

L'AUDIOPHILE

THEORIE ■ ACOUSTIQUE ■ ELECTRONIQUE ■ RECHERCHE ■ REALISATIONS PERSONNELLES

Un monde d'erreurs corrigéables et non corrigéables

Le disque CD, miracle permanent



Près de 13 milliards de disque CD ont été mis sur le marché depuis 1983. C'est un grand succès. C'est aussi un miracle permanent lorsque l'on regarde de plus près différents problèmes liés tant à la nature du support qu'à ceux de la lecture. C'est le cas des erreurs de lecture qui ne sont, contrairement aux idées reçues, corrigéables qu'en partie seulement.

Le disque CD est un miracle permanent. Vrai chef d'œuvre de haute technologie mis à la portée du grand public pour une consommation de masse dès 1983, il représente le premier grand pas vers l'audio numérique qui s'est largement vulgarisé depuis cette date. Même s'il a déjà pour successeur le DVD, le disque CD, sans concurrent sérieux jusqu'à ce jour aura vraisemblablement une durée de vie de l'ordre de 50 ans. En effet, il traversera sans doute les mêmes stades de croissance, d'apogée puis de décroissance lente qu'a connu son prédécesseur le disque microsillon, avec plus de 45 ans de succès.

La vulgarisation très rapide du disque CD est liée à la synergie de plusieurs points forts comme par exemple :

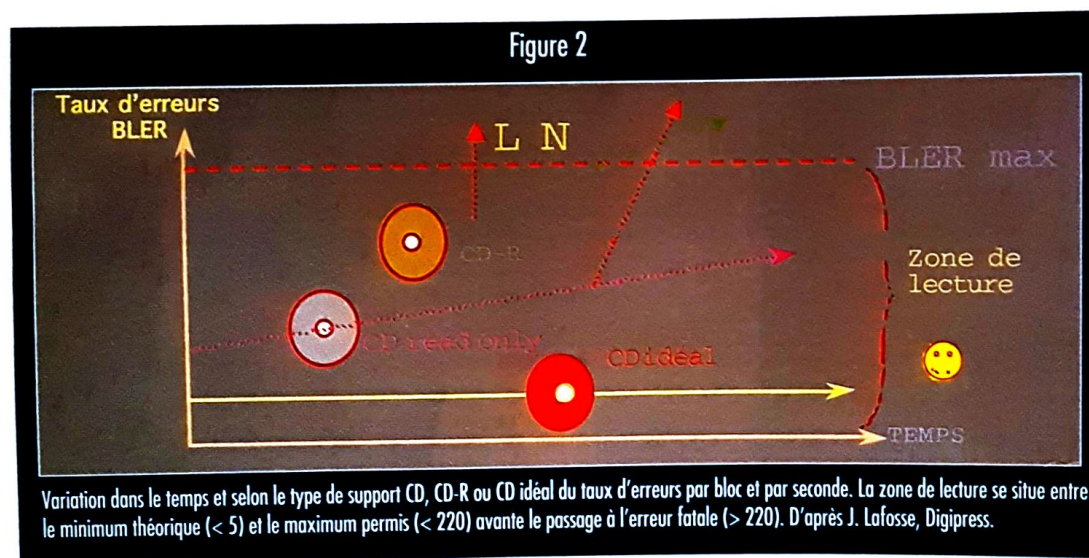
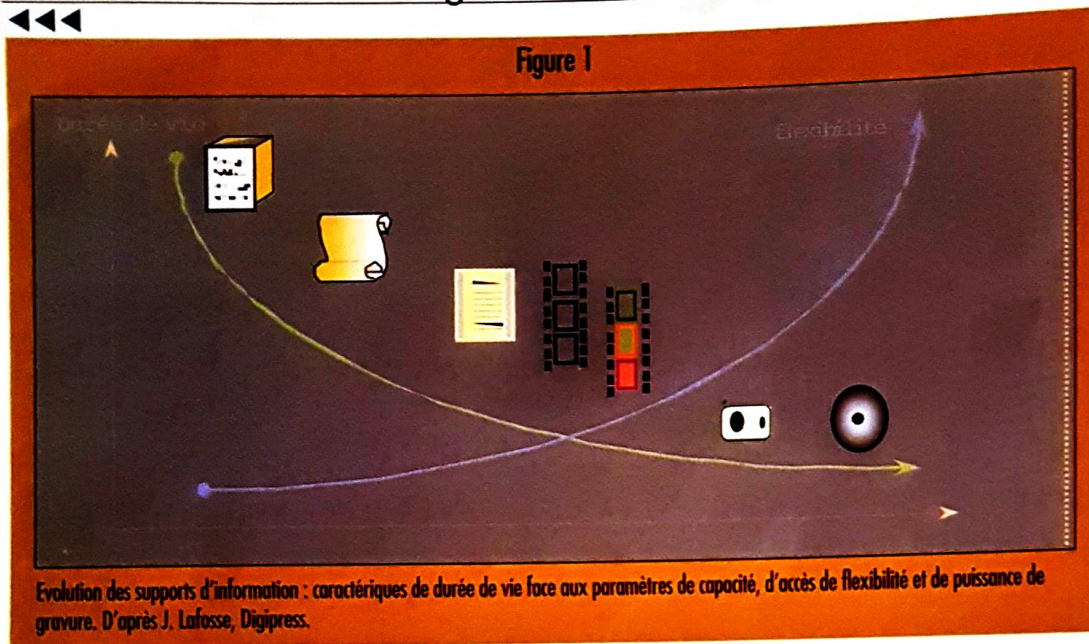
- la lecture sans contact garantissant l'absence d'usure ;
- pas de dégradation du support ;
- la grande facilité d'utilisation ;
- la taille compacte au regard d'une durée de lecture supérieure à celle des deux faces d'un disque microsillon ;
- les performances de bande passante 20 Hz ~ 20 kHz, de dynamique (94 dB) et de distorsion harmonique ($\leq 0,05\%$). En

revanche, on a fait croire à tort que le disque CD est plus résistant aux rayures et à d'autres sortes d'agressions qu'il ne l'est réellement : lumière, rayons UV et infra-rouges, liquides, température, chocs thermiques, humidité, moisissure, sueur, spot laser (risque de sur-écriture dans le cas d'un CD enregistrable) etc. En réalité, le disque CD reste un média relativement fragile et d'une fiabilité discutable.

Le disque CD, un monde d'erreurs, un miracle permanent

Comme le montre la figure 1, les support d'information ont évolué dans le temps en suivant pour tendance générale une amélioration des performances pour une durée de vie de plus en plus courte. La recherche de densité d'information élevée a conduit à une autre tendance, à savoir une énergie relative pour l'écriture inversement proportionnelle à la densité d'information, ainsi qu'à une complexité des systèmes de lecture de plus en plus grande. Les hiéroglyphes gravés dans la pierre illustrent bien ce point par rapport à la piste d'un CD dont la largeur n'est que de 0,5 μm . Les premiers sont encore lisibles 3000 ans plus tard alors qu'il est tout à fait improbable que l'on puisse déchiffrer les inscriptions

Un monde d'erreurs corrigéables et non corrigéables



gravées sur un disque CD en janvier 5000.

Assemblage complexe de différents composants (polycarbonate, aluminium, encre d'imprimerie), le CD est trompeur quant à sa longévité. Sur le long terme, il est sujet à un phénomène de dégradation lente qui se traduit par une augmentation du nombre d'erreurs (données erronées) durant la lecture, phénomène que l'on mesure sous la forme de taux d'erreurs par bloc, par seconde, (Block Error Rate/sec.) dont le minimum théorique est des 10 blocs/sec. et le maximum autorisé

est de 220, valeur au-delà de laquelle le disque est rejeté, la lecture devenant impossible.

La grande illusion : le niveau de lisibilité apparent

Le niveau de lisibilité apparent, c'est-à-dire celui qui, à l'écoute, même très attentive du signal lu, ne permet pas de détecter d'anomalie particulière, ne signifie pas pour autant que toutes les erreurs de lecture ont été corrigées à la perfection. Le taux d'erreurs maximum admis est un BLER de 220. Au

delà de ce taux, on considère que le lecteur n'est plus en mesure de corriger la succession d'erreurs et laissera entendre un bruit normal ou lira la même portion de piste de façon ininterrompue ou, au contraire, arrêtera la lecture. Le fait que le lecteur restitue sans problème apparent le contenu musical d'un CD ne veut pas dire qu'il n'y a pas de données erronées sur ce disque ou que toutes les erreurs détectées ont pu être corrigées. Il se trouve que certaines données erronées peuvent avoir été détectées, mais le lecteur étant dans l'incapacité de les corriger,

celles-ci seront masquées par un procédé d'interpolation faites à partir de données exactes encadrant les données altérées, soit par mise sous silence du lecteur pendant une fraction de seconde. Il est évident que de tels procédés de "raccourci" ne peuvent être appliqués à la lecture des données issues d'un CD-ROM. Ce taux d'erreurs n'est pas quelque chose de constant car il peut varier avec le centrage et la planéité du disque, les éventuelles rayures et autres salissures venant altérer sa surface.

Principe de lecture et de correction des erreurs

La lecture sans contact d'un disque CD comprend une diode laser de type AlGa As, un système optique et des photodiodes. Le faisceau laser de longueur d'onde 780 nm et de 0,8 mm de diamètre initial traverse l'épaisseur en polycarbonate jusqu'à atteindre la face contenant l'information sur laquelle il est focalisé à l'aide d'un système optique. Lorsqu'il atteint la piste codée, le spot mesure en moyenne 1,7 µm de diamètre pour une longueur d'onde de voisine de 500 nm.

Le sillon n'est pas formé, contrairement aux opinions reçues, d'une succession de bosses et de creux de même longueur. Les informations codées en 16 bits linéaires sous une fréquence d'échantillonnage 44,1 kHz sont soumises à un codage complexe nécessaire au stockage, à la synchronisation, à l'affichage, à la durée de lecture et surtout à la correction des erreurs selon le mode Cross Inter-leave Reed-Solomon Code (ou CIRC), le tout étant codé selon une modulation par conversation des mots de 8 bits en mots de 14 bits (Eight to Fourteen : codage EFM). Grâce à ce procédé de codage, il est possible de s'assurer que chaque cuvette ou chaque plateau moulé dans le plastique auront toujours une longueur supérieure à la plus

Un monde d'erreurs corrigibles et non corrigibles

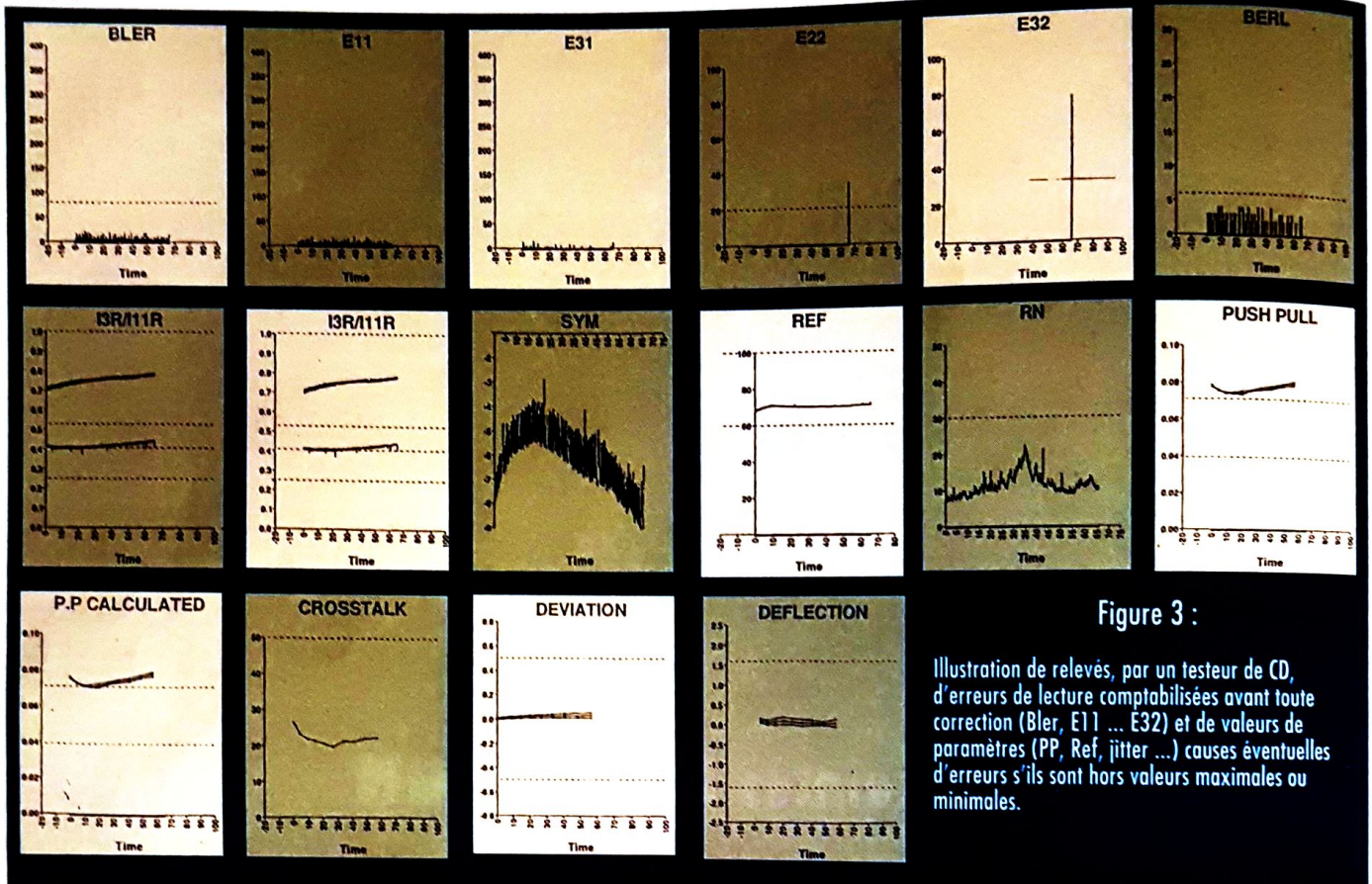


Figure 3 :

Illustration de relevés, par un testeur de CD, d'erreurs de lecture comptabilisées avant toute correction (Blér, E11 ... E32) et de valeurs de paramètres (PP, Ref, jitter ...) causées éventuelles d'erreurs s'ils sont hors valeurs maximales ou minimales.

petite longueur détectable par le spot de lecture et inférieure à une longueur au-delà de laquelle les signaux d'horloge ne seraient plus correctement régénérés. Ainsi, l'ensemble des signaux composant un programme musical serait-il représenté par une suite de cuvettes et de plateaux disposés tout au long d'une spirale.

La longueur de ces cuvettes et de ces plateaux (espace entre deux-cuvettes) varie de façon incrémentale. La plus petite a une longueur équivalente à deux bits de valeur 0 et la plus grande a une longueur de 10 bits de valeur 0.

La transition entre un plateau et une cuvette correspond à une valeur logique de 1. On dispose ainsi de 9 longueurs possibles de cuvettes et de plateaux : 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 et 11, appelés également 2T, 3T, 4T, 5T, 6T, 7T, 8T, 9T et 11T. Physiquement, une cuvette a

une largeur de 0,5 µm, une profondeur de 0,1 µm pour une longueur minimum de 0,90 µm et une longueur maximale de 3,05 µm. Pour faciliter la synchronisation de lecture des données, le flux numérique composé de symboles de correction de 8 bits (détection, correction des erreurs du codage CIRC) et de symboles de 8 bits pour la signalisation est organisé pour former des trames. Il faut encore y ajouter des cellules de liaison et des caractères de synchronisation globale pour obtenir finalement des trames composées chacune de 588 cellules réparties en 24 cellules (synchronisation), 14 cellules (signalisation), 14 cellules (représentant chacun 24 symboles de données codées sous le mode Eight to Fourteen), 14 cellules (contenant chacune 8 symboles de correction d'erreurs) et enfin 3 dernières cellules de 3 groupes

pour les liaisons. Après démodulation, on obtient des blocs de 32 symboles dont 24 pour les informations et 8 pour les corrections. Deux décodeurs se chargent des corrections d'erreurs. Ils sont surnommés C1 et C2. Le premier décodeur C1 reçoit les 32 symboles de 8 bits dont 4 pour la parité qu'il utilise. Le codage Reed-Solomon peut corriger un symbole erroné sur les 32 reçus. Au delà, le décodeur C1 se contente de détecter une erreur et laisse passer les 28 symboles non corrigés accompagnés d'un "drapeau" (flag) de signalisation reconnus par le second décodeur C2. Ce dernier peut corriger jusqu'à 4 symboles erronés par trame. Grâce au principe d'entrelacement des données, les décodeurs C1 et C2 peuvent corriger jusqu'à 450 symboles erronés successifs. Précisons que le BLER, le taux d'erreurs par

blocs par seconde est mesuré à l'entrée du décodeur C1. La classification des tests s'exprime comme suit :

- E 11 exprime le nombre de blocs contenant un symbole erroné pouvant être corrigé par le décodeur C1 ;
- E 21 exprime le nombre de blocs comprenant chacun deux symboles erronés pouvant être corrigé par le décodeur C1 ;
- E 31 exprime le taux d'erreurs ne pouvant être corrigés par C1 ;
- E 12 exprime le nombre de blocs comprenant chacun un symbole erroné pouvant être remis en forme par le décodeur C2.

L'ensemble des erreurs de type E 31 parviennent jusqu'au décodeur C2 qui les répartit à nouveau erreurs de type E 12, E 22 et E 32. Ainsi, un nombre important d'erreurs de type E 12 n'est pas significatif vu qu'une seule erreur

Un monde d'erreurs corrigéables et non corrigéables

| CD-R Test | Test Result (Number of Discs) (Marg. = Marginal) | | | | | | | | |
|------------------------|--|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | Lot A | | | Lot B | | | Lot C | | |
| | Pass | Marg. | Fail | Pass | Marg. | Fail | Pass | Marg. | Fail |
| Itop (Reflectivity) | 21 | 2 | 0 | 10 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| Radial Tracking | 16 | 7 | 0 | 18 | 4 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| Radial Noise | 21 | 2 | 0 | 12 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| I11/Itop | 23 | 0 | 0 | 10 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| I3/Itop | 21 | 2 | 0 | 10 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| Asymmetry | 20 | 0 | 3 | 9 | 2 | 1 | 6 | 0 | 0 |
| Jitter | 16 | 4 | 3 | 5 | 3 | 4 | 6 | 0 | 0 |
| Length Deviation | 16 | 3 | 4 | 10 | 1 | 1 | 6 | 0 | 0 |
| Radial Contrast Before | 23 | 0 | 0 | 10 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| BLER | 21 | 2 | 0 | 12 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| E22 Errors | 20 | 1 | 2 | 9 | 3 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| E32 Errors | 22 | 0 | 1 | 12 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| Burst Errors | 20 | 0 | 3 | 12 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| Total Discs | 10 | 6 | 7 | 1 | 7 | 4 | 6 | 0 | 0 |

Figure 4 : test de fiabilité effectué sur trois lots de disques CD-R.

de type E 31 peut contenir jusqu'à 30 erreurs de type E 12. En revanche, un taux élevé d'erreurs de type E 22 constaté sur l'ensemble d'un disque CD signifie que l'on approche le taux d'erreurs incorrigibles :

- REF, BERL, CRC, RN, BEGL concernent la réflectivité, la longueur des défauts (rayures, etc.), le nombre de bloc contenant des erreurs de vérifications des redondances cycliques, le bruit "radial" dans la bande 500 Hz ~ 2,5 kHz et les erreurs (rayures etc.) dépassant la limite de 7 ;

- Les erreurs de type E 32 sont dites fatales car elles ne peuvent être corrigées par le second correcteur C2.

Pour quantifier ces différentes données, les professionnels utilisent des appareils de détection des erreurs tels que le StageTech 2.115. Il indique, sous forme codée, le nombre d'erreurs et aussi l'endroit exact où s'est effectuée la correction soit par exemple :

"1:1 01.12.48E a-time backward jump, to 1.12.46, suivi de :

1:1 01.12.47E a-time forward jump, to 01.12.49", signifiant en clair que, suite à des erreurs de lecture, des sauts de lecture avant et arrière ont été nécessaires à la correction par interpolation.

Le tableau de la figure 3 montre 16 types d'erreurs pouvant être détectés lors de la lecture d'un disque. Chaque type d'erreur peut être indiqué en tant que valeur minimale, maximale ou moyenne.

Sur ce tableau, la mesure indiquée "SYM" correspond à la taille des reliefs codés, des écarts trop grands ou trop faibles entre les parties lisses (lands) et gravées (pits, cuvettes, ou *bumps*, bosses vues du côté lecture) pouvant se traduire par des problèmes de lisibilité. La mesure indiquée "Push-Pull" est relative à la capacité de la tête de lecture à pouvoir suivre un sillon à partir d'une position médiane correspondant à la capture la plus nette du signal composite appelé "diagramme de l'oeil" ou *Eye Pattern*. Ce diagramme de l'œil, visible sur un oscilloscope sous la forme d'une multitude de signaux sinusoidaux superposés est sujet à un effet de sautellement comprise entre 3,2 Hz et 7,6 Hz provenant des paramètres suivants :

- vitesse linéaire de lecture, comprise entre 1,2 et 1,4 m/sec. ;
- vitesse angulaire résultante, comprise entre 458 tours/mn (près du centre) et 197 tours/mn (en périphérie) ;
- amplitude du voile du disque, le

maximum autorisé par le *Red Book* de la norme CD ne devant pas dépasser les $\pm 0,5$ mm à la périphérie du disque.

Le fameux *Jitter*, phénomène d'errance temporelle du signal est lié à la qualité du mastering, du pressage et aussi à la précision du centrage du disque. Bien que les normes du *Red Book* spécifient une limite de ± 70 μ m à ne pas dépasser, le jeu que l'on ressent le plus souvent au toucher en plaçant le disque sur le lecteur montre qu'il excède souvent cette valeur. Sur le haut de gamme Teac P-0, on a tenté de réduire le phénomène d'excentrage à l'aide d'un système d'asservissement très sophistiqué.

Ce *jitter* se traduit, après décodage par une variation de la longueur des 9 signaux de base cités plus haut, référencés 3T à 11T. Le signal le plus petit, de 0,9025 μ m de longueur théorique peut ainsi osciller entre 0,833 μ m et 0,972 μ m et entraîner, pour des écarts plus importants, des erreurs.

Rappelons que le signal capté par la diode réceptrice à travers le miroir sans tain couplé à la diode laser ne passe pas, contrairement aux idées reçues, de la transition On-Off, "allumé-éteint". Sur les plages lisses, le signal est réfléchi à 90 %, le reste étant perdu par diffraction, pertes dans le polycarbonate et au niveau de la couche réfléchissante. Sur les "bosses" (cuvettes vues du dessus), la réflexion optique vers le point de départ du spot laser n'est pas de 0 % ou de 10 %. Elle est comprise en fait entre 65 et 75 %. L'écart de luminosité entre les transitions "On-Off" tient en moyenne entre 76 et 90 %, soit des écarts de luminosité compris non pas entre le noir et le blanc, mais entre le clair et l'assez clair. Le principe fonctionne, mais on atteint les limites permises par le support en polycarbonate et par les couches réfléchissantes. La capture du "diagramme de l'œil" étant suivie de la détermination de deux seuils de décision situés, l'un à la partie

supérieure du signal composite, l'autre à sa partie inférieure pour la première étape de décodage, plus le signal est net, plus il est stable et plus la détermination de ces deux seuils sera précise. Le polycarbonate montre ici de sévères limites en termes de planéité et d'indice de réfraction inférieurs à ceux du verre.

Le taux d'erreurs par blocs sur les supports CD-R

Le prix de plus en plus compétitif des disques CD-R (99 F les 20 pour les meilleurs affaires proposées récemment en grande surface), la concurrence, les tolérances variées des disques CD-R, des graveurs et lecteurs ainsi que l'utilisation abusive de circuits de correction ont eu pour conséquence de surestimer les performances des disques CD-R.

Le support CD-R emploie dans son sillon de guidage une matière colorée (cyanine, phtalocyanine, Azo) qui se déforme sous l'action du spot de gravure laser. Le tableau de la figure 4, réalisé par le Dr Hartke du laboratoire Media Science, contact internet : (www.msscience.com) montre les résultats obtenus à partir de trois lots A, B et C de 23, 12 et 6 échantillons de disques de qualité différente. Les résultats ont montré que seul le lot C a présenté un nombre d'erreurs acceptables, ce qui n'a pas été le cas du lot A, avec 10 disques corrects et 6 disques "passables" sur un total de 23 disques CD-R d'origine différente.

Jacques Lafosse, Jean-José Wanegue et Jean Hiraga.

Cet article a été réalisé sur les bases de la conférence du 15 septembre intitulée "Le problème du stockage des données numériques", salon Mondial Son & Image, par J.J. Wanegue (CD Maker) et J. Lafosse (Toolbox) ainsi que sur des articles de Jean Hiraga, en particulier celui paru en mai '91 dans le n° 148 de la NRDS.