

rie qui explique la structure des singularités devra violer [CPT et d'autres symétries] pour que puisse apparaître quelque chose de même nature que la courbure de Weyl. Cette brisure de la symétrie par renversement du temps pourrait prendre une forme extrêmement subtile et elle devrait être implicite dans la théorie à venir, qui doit aller au-delà de la mécanique quantique.

## La physique et la réalité selon S. Hawking

Ces conférences ont montré très clairement ce qui nous sépare, S. Penrose et moi. Il est platonicien ; je suis positiviste. Il est préoccupé par le fait que le chat de Schrödinger dans un état quantique est pour moitié vivant et pour moitié mort. Il a l'impression que cela ne peut correspondre à la réalité. Moi, cela m'est égal. Je n'exige pas d'une théorie qu'elle corresponde à la réalité, parce que je ne sais pas ce que c'est. La réalité n'est pas une qualité que l'on puisse tester avec du papier tournesol. Tout ce qui m'importe, c'est que la théorie prédise les résultats des mesures. C'est ce que fait à merveille la théorie quantique[...]

R. Penrose pense que [...] l'effondrement de la fonction d'onde introduit [en physique] une violation de CPT. Il voit cette violation à l'œuvre dans au moins deux situations : la cosmologie et les trous noirs. Je suis d'accord sur le fait que nous pouvons introduire l'asymétrie en temps dans la manière de poser les questions à propos des observations, mais je suis violemment opposé à l'idée qu'il existe un processus physique qui corresponde à la réduction de la fonction d'onde ou que cela ait quelque chose à voir avec la gravité quantique ou avec la conscience. Pour moi, c'est de la magie, pas de la science.

## La physique et la réalité selon R. Penrose

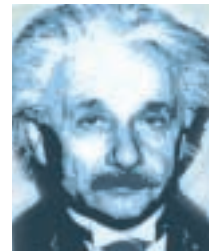
La mécanique quantique n'existe que depuis environ soixante quinze ans. C'est peu au regard, par exemple, de la théorie de la gravitation de Newton. Je ne serais donc pas étonné si la mécanique quantique devait être modifiée pour des objets très macroscopiques.

Lors de ce débat, S. Hawking a mentionné qu'il était positiviste et que j'étais platonicien. Qu'il soit positiviste me convient bien, mais je crois en l'occurrence que ce qui est important c'est que je sois un réaliste. Si l'on compare ce débat au fameux débat qui a opposé Einstein et Bohr, il y a environ soixante-dix ans, il me semble que S. Hawking joue le rôle de Bohr et moi celui d'Einstein ! En effet Einstein soutenait qu'il devait exister un monde réel, non nécessairement représenté par une fonction d'onde, alors que Bohr insistait sur le fait que la fonction d'onde ne décrit pas un micromonde «réel», mais seulement la «connaissance» qui nous est nécessaire à la formulation de prédictions.

Bohr passe pour être sorti vainqueur de la discussion. De fait, si l'on en croit la dernière biographie d'Einstein par Abraham Pais (1994), Einstein aurait tout aussi bien fait d'aller à la pêche à la ligne à partir de 1925. Il est vrai qu'il n'a plus accompli de grandes avancées, même si ses critiques pénétrantes ont été très utiles. Je pense que la raison pour laquelle Einstein n'a pas continué à faire avancer la théorie quantique tient à ce qu'il manquait à la théorie quantique un ingrédient essentiel. Cet ingrédient essentiel, S. Hawking l'a découvert cinquante ans plus tard : c'est le rayonnement du trou noir. Cette perte d'information, liée au rayonnement du trou noir, est un nouveau tournant.



NIELS BOHR



ALBERT EINSTEIN

---

Les éditeurs remercient de son aide Gary T. Horowitz de l'Université de Californie à Santa Barbara.

---

# La prochaine génération de disques compacts

ALAN BELL

*Un nouveau format de disque compact, nommé DVD, est né d'un accord entre les fabricants de produits électroniques. Les premiers lecteurs et les disques à ce format apparaîtront début 1997.*

**D**epuis leur apparition, en 1982, six milliards de disques compacts audio (CD) et 400 millions de lecteurs de disques ont été vendus. Les CD-ROM, disques pour ordinateur analogues aux disques audio, ont le même succès : plus de 35 millions de lecteurs de CD-ROM auront été vendus en 1996. Des perfectionnements de ces disques apparaîtront dans les prochains mois : ils sont fondés sur un nouveau format, le DVD (l'acronyme de *digital versatile disc*, soit «disque numérique multimédia»). Au début de l'année 1997, dix grosses sociétés d'électronique présenteront leurs produits DVD, notamment des lecteurs de DVD-ROM et des lecteurs de DVD pour la projection des films.

Le format DVD est le résultat d'un accord sans précédent qui s'est conclu, à la fin de 1995, entre deux groupes concurrents de multinationales de l'électronique et des médias. Tous les participants à l'accord ont mis en commun les meilleurs de leurs produits ou de leurs systèmes, qui avaient été mis au point séparément. Les lecteurs de disques optiques issus de cet accord liront aussi bien les disques compacts actuels que les DVD. Grâce à plusieurs innovations, ces derniers stockeront jusqu'à 25 fois plus d'informations que leurs homologues classiques. En outre, les lecteurs de DVD de la première génération liront 11 millions de bits par seconde, neuf fois plus rapidement que les premiers lecteurs de CD-ROM.

Naturellement, de telles capacités de stockage et ces performances accrues favoriseront la mise au point

d'applications nouvelles. Sur les DVD comme sur les disques compacts, on enregistrera aussi bien de la musique que des films, des jeux ou d'autres produits multimédias. Toutefois, les DVD auront une capacité bien supérieure et restitueront leurs données avec une meilleure qualité. De surcroît, ils devraient inspirer des produits nouveaux. Par exemple, un film pourra être accompagné d'images prises sous des angles différents, de sous-titres ou de doublages dans plusieurs langues, ou bien encore de programmes interactifs de karaoké. Dans quelques années, des DVD-R (enregistrables une fois) et des DVD-RAM (enregistrables et effaçables à volonté) seront commercialisés. Puis des caméscopes numériques stockant leurs informations sur des DVD-RAM devraient voir le jour.

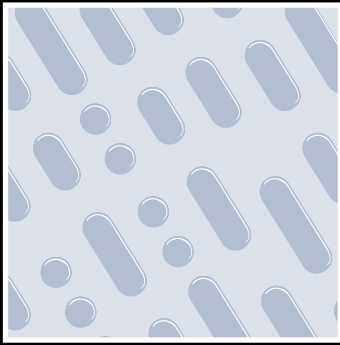
## Des petits trous, des petits trous

Les formats DVD et CD partagent la même technique de stockage optique : l'information est représentée par des cavités microscopiques, formées à la surface d'un disque de plastique lorsque le matériau est injecté dans

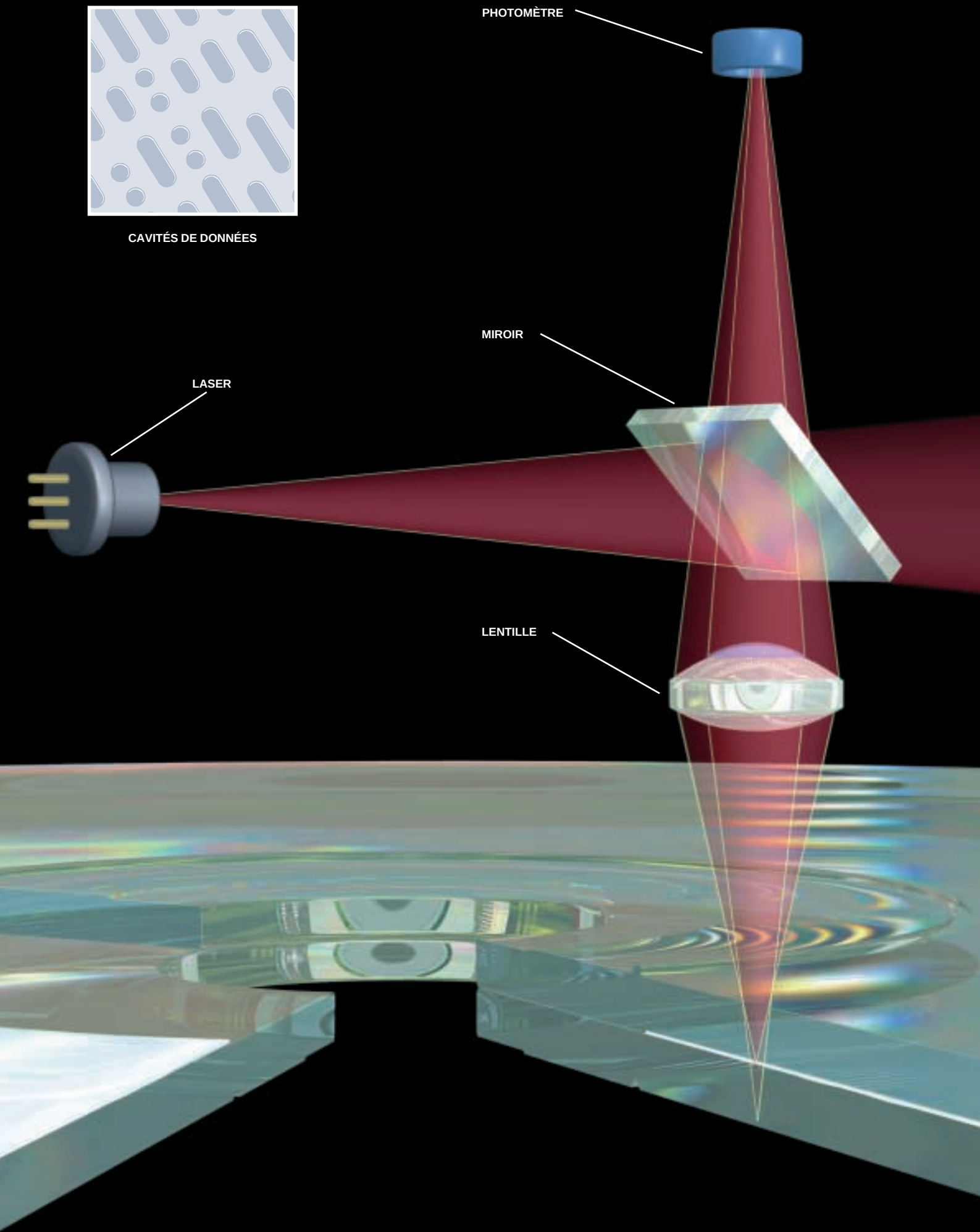
un moule. La face «gravée» du disque est ensuite recouverte d'une mince couche d'aluminium, puis, dans le cas d'un CD, d'une couche de laque protectrice et d'une étiquette. Pour lire les données, le lecteur émet un faisceau laser très fin à travers le disque, vers la surface contenant les données, tandis que le disque tourne. L'intensité de la lumière réfléchiée par la surface du disque varie selon la présence (ou l'absence) de cavités sur la piste. Lorsqu'une cavité se trouve directement sous le faisceau de lecture, moins de lumière est réfléchiée que lorsque le faisceau frappe une partie plane de la piste. Un photomètre convertit cette variation d'intensité lumineuse en chiffres binaires 0 et 1, qui codent numériquement l'information stockée.

Il existe deux différences essentielles entre les CD et les DVD. Tout d'abord, les cavités d'un DVD sont plus petites : elles ne mesurent que 0,4 micromètre (millionième de mètre) de diamètre, contre 0,83 micromètre pour celles d'un CD. Ensuite, les pistes de données des DVD ne sont distantes que de 0,74 micromètre, tandis que 1,6 micromètre sépare les pistes d'un CD. Aussi, bien qu'un DVD ait presque la même taille qu'un CD, la piste qui y

**1. LES NOUVEAUX DISQUES OPTIQUES DE STOCKAGE DES DONNÉES** comportent, à la différence des disques compacts actuels, deux couches de cavités qui codent les données (ces cavités sont montrées, grossies, dans le cartouche, en haut à gauche). Quand le disque tourne, ces indentations minuscules passent sous le faisceau d'un laser rouge, modifiant la quantité de lumière réfléchiée. Un photomètre et un système électronique transforment ces variations en 0 et 1, qui codent les données. Le réglage de la position de la lentille permet au lecteur de lire les informations de la couche supérieure ou de la couche inférieure d'un DVD (disque numérique multimédia). La lumière traversant un hologramme, au centre de la lentille, se focalise en un second point, ce qui permet de lire les CD actuels.



CAVITÉS DE DONNÉES



stocke les données est longue de plus de 11 kilomètres, plus du double de celle d'un CD.

Naturellement, pour lire les plus petites cavités du DVD, le faisceau de lecture doit être mieux focalisé que celui d'un lecteur de CD. Il est émis par une diode laser rouge de longueur d'onde égale à 0,635 ou à 0,650 micromètre, tandis que les lecteurs de CD utilisent des lasers infrarouges de longueur d'onde supérieure (0,780 micromètre). En outre, les lecteurs de DVD utilisent une lentille possédant une ouverture numérique supérieure à celle des lecteurs de CD. Comme la focalisation maximale d'un système optique est proportionnelle au quotient de la longueur d'onde de la source lumineuse par l'ouverture de la lentille, la focalisation supérieure permet de faire converger la lumière dans les petites cavités de 0,4 micromètre du DVD. Ces différences, alliées à l'efficacité supplémentaire du format DVD décrit dans la suite, expliquent la capacité de 4,7 gigaoctets de chaque couche d'informations d'un DVD.

Cette capacité peut être doublée pour atteindre 9,4 gigaoctets – et presque doublée encore, jusqu'à 17 gigaoctets – grâce à deux autres inno-

vations. Bien que les DVD et les CD aient tous deux une épaisseur de 1,2 millimètre, les DVD possèdent deux couches superposées pouvant stocker les informations, alors que les CD n'en ont qu'une. Les couches d'un DVD sont disposées de sorte que les surfaces gravées sont face à face. Cette disposition protège les surfaces des poussières ou des rayures. Dans la conception la plus simple du DVD, on lit la seconde face du DVD en retournant manuellement le disque dans le lecteur. Avec les disques multicouches, on peut lire les deux surfaces qui stockent l'information sans retourner le disque.

### Une structure en sandwich

Dans un disque multicouches, la couche supérieure est recouverte d'un dépôt semi-réfléchissant. La réflexion sur la couche supérieure est suffisante pour permettre au faisceau laser de lire les cavités qui s'y trouvent, mais sa transparence permet également de focaliser le faisceau laser sur la couche inférieure ; lorsque la lumière laser est focalisée sur les cavités de la couche inférieure, les cavités de la couche supérieure sont floues. Comme elles réfléchissent alors peu de lumière, celle-ci

n'interfère pas avec la lumière réfléchie par la couche inférieure. Pour compenser la faible perte de qualité de lecture inhérente à cette approche, on a ramené la capacité à 8,5 gigaoctets (au lieu de 9,4), ce qui explique pourquoi un DVD double face, double couche contient environ 17 gigaoctets. On assemble les deux couches à l'aide d'une colle transparente.

Le DVD à double couche a d'autres avantages que sa capacité supérieure : il réduit les erreurs dues à l'inclinaison et au voilage des disques. Tous les disques compacts finissent par se voiler et, lorsque la surface n'est plus perpendiculaire au faisceau laser, des erreurs de lecture surviennent. La dégradation du faisceau de lecture due à l'inclinaison est proportionnelle à l'épaisseur des couches. Les couches d'un DVD, épaisses de 0,6 millimètre seulement, rendent le disque moins sensible aux problèmes d'inclinaison que les CD, dont l'unique couche a une épaisseur double. Il existe toutefois d'autres raisons pour lesquelles le DVD est moins sensible à certaines formes de voilage.

Par exemple, les changements brusques de température ou d'humidité peuvent dilater ou contracter le

## Un pour tous, tous pour un

**A**u début de 1995, il semblait encore peu probable que les disques compacts de seconde génération soient tous à la même norme : deux groupes de sociétés d'électronique grand public – l'un mené par les Sociétés *Sony* et *Philips* (co-inventeurs des premiers disques compacts), et l'autre conduit par les Sociétés *Toshiba*, *Matsushita* et *Time Warner* – avaient chacun leur propre projet. *Sony* et *Philips* proposaient le disque compact multimédia (CDMM), qui aurait contenu 3,7 gigaoctets sur un disque à une seule face, assez semblable au disque compact d'aujourd'hui, tandis que le groupe dirigé par *Toshiba* avait conçu un format nouveau, nommé SD (pour superdensité), capable de contenir cinq gigaoctets sur chaque face d'un disque double face.

Initialement, *Toshiba* reçut l'appui d'une partie de l'industrie du cinéma, qui pensait que le format SD était le seul qui permette de stocker sur un disque des films entiers avec une bande-son de haute qualité. D'un autre côté, beaucoup de fabricants se sentaient plus à l'aise avec le CDMM, une extension prudente du format CD, solidement éprouvé. Toutefois, ni les studios ni les sociétés informatiques ne voulaient deux formats incompatibles, car ils craignaient la répétition désastreuse de la bataille qui opposa les normes VHS et *Betamax* pour les vidéocassettes : l'introduction des deux formats avait été très lente jusqu'à ce que le format VHS domine, et les consommateurs infortunés ayant investi dans la technique *Betamax* furent lésés lorsque les fabricants de cassettes se rallièrent au format dominant. Un groupe de spécialistes du stockage de données, réuni par *Sony* et *Philips*

pour examiner leur format, élargit sa mission en examinant également le projet de *Toshiba*. Ces examens durèrent 18 mois. D'emblée, le groupe technique fixa clairement ses objectifs : parvenir à un seul format pour une famille de disques compatibles, à lecture seule et enregistrable.

En août 1995, un premier rapport était rendu : chaque format était acceptable pour les applications informatiques, mais il était inacceptable que les formats ne soient pas unifiés. Pourrait-on combiner les meilleurs éléments de chaque projet ? Les deux groupes en concurrence finirent par accepter qu'*IBM* arbitre les négociations et, le 15 septembre, ils acceptèrent un format unique, qui empruntait au projet de *Toshiba/Time Warner* le disque mince et le programme correcteur d'erreurs, et au projet de *Sony/Philips* l'algorithme de modulation du signal.

Le 8 décembre, les derniers détails du format unifié étaient entérinés, et le nouveau format pour les disques à lecture seule était finalement annoncé sous le nom de DVD. Depuis, le groupe de travail poursuit son étude en collaboration avec les sociétés de la coalition pour le DVD, en se concentrant sur les aspects techniques des formats enregistrables, pour le DVD-RAM enregistrable et le DVD-R enregistrable une fois. Le groupe encourage aujourd'hui les sociétés à maximiser la compatibilité entre les DVD-ROM, DVD-RAM et DVD-R et leurs produits dérivés, y compris pour les divers environnements des applications, notamment les ordinateurs personnels et les systèmes de divertissements (consoles de jeux, livres électroniques, appareils photo numériques, etc.).

matériau du DVD. Cependant, comme celui-ci est symétrique, les changements dans une couche compensent ceux de l'autre, ce qui minimise le défaut total d'inclinaison.

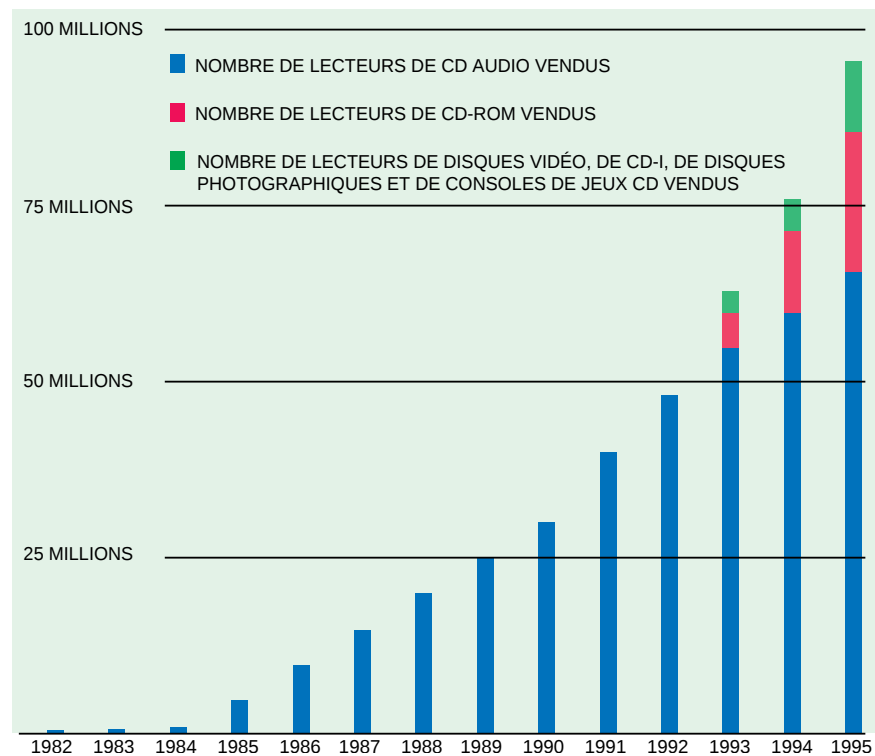
Comme les consommateurs ont déjà acheté beaucoup de CD audio et de CD-ROM, les fabricants ont voulu que les lecteurs de DVD lisent aussi bien les CD que les nouveaux disques. Cette polyvalence des lecteurs de DVD nécessitait des caractéristiques optiques spécifiques. La solution la plus simple consistait à monter deux lentilles sur une tête optique unique – l'une prévue pour une couche de 1,2 millimètre d'épaisseur (CD, CD-ROM), l'autre pour une couche de 0,6 millimètre d'épaisseur (DVD) –, et à laisser l'utilisateur choisir celle qui serait utilisée, à l'aide d'un commutateur.

La solution retenue est plus élégante : une lentille moulée comprenant un hologramme en son centre est interposée entre le disque et le photomètre (voir la figure 1). La lumière traversant l'anneau extérieur de la lentille n'est pas perturbée par l'hologramme et se focalise dans le plan de la couche inférieure en un faisceau suffisamment petit pour lire les informations d'un DVD, tandis qu'un tiers du faisceau frappe la partie centrale et est focalisé à la fois par la lentille et par l'hologramme en un faisceau qui lit les cavités plus larges du CD.

## Plus de bits

Si les DVD contiennent plus de cavités que les CD, ils ont en outre plus d'informations par nombre de cavités, grâce à de nouvelles méthodes de codage. Quelle que soit la forme originelle des informations à enregistrer – donnée, texte, son, image ou succession d'images –, les chiffres binaires 0 et 1 qui représentent directement l'information, nommés bits utiles, doivent être protégés des erreurs introduites au cours de la lecture en raison de poussière, de rayures ou de la corrosion. Des programmes de contrôle et de correction minimisent ces erreurs au moyen d'algorithmes qui utilisent des bits de données supplémentaires, stockés en plus des données utiles. Ces bits additionnels, bien qu'essentiels, diminuent la capacité totale disponible pour les données utiles.

Néanmoins, les codes correcteurs d'erreurs des formats DVD sont extrêmement puissants : ils peuvent ainsi



**2. LES VENTES DE LECTEURS DE DISQUES COMPACTS ont régulièrement augmenté depuis 1982, année de leur première commercialisation. Les CD-ROM, introduits en 1993, ont un succès considérable.**

corriger une erreur s'étendant sur 2 000 octets, soit environ quatre millimètres de piste. Dans le format DVD, les données servant à corriger les erreurs occupent 13 pour cent de la capacité du disque (contre 30 pour cent sur les CD). L'efficacité accrue des codes correcteurs d'erreur DVD résulte pour une large part de l'augmentation de la puissance de calcul des puces électroniques d'aujourd'hui.

Lors de l'enregistrement, les données utiles combinées aux données de correction d'erreur sont converties en «bits de modulation», qui sont les bits réellement représentés par les cavités à la surface du disque. Cette étape crée des cavités de tailles différentes, ce qui assure un suivi fiable lors de la lecture. Par exemple, on ne code pas une suite ininterrompue de 0 par une absence de cavités le long de la piste ; des cavités spéciales permettent au faisceau de ne pas perdre la piste. La méthode de codage du format CD transforme huit bits (un octet) utiles en 17 bits de modulation. Le DVD utilise une méthode améliorée, qui transforme huit bits utiles en seulement 16 bits de modulation, tout en gardant la qualité originelle des CD. Comme moins de bits sont nécessaires pour représenter les bits utiles, le DVD contient plus d'informations utiles. Cette

particularité permet d'améliorer l'efficacité de stockage d'environ six pour cent par rapport au format CD.

## Un film en disque

Le format DVD permettra pour la première fois le visionnage de films entiers munis d'une bande-son aussi bonne que les bandes numériques utilisées dans les cinémas. Cette caractéristique soulève d'importants problèmes de protection des droits d'auteur (voir *Les droits d'auteur des œuvres numériques*, par Ann Okerson, page 74), mais le visionnage des films est l'utilisation principale pour laquelle les capacités et les performances du DVD ont été choisies.

Malgré la capacité accrue des DVD, les films ne peuvent être enregistrés que s'ils sont numérisés sous une forme comprimée (sans compression, un DVD de 4,7 gigaoctets de capacité ne contient que quatre minutes de film). On utilise à cette fin un mode de compression à débit variable, nommé MPEG2 : le degré de compression est ajusté en fonction de la complexité de la scène ; les scènes avec de nombreux détails et les actions rapides sont codées par plus de bits que les parties moins complexes. De ce fait, le débit des données comprimées varie

au cours de la lecture. Le mode de compression MPEG2 permet également à l'utilisateur de choisir le format d'image du film : soit le format ordinaire de la télévision (dont largeur et hauteur sont dans un rapport 4/3), soit le format 16/9 de type cinéma.

L'augmentation de la capacité des disques permettra aussi d'améliorer la qualité du son. Comme le sait quiconque a vu *Le grand bleu* ou *Diva* dans un bon cinéma, une bande-son de haute qualité accroît le plaisir du spectateur. Le format de film sur DVD offrira deux méthodes de codage du son : soit le système AC-3 multivoies (5.1) des Laboratoires *Dolby*, soit la méthode de modulation par impulsions codées (méthode PCM), la compression à débit variable des signaux audio (le codage MPEG audio) étant en option. Le système *Dolby* code le son avec un signal au débit de 448 000 bits par seconde, pour créer cinq pistes audio indépendantes de qualité équivalente à celle d'un CD, ainsi qu'une sixième voie consacrée aux effets sonores basse fréquence (ainsi s'explique la désignation «5.1» du système). Les spécifications des DVD pour les disques

purement audio – successeurs des disques compacts audio – ne sont pas encore complètement établies, dans l'attente d'informations venant de l'industrie de l'enregistrement des disques musicaux et d'institutions indépendantes telles que la Société internationale des ingénieurs en acoustique (*Audio Engineering Society*).

La capacité accrue des DVD permettra le perfectionnement ou la création de jeux vidéo et de produits de divertissement ou éducatifs, à un coût de production voisin de celui des CD actuels. Au lieu de s'échiner à réduire leurs œuvres à quelques malheureux 680 mégaoctets, les auteurs d'applications multimédia auront bientôt le luxe de chercher à remplir des disques double couche de 8,5 gigaoctets de capacité ou même les DVD à quatre couches d'une capacité totale de 17 gigaoctets.

### Disques inscriptibles et lasers bleus

Jusqu'ici, nous n'avons considéré que des DVD où l'information est stockée sous forme de petites cavités, mais

des DVD enregistrables devraient être commercialisés en 1998. Ces DVD-RAM, ainsi que des DVD-R (enregistrables une fois), promettent d'être bien plus puissants et pratiques que les CD correspondants : alors que les systèmes d'enregistrement optique de ces derniers se fondent principalement sur la technique magnéto-optique, le support d'enregistrement des DVD-RAM sera plus probablement un matériau qui change de phase : un film mince, polycristallin, déposé à la surface du substrat du disque. Pour enregistrer chaque bit, une impulsion laser, intense mais brève, fond une région sub-micrométrique du film. Comme cette petite quantité de matière refroidit très vite, la région fondue ne recristallise pas et se fige dans un état amorphe, désordonné, qui réfléchit moins bien la lumière que la phase cristalline. Cette différence de réflexion assure ensuite le décodage des données par un faisceau laser «lecteur» de faible intensité, qui ne refond pas le matériau.

Les ingénieurs ont trouvé plusieurs matériaux assez sensibles pour enregistrer des données, assez stables pour conserver celles-ci et assez durables pour supporter des centaines de milliers de cycles d'enregistrement et d'effacement. L'enregistrement à changement de phase a plusieurs avantages : comme le codage correspond simplement à des variations d'intensité de la lumière réfléchie par le disque, on peut lire des DVD-RAM à l'aide des mêmes têtes optiques que celles des lecteurs de DVD-ROM (la lecture magnéto-optique, elle, requiert des composants particuliers qui détectent de faibles changements de la polarisation du faisceau de lecture). Aussi, le lecteur-enregistreur de DVD-RAM fondé sur les matériaux à changement de phase ne serait pas beaucoup plus cher que le lecteur de DVD-ROM. En outre, il n'y a pas d'impossibilité technique à ce que les DVD-RAM soient lus par les lecteurs de DVD-ROM.

La variété des supports amovibles de stockage de données est aujourd'hui déroutante : disquettes de petite ou de grande capacité, disques durs amovibles, disques magnéto-optiques, plusieurs sortes de bandes magnétiques... Personne ne prévoit que les lecteurs-enregistreurs DVD-RAM remplaceront les disques durs magnétiques, dont les performances sont extraordinaires, mais ces systèmes

| Comparaison entre le DVD et le CD |                                                        |                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractéristique                   | Ancien format                                          | Nouveau format                                                                                                                                                                        |
| Diamètre du disque                | 120 millimètres                                        | 120 millimètres                                                                                                                                                                       |
| Structure du disque               | Une couche de 1,2 millimètre d'épaisseur               | Deux couches de 0,6 millimètre d'épaisseur chacune                                                                                                                                    |
| Taille minimale des cavités       | 0,83 micromètre                                        | 0,4 micromètre                                                                                                                                                                        |
| Longueur d'onde du laser          | 0,780 micromètre (infrarouge)                          | 0,635 et 0,650 micromètre (rouge)                                                                                                                                                     |
| Capacité                          | Une couche sur une face, soit 0,68 gigaoctets au total | Deux couches, une par face, d'un total de 9,4 gigaoctets<br>Deux couches sur la même face, d'un total de 8,5 gigaoctets<br>Quatre couches, deux par face, d'un total de 17 gigaoctets |
| Ouverture numérique               | 0,45                                                   | 0,60                                                                                                                                                                                  |
| Densité de la piste               | 6 000 pistes par centimètre                            | 13 000 pistes par centimètre                                                                                                                                                          |
| Densité en bits                   | 17 000 bits par centimètre                             | 38 000 bits par centimètres                                                                                                                                                           |
| Débit de transfert des données    | 1,2 à 4,8 mégabits par seconde                         | 11 mégabits par seconde                                                                                                                                                               |
| Densité des données               | 105 mégabits par centimètre carré                      | 508 mégabits par centimètre carré                                                                                                                                                     |

seront de bons supports amovibles de lecture et d'écriture de données. Comme le coût de stockage sur des DVD enregistrables pourrait descendre à un centime par mégaoctet, les nouveaux lecteurs-enregistreurs pourront s'imposer comme le format universel de distribution de l'information. Un unique lecteur-enregistreur de DVD-RAM pourrait alors accueillir de nombreuses applications actuelles et futures des ordinateurs personnels, notamment les programmes de traitement de texte, la PAO (publication assistée par ordinateur), le transfert de données, l'archivage et la sauvegarde de données.

Les concepteurs du format DVD ont prévu les progrès futurs. Par exemple, des lasers de plus courtes longueurs d'onde (émettant dans le vert ou le bleu) permettront peut-être de doubler encore la densité des données (voir *Les lasers bleus*, par Robert Gunshor et Arto Nurmikko, page 60). Ainsi des dérivés de la technique de base du DVD pourront nous servir 50 gigaoctets sur un plateau de 1,2 millimètre d'épaisseur, soit une petite bibliothèque sur un seul disque.

De nombreux spécialistes parachèvent les spécifications de la famille unifiée des formats DVD. Ils s'efforcent de faire les choix techniques qui offriront la base la plus fonctionnelle aux applications futures, dont beaucoup ne sont mêmes pas conçues. De la même façon que la télévision a rapidement évolué pour devenir bien plus qu'une radio avec des images, les applications issues du nouveau format devraient évoluer de façon surprenante et imprévisible dans les années à venir.

---

Alan BELL, ingénieur de la Société IBM, était président du groupe d'experts qui spécifia les caractéristiques des DVD.

Ken C. POHLMANN, *The Compact Disc Handbook*, in *The Computer Music and Digital Audio Series*, vol. 5, A-R Editions, Madison, Wisconsin, 1992.

Des informations sur les DVD :

- <http://www.sel.sony.com/SEL/consumer/dvd/index.html>
- <http://www.toshiba.com/tacp/SD/>
- <http://www.philips.com/pkm/laseroptics/dvd/>

Chers lecteurs,

# ■ POUR LA SCIENCE

a le plaisir de vous annoncer  
pour répondre à vos attentes,  
le lancement, dès son édition  
d'octobre 1996, d'une nouvelle section :

## «CARRIÈRE, EMPLOI, CONFÉRENCE ET FORMATION»

L'objectif de cette section d'annonces classées est de vous proposer, chaque mois, des offres d'emploi, des formations, de vous informer sur les prochains événements en relation avec vos divers domaines d'activités.

Alors n'oubliez pas de nous consulter, dès le 1<sup>er</sup> octobre prochain. Si vous avez des postes à pourvoir, des conférences à annoncer, des formations à présenter, n'hésitez pas à contacter :

**FABIEN SAVENAY**  
**POUR LA SCIENCE / nature**  
**3-5, RUE JOSEPH SANBŒUF 75008 PARIS**  
**TÉL : 43 87 42 17 / FAX : 43 87 42 15**

Afin d'obtenir un complément d'informations  
et bénéficier de notre offre exceptionnelle !

\*Date limite de réservation,  
pour le numéro spécial lancement,  
le 6 septembre 1996

carrière formation carrière formation

# Les lasers bleus

ROBERT GUNSHOR • ARTO NURMIKKO

*De nouveaux semi-conducteurs permettent de fabriquer des lasers miniatures qui émettent de la lumière bleue. Ces laser bleus liront des disques compacts contenant bien plus d'informations qu'aujourd'hui.*

L'élément essentiel des lecteurs de disques compacts est un laser minuscule, mais puissant, qui émet un faisceau lumineux très fin. Celui-ci, tel le diamant de nos vieux tourne-disques, parcourt la surface du disque et lit des informations gravées sous la forme de minuscules cavités, dont la taille minimale est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière émise par le laser ; plus la longueur d'onde est courte, plus les cavités peuvent être petites et plus la quantité d'informations enregistrables sur un seul disque est importante.

Aujourd'hui, les lasers des lecteurs de disques compacts sont fabriqués à partir d'arséniure de gallium et d'autres semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont excités, émettent un rayonnement infrarouge d'environ 0,82 micromètre de longueur d'onde. Ce rayonnement permet de détecter des cavités dont la taille est d'environ un micromètre (un cinquième de l'épaisseur d'un cheveu). Comme le décrit l'article précédent (voir *La prochaine génération de disques compacts*, par Alan Bell, page 54), des améliorations des lasers semi-conducteurs rouges augmentent déjà cette densité d'informations, mais des diodes laser qui émettraient une lumière bleue de 0,46 micromètre de longueur d'onde détecteraient des cavités bien plus petites que les meilleurs lasers rouges. Gravé avec ces cavités plus petites, un disque compact contiendrait les neuf symphonies de Beethoven, au lieu d'une seule aujourd'hui. Les applications multimédias, qui nécessitent la numérisation de grandes quantités de données audiovisuelles, se développeraient plus facilement.

Pourquoi l'industrie ne dispose-t-elle pas encore de lecteurs de disques compacts à laser bleu ? L'examen du fonctionnement des lasers à semi-

conducteurs le révèle. Ces systèmes sont de petits cristaux de grande pureté et de grande perfection cristalline, séparés en deux régions principales dont les caractéristiques électriques sont différentes. Dans la zone de type *n*, le courant électrique est transporté par des électrons surnuméraires. Dans la zone de type *p*, ce sont des trous, des défauts électroniques analogues à des particules chargées positivement, qui assurent la conduction. Lorsqu'une tension électrique positive est imposée entre la zone de type *p* et la zone de type *n*, les électrons et les trous circulent en sens inverse, en direction de l'interface des deux zones.

Cette interface est une couche très mince nommée « puits quantique » : les électrons et les trous qui y entrent y restent piégés, se combinent deux à deux et disparaissent. Dans certaines conditions favorables, leur combinaison s'accompagne de l'émission d'un photon, ou particule de lumière. Quand l'émission de photons est couplée à un mécanisme de réinjection, assuré par une paire de miroirs très réfléchissants placés de chaque côté du dispositif, une émission laser se produit : tous les photons sont émis à la même longueur d'onde et avec la même phase, selon la même direction.

L'énergie des photons produits, inversement proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière, dépend d'une grandeur électronique intrinsèque au semi-conducteur : sa largeur de bande interdite, c'est-à-dire l'énergie minimale qu'il faut fournir au matériau pour créer simultanément un électron et un trou. La largeur de la bande interdite de l'arséniure de gallium est de 1,45 électron-volt. Pour obtenir une lumière bleue, la bande interdite doit être presque deux fois plus large : on doit utiliser d'autres semi-conducteurs, des matériaux à large

bande interdite, tels le sélénium de zinc et le nitrure de gallium. Ces matériaux de types respectifs II-VI et III-V (les éléments qui les constituent sont repérés d'après leur position dans le Tableau périodique de Mendeleiev) devraient être nommés « semi-isolants » plutôt que semi-conducteurs : leur résis-

**1. LES LASERS BLEUS** permettront d'enregistrer et de lire beaucoup plus d'informations qu'aujourd'hui sur les disques compacts. Pour évaluer leur potentiel, on utilise des cristaux qui transforment le rayonnement d'un laser infrarouge en lumière bleue. À l'avenir, de minuscules cristaux de semi-conducteur produiront directement un faisceau laser bleu.

tivité électrique est l'un des principaux obstacles à leur utilisation.

## Les débuts des bleus

Au début des années 1980, des physiciens et des chimistes ont commencé à fabriquer des cristaux semi-conducteurs II-VI en utilisant la technique d'épitaxie par jet moléculaire : des jets des atomes à réunir sont envoyés dans une enceinte à ultravide, vers un substrat. Là, le cristal souhaité se forme par empilement des atomes, exactement comme on construit une maison, rangée de briques après rangée de briques. On a ainsi fabriqué des matériaux de formule chimique précise, avec une grande qualité cristalline. La mise en œuvre de la technique a amélioré la compréhension du comportement des couches qui servent de puits quantique, et l'on a obtenu des matériaux qui émettaient des photons bleus et verts (la lon-

gueur d'onde du vert est un peu supérieure à celle du bleu). Toutefois, la mise au point de diodes laser bleues et vertes n'était pas achevée, car ces premiers dispositifs n'émettaient de la lumière que lorsqu'ils étaient excités par un autre laser, beaucoup plus gros.

L'étape suivante, c'est-à-dire la réalisation de diodes laser bleues et vertes activées par une tension électrique, a pris dix ans. Les physiciens savaient fabriquer des cristaux de sélénium de zinc qui contenaient un excès d'électrons, mais pas de cristaux de ce matériau qui contenaient un excès de trous ; autrement dit, on ne savait pas fabriquer de véritable diode. En 1990, une équipe a perfectionné l'incorporation d'atomes d'azote, lors de l'épitaxie, fabriquant du sélénium de zinc qui contenait un excès de trous. L'année suivante, des ingénieurs de la Société 3M et nos équipes, aux Universités Purdue et Brown, ont obtenu les premières diodes laser bleues

et vertes. Ces lasers ne fonctionnaient pas en continu, et nous devions les refroidir par de l'azote liquide, à une température de 77 kelvins ( $-196^{\circ}\text{C}$ ). Ces dispositifs ont toutefois été améliorés rapidement, afin qu'ils fonctionnent en continu à 77 kelvins et par impulsions à la température ambiante.

À l'automne 1993, des physiciens de la Société Sony et de notre équipe ont fait fonctionner en continu, pendant plusieurs dizaines de secondes et à température ambiante, une diode laser excitée par une tension de seulement cinq volts. Cette amélioration notable (les premières diodes laser bleues et vertes nécessitaient une tension de 30 volts) résultait de nouvelles et astucieuses techniques de fabrication des matériaux. Plus récemment, la Société Sony a fabriqué une diode laser qui émet une lumière verte de longueur d'onde égale à 0,52 micromètre, en continu pendant environ 100 heures à température ambiante. Nous avons

