

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.

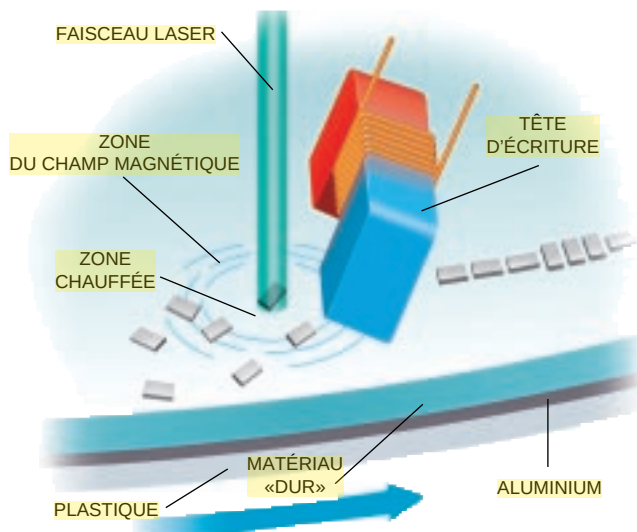
Le dilemme de la capacité et des performances s'aggravera probablement avec la mise en œuvre des solutions au problème de l'effet superparamagnétique. Certaines des solutions proposées s'enorgueillissent de grosses capacités de mémoire, mais leurs vitesses médiocres les confineront à certaines applications. 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 MATÉRIAUX «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 millionièmes 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.

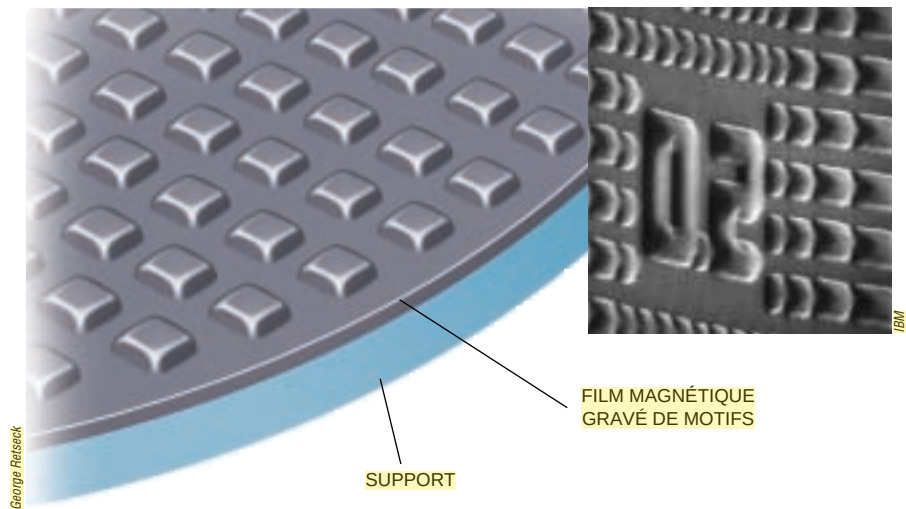
Inspirés par les progrès en microscopie à sonde atomique, où une pointe microscopique survole la surface d'un matériau, formant des images d'une précision de quelques nanomètres, les ingénieurs de la Société Hewlett Packard étudient un dispositif gros comme un ongle qui stockerait plus de 150 milliards 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.

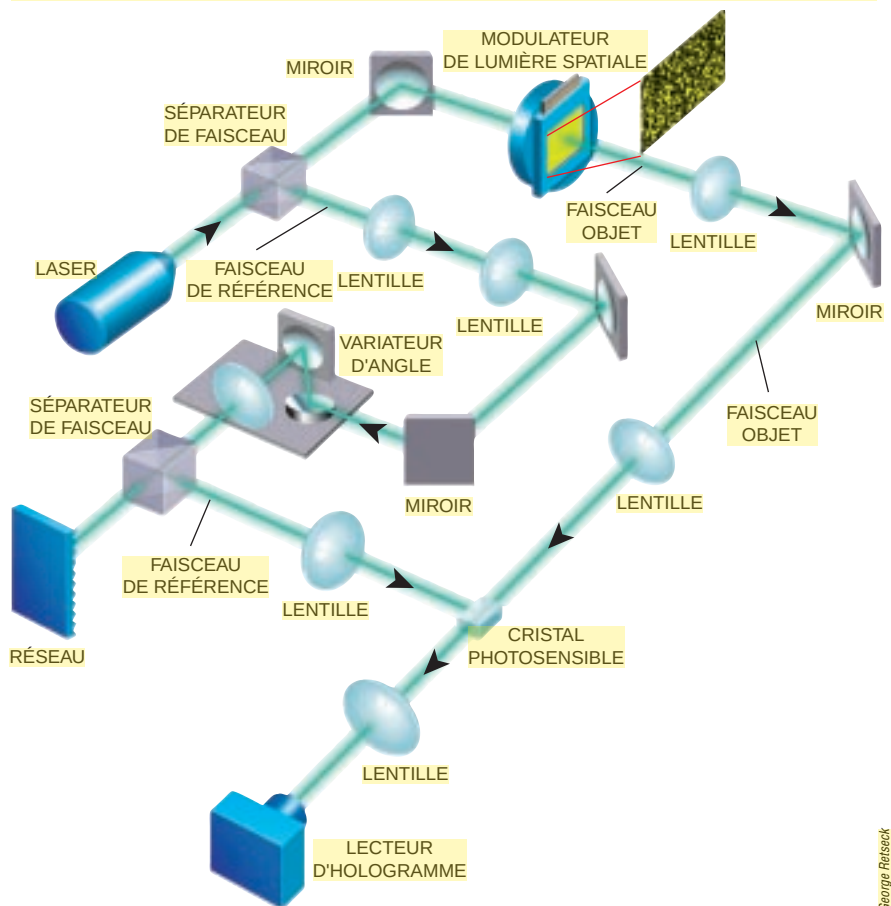
La deuxième difficulté réside dans la réalisation des pointes, qui doivent émettre un faisceau d'électrons dans

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-

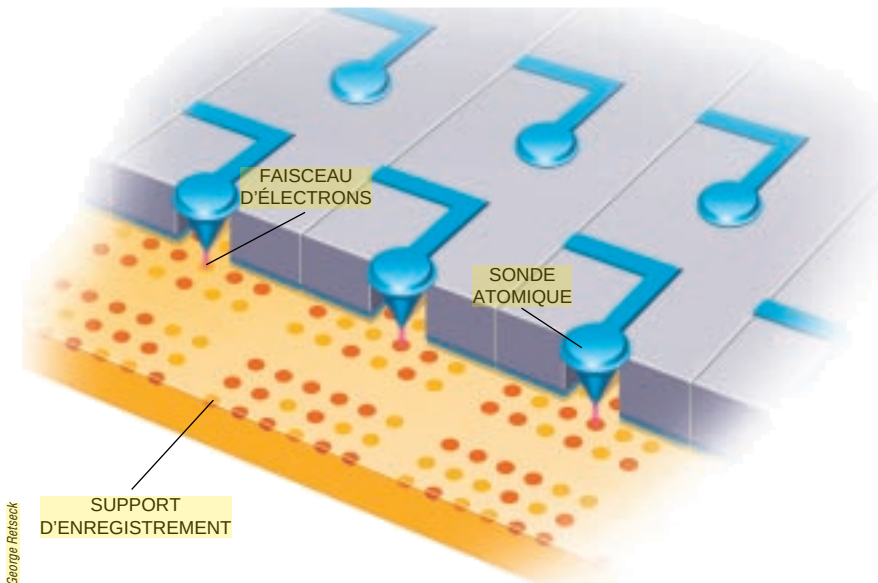
persion des électrons émis par les pointes et de diminuer la propagation de la chaleur par le gaz au-dessus du support.

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.

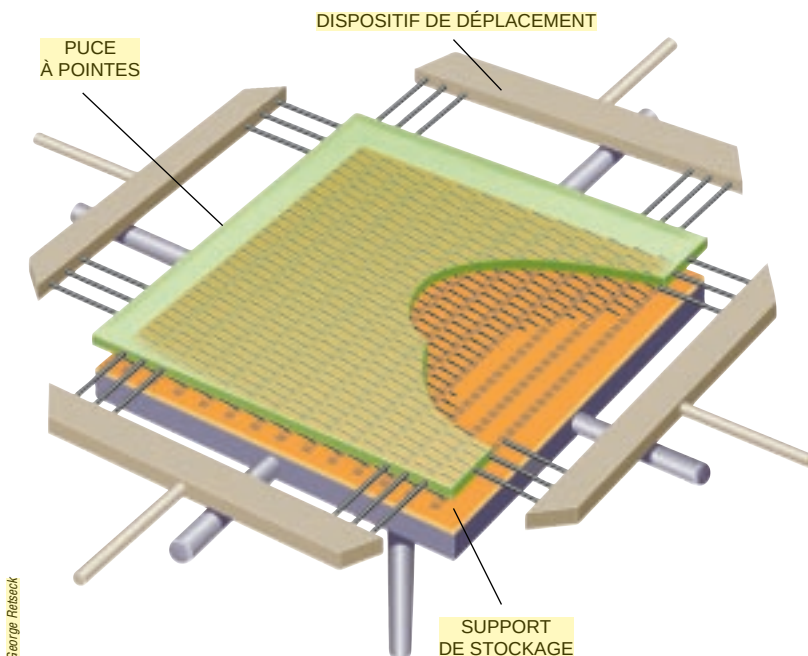
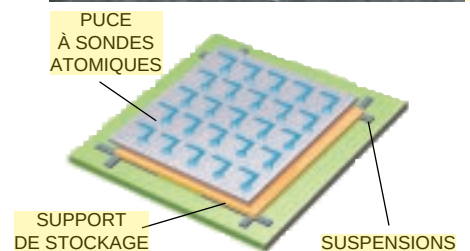
Les «cartes perforées» du futur

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

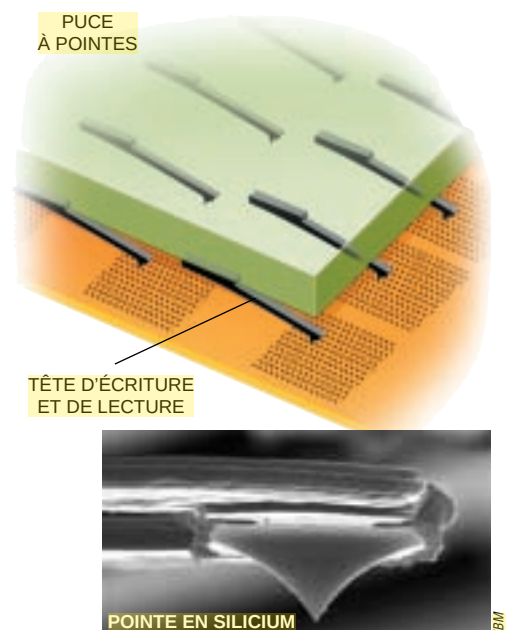


7. LES FAISCEAUX D'ÉLECTRONS d'une «puce à sondes atomiques» enregistrent les données sur un support en chauffant de minuscules points du support à l'aide de faisceaux d'électrons : le chauffage modifie l'état physique des points de données. Sous la puce, le

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.



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.