils ont l'avantage de consommer très peu d'énergie : lorsqu'ils n'effectuent pas de lecture ou d'écriture, leur consommation est nulle (alors que les disques durs sont en rotation constante).

Les premiers modèles stockeront sans doute un milliard d'octets, mais les capacités augmenteront progressivement ; la densité n'est limitée que par la taille minimale des points de données.

Les «cartes perforées» du futur

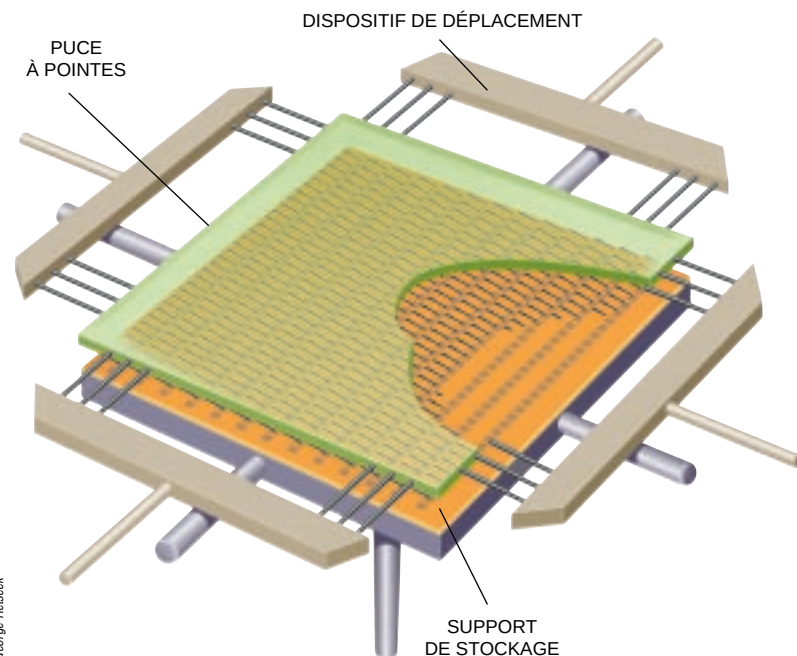
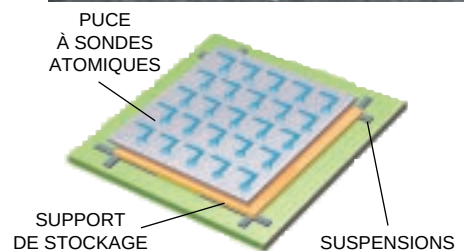
Dans les mémoires à sonde atomique, les mémorisations sont temporaires. Au contraire, avec une version moderne de la carte perforée, le stockage est per-



George Ratsack

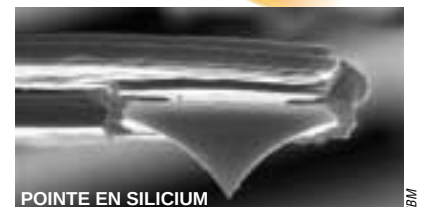
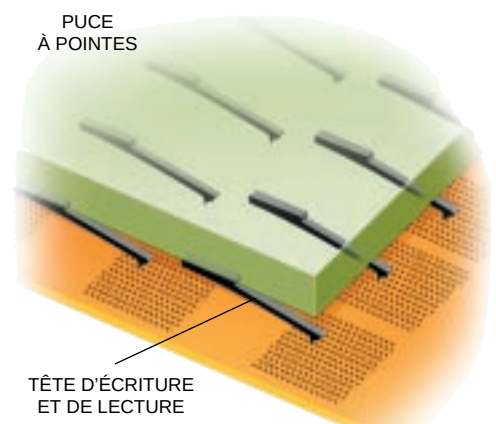
7. LES FAISCEAUX D'ÉLECTRONS d'une «puce à sondes atomiques» enregistrent les données sur un support en chauffant de minuscules points du support à l'aide de faisceaux d'électrons : le chauffage modifie l'état physique des points de données. Sous la puce, le

support est déplacé avec une extrême précision (*en bas, à droite*). Ainsi le logotype de la société **Hewlett Packard**, de 30 micromètres de large (*en haut, à droite*), a été enregistré et visualisé par une seule pointe sur un support à changement de phase.



George Ratsack

8. LE MILLIPEDE est constitué de 32 rangées de 32 pointes en silicium (*à gauche*) qui enregistrent et lisent les données sous la forme de minuscules entailles gravées sur une surface plastique. Chaque extrémité de pointe a un rayon de 20 nanomètres (*photographie de droite*).



manent. Il a l'avantage de s'effectuer sur des supports très bon marché : des feuilles de matière plastique. Aux débuts de l'informatique, les cartes perforées étaient un moyen populaire, quoique bruyant, de mémoriser des informations. Aujourd'hui, l'idée mécanique a été conservée, mais réduite à des dimensions minuscules. Ainsi, la Société IBM a récemment mis au point un prototype, nommé *Millipede*, qui stocke jusqu'à 80 milliards de bits par centimètre carré (soit 15 fois plus que le meilleur disque dur magnétique), sous la forme d'entailles microscopiques sur une surface plane de polymère.

Le *Millipede* est composé de pointes dont l'extrémité (d'un diamètre de 40 nanomètres) repose légèrement sur une surface plastique lisse en mouvement. Lorsqu'un courant électrique passe dans la pointe, celle-ci est brièvement chauffée à 400 °C : elle fond le polymère, créant une série d'entailles qui codent les informations.

Pour lire ces informations, on chauffe l'extrémité de la pointe à une température constante de 350 °C (inférieure à la température de fusion du plastique) tout en la déplaçant sur la surface du polymère. Lorsque la pointe tombe dans une entaille, sa chaleur se dissipe : la baisse de température est alors détectée par un changement de résistance électrique de la pointe.

De fabrication simple, le *Millipede* est constitué de 32 rangées de 32 pointes qui se déplacent sur une surface de neuf millimètres carrés (voir la figure 8). Ces pointes sont en silicium et fonctionnent simultanément, gravant leurs entailles sur une mince couche de plastique qui recouvre un substrat de silicium. Le nombre de pointes peut encore augmenter, et l'utilisation de nanotubes de carbone réduirait leur taille.

Plusieurs problèmes subsistent cependant : l'usure mécanique émousse les pointes et élargit les entailles gravées sur la surface plastique ; les marques ins-

crites risquent alors de se chevaucher et de brouiller les informations.

La plupart des nouvelles mémoires sont encore en début de mise au point, et des prototypes réalistes ne seront construits que si des innovations majeures résolvent les problèmes techniques éventuels. D'ici là, les fabricants de disques durs continueront d'apporter encore quelques améliorations aux disques durs magnétiques classiques.

Aujourd'hui, le prix du bit de mémoire diminue de 1,5 pour cent chaque semaine. L'industrie ne maintiendra un tel rythme que si elle parvient à remplacer les disques durs magnétiques. Néanmoins, personne ne sait quelle technique s'imposera. Les grandes sociétés, prudentes, explorent simultanément plusieurs systèmes.

La plupart des experts pensent que l'effet superparamagnétique ne bloquera pas le développement de l'informatique. Une arrivée tardive de produits de stockage plus performants sera sans doute compensée par l'association intelligente de plusieurs disques. De telles associations existent depuis les années 1980, utilisées lorsqu'un seul disque ne peut répondre aux besoins de certaines sociétés.

Une autre approche prometteuse consiste à placer les disques et les grappes de disques dans des réseaux de systèmes de mémoire, que l'on peut modifier afin de répondre aux appétits de stockage croissants. Ce «service de stockage» livrera automatiquement aux utilisateurs des applications avec la taille et le type de mémoire dont ils ont besoin.

Malgré l'extension des coûts de gestion, ces améliorations constituent un moyen de répondre à court terme aux besoins des sociétés et des consommateurs en matière d'espace de stockage pour leurs informations, en attendant que les dispositifs de haute capacité soient disponibles sur le marché.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

Des cailloux
dans les choses sûres



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 70 F

Code 1897

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 90

Jon TOIGO est consultant en informatique.

John C. MALLINSON, *Magneto-Resistive Heads : Fundamentals and Applications*, Electromagnetism Series, contributions by Isaak D. Mayergoyz, Academic Press, 1995.

Kanu G. ASHAR, *Magnetic Disk Drive Technology : Heads, Media, Channel, Interfaces and Integration*, IEEE Press, 1997.

Shan X. WANG, et A.M. TARATORIN, *Magnetic Information Storage Technology*, Electromagnetism Series, Academic Press, 1999.

Magnetic Recording : The First 100 Years, sous la direction de Eric D. Daniel, C. Denis Mee et Mark H. Clark, IEEE Press, 1999.

Holographic Data Storage, sous la direction de Hans J. Coufal et Demetri Salitis, Springer-Verlag TELOS, 2000.

