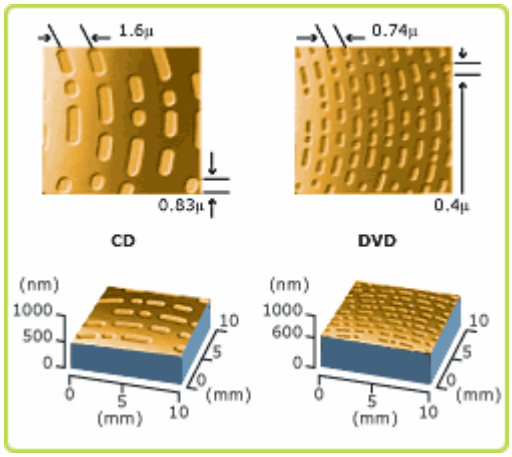
Christophe BONNEAU
Diplôme Professionnel Son 2ème Année
2003-2004

LA GRAVURE



Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

SOMMAIRE

INTRODUCTION ---------- 3

1 Généralités sur l'enregistrement numérique ---------- 4

1.1 Principes et avantages de la numérision ---------- 4
1.2 Pourquoi utiliser l'optique ? ---------- 5
1.3 Pourquoi le numérique ? ---------- 6

2 La gravure d'un CD ---------- 8

2.1 Codage du signal enregistré ---------- 8
2.2 Configuration du signal gravé ---------- 10
2.3 Structure du disque ---------- 10
2.4 Lecture de l'information ---------- 11
2.5 Asservissements ---------- 12
2.6 Déplacement de la tête de lecture / écriture ---------- 13
2.7 La tête de lecture / enregistrement ---------- 15
2.8 Les modes de gravure ---------- 16
2.9 Les normes de gravure ---------- 16

3 Les disques numériques optiques ---------- 16

3.1 Le CD-R ---------- 17
3.2 Le CD-RW ---------- 19
3.3 Le DVD ---------- 20

CONCLUSION ---------- 22

GLOSSAIRE ---------- 23
BIBLIOGRAPHIE ---------- 24

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

INTRODUCTION

L'ère du tout numérique a déjà débuté depuis plusieurs années maintenant, essentiellement avec la prise en compte de l'image photographique fixe ou animée, ou de l'image document (plans, documents administratifs). Pour cela, il a fallu résoudre techniquement et économiquement les problèmes de compression / décompression liés au volume énorme que génère un document numérisé et disposer de mémoires de masse amovibles de capacité suffisante. Celles-ci sont désormais disponibles sous forme de mémoires optiques numériques ou non, elles-mêmes liées aux possibilités offertes par les lasers.
Les mémoires optiques, telles que nous les concevons de nos jours, font toutes appel à un système électronique comme intermédiaire pour les lire. Par ailleurs, l'immense majorité d'entre elles sont rotatives et nécessitent donc une mécanique plus ou moins compliquée pour introduire le paramètre temps lors de la lecture ou l'écriture. Les impératifs de fabrication, ainsi que l'expérience industrielle des disques dans le domaine du son, ont amené les concepteurs et les industriels à s'orienter massivement vers le disque qui offre la particularité d'être simple à fabriquer. On a successivement développé quatre grandes catégories de disques :

- les vidéo-disques analogiques,
- les disques compacts audio et ROM (Read Only Memory),
- les disques optiques numériques inscriptibles puis réinscriptibles.

Cette technologie numérique de sauvegarde est aujourd'hui disponible dans le milieu dit «grand public» grâce à la chute des prix des graveurs de CD et de DVD ayant eu pour effet de démocratiser ce système.

Nous allons, dans une première partie, nous intéresser aux généralités concernant l'enregistrement numérique puis, dans une deuxième, nous allons analyser la lecture et la gravure d'un CD puis, finalement, voir différents types de disques opto-numériques.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

1 Généralités sur l'enregistrement numérique

Pour comprendre le fonctionnement d'un graveur de CD, il est au préalable nécessaire d'avoir quelques connaissances sur le numérique.

1.1 Principes et avantages de la numérisation

1.1.1 Principes

Un signal sonore peut être décrit en un point comme la valeur en ce point de la pression *p* de l'air en fonction du temps. Le spectre de ce signal est limité en fréquence par :

- l'absorption de l'air, dite absorption atmosphérique, dans lequel ne se propagent pas au-delà de quelques mètres des vibrations acoustiques de fréquences supérieures à la centaine de Hertz,
- la caractéristique de sensibilité de l'oreille humaine qui ne permet pas à un individu jeune d'entendre au-delà de 20 kHz.

Le théorème de Shannon[1] exprime la possibilité de représenter un signal continu dont le spectre s'étend de 0 à la fréquence f par une succession d'échantillons à cadence *2f*. Chacun de ces échantillons peut être quantifié et représenté par une valeur numérique.
Pour transmettre ou mémoriser un signal sous forme numérique, il y a donc lieu :

- de filtrer les composantes inaudibles du signal (f > 20 kHz),
- d'échantillonner le signal à une fréquence d'échantillonnage fixe égale à deux fois la fréquence maximale du signal,
- de numériser chaque échantillon suivant une loi adaptée (linéaire, logarithmique, différentielle, etc.) et avec la résolution désirée.

Pour restituer le signal analogique, il faut ensuite convertir les valeurs numériques en échantillons analogiques puis filtrer les composantes hautes fréquences liées à la forme de l'échantillon.

1.1.2 Avantages de la numérisation

Les avantages de la numérisation sont de deux ordres :

- adaptation de la dynamique du canal de transmission au signal à enregistrer : tout canal est caractérisé par une dynamique limite du signal par rapport au bruit propre du canal. Pour transmettre un signal à plus forte dynamique, il n'y a pas d'autre solution que d'augmenter la capacité du canal (nombre d'échantillons). En analogique, cette dynamique croît de manière linéaire (AM) ou quadratique (FM) avec la capacité ; en numérique, cette croissance est exponentielle,

- possibilité de retransmission quasi infinie : à chaque passage dans un système analogique, il y a dégradation irréversible du signal par superposition de bruit. Lors du passage dans un système numérique, les faibles dégradations sont restituées par identification à l'un des niveaux possibles à l'émission ; les plus fortes dégradations résultent en une erreur d'un échantillon. Ce type d'erreur peut être corrigée par la transmission simultanée d'informations redondantes ou « Code de Détection et Correction d'Erreur (CDCE)».

[1] Voir glossaire p. 23

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

L'avantage des techniques numériques ne réside donc pas tant dans la qualité que dans la constance de la qualité, telle qu'elle a été définie a priori par le codage à la source.
On peut aussi, dans un système analogique, choisir un format de haute qualité (pistes larges, vitesses élevées, etc.) mais certains défauts sont inéluctables : les fluctuations de vitesse, les bruits de fond et les diaphonies[2]. Même imperceptibles au départ, ces défauts se cumulent dans les traitements successifs et en particulier lors des recopies d'enregistrement.
Dans un système numérique au contraire, le signal est sans cesse régénéré et ne subit aucune dégradation par recopie. La régénération porte non seulement sur l'amplitude des échantillons mais aussi sur leur équipartition dans le temps grâce à une horloge fixe. Ce point est particulièrement important pour le signal audio, très sensible aux fluctuations de vitesse et donc sujet à la transposition tonale.

Un autre avantage du numérique est la possibilité de recherche et de localisation automatique des défauts, ce qui est très utile pour le contrôle des processus de duplication en série. En audiovisuel, aux défauts techniques s'ajoutent souvent des défauts de nature artistique, et il se pose la question du montage : remplacement d'un élément du signal par un autre. Les techniques numériques généralisent le montage électronique et le rendent facile d'utilisation en ajoutant un support visuel des échantillons (écran de station de montage ou d'ordinateur).
Si l'échantillonnage assure le respect de l'échelle des temps, il autorise aussi toutes les modifications et en particulier les retards. Cela permet de réaliser simplement certains types de filtrage ou des effets comme l'écho cela par simple addition de chiffres binaires.

1.1.3 Inconvénients de la numérisation

Les opérations de numérisation, correction d'erreurs, restitution, sont coûteuses en terme d'électronique. Elles exigent une électronique rapide et des vitesses de défilement élevées, avec des pistes très étroites. Toutefois la décroissance des coûts est plus rapide pour les composants numériques que pour les éléments mécaniques d'un système analogique.
Mais l'un des inconvénients majeurs est le besoin sans cesse constant d'adapter les supports de stockage aux quantités énormes d'informations à stocker.

L'électronique numérique, issue de l'informatique, s'est fortement démocratisée, aussi bien du point de vue de la compétence technologique que du point de vue des prix. C'est pourquoi l'enregistrement numérique est devenu de plus en plus compétitif par rapport aux techniques analogiques à la fois pour le coût des équipements et celui des supports d'enregistrement.

1.2 Pourquoi utiliser l'optique ?

Le stockage d'informations sur un média effaçable a d'abord pris la voie du support magnétique. Technologie bien connue dans le secteur du son et de l'image vidéo, elle s'est naturellement imposée aux fabricants de médias qui y ont essentiellement vu l'intérêt de pouvoir écrire, effacer et réécrire des informations dont la durée de stockage doit dépasser celle de mise sous tension d'une mémoire vive (RAM). Ce mode de stockage connaît des limites du fait que, pour des raisons qui tiennent au rendement énergétique des têtes d'écriture et de lecture, l'entrefer[3] a la forme

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

d'une fente rectangulaire dont la longueur ne peut guère être réduite au-dessous d'une quinzaine de micromètres.
Si l'on ajoute à cela le fait que ces têtes ne peuvent opérer en contact direct avec le film magnétique (ce qui conduit à prendre en compte une forme divergente du champ magnétique), la largeur effective des bits enregistrés est sensiblement supérieure à celle de l'entrefer. De telle sorte que, même avec des hauteurs de vol de seulement 0.3 µm, et des entrefers réduits à quelques dixièmes de micromètre, la largeur minimale de l'empreinte magnétique sur le film d'oxyde est voisine, elle aussi, du micromètre (pour une longueur de 30 µm au moins).
L'optique, elle, permet des géométries beaucoup plus fines : l'acuité nominale d'un dispositif de lecture optique (stylet optique) est en effet égale au diamètre de la tache de diffraction de l'objectif utilisé à cette fin. Elle est donc voisine, en pratique, de la longueur d'onde de la radiation utilisée (par exemple, inférieure au micromètre).
Cette approche est par ailleurs associée à l'apparition du laser : comme nous le verrons, l'obtention d'une puissance lumineuse suffisante au niveau de la tache de diffraction, conduit à disposer d'une source cohérente[4] de rayonnement, c'est à dire d'un laser. Ainsi dans l'état actuel de la technologie, la dimension du point élémentaire est-elle inférieure au micromètre, ordre de grandeur à comparer aux 30 à 50 µm des meilleures technologies magnétiques classiques.
L'optique permet par ailleurs un tracking[5] de la piste inaccessible aux seuls ajustements mécaniques du support. Dès lors que la largeur de la piste est inférieure à une centaine de micromètres, la seule précision mécanique de centrage d'un disque amovible ne permet plus de satisfaire aux exigences de positionnement de la tête de lecture le long de la piste en défilement. Un asservissement radial devient donc indispensable, réalisable par l'action d'un miroir galvanométrique[6] sur un pinceau de lumière, c'est à dire beaucoup plus simplement que le déplacement d'une tête magnétique, même miniaturisée. Cela explique les très hautes performances du stockage optique en matière de densité.
Un autre avantage de l'optique est lié à la distance à laquelle se trouve la tête optique par rapport au média. Sur un média magnétique, la champ magnétique en sortie de l'entrefer a tendance à s'élargir ce qui exige d'être aussi proche que possible du média avec les risques « d'atterrissage » de têtes que cela comporte. Sur un média optique il y a, au contraire, focalisation des rayons lumineux, ce qui permet de placer la tête de lecture à bonne distance de la surface du disque, évitant ainsi tout risque de détérioration par contact de la tête.

1.3 Pourquoi le numérique ?

L'ensemble des mémoires optiques n'est pas numérique. Le vidéodisque en particulier est analogique : ce choix technique s'explique aisément par des considérations historiques, en particulier l'absence, dans les années 70, de technologies (algorithmes, circuits) de décompression suffisamment performants. Rappelons encore ses principaux avantages :

- la possibilité de dupliquer une source sans pertes flagrantes, ce qui n'est pas le cas de l'analogique en raison du bruit qui affecte chaque report,

- la possibilité de manipuler l'information source sous sa forme la plus fine, c'est à dire au niveau du bit (qui est en quelque sorte un moyen de mesure de la résolution de l'information),

- la possibilité de transporter l'information à n'importe quelle vitesse, grâce à un modem classique (ce qui prend du temps) ou haut-débit (ADSL), jusqu'aux réseaux

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

optiques ultrarapides qui transporteront le contenu d'un disque compact en une poignée de secondes,

- le fait, enfin d'être formidablement normalisateur.

Mais le numérique avait un prix élevé par rapport à l'analogique, ce qui explique que de nombreux concepteurs aient longtemps répugné à adopter cette technique, en particulier au niveau de l'image.
Imaginons en effet que l'on veuille numériser un signal, par exemple un son, dont le spectre s'étend jusqu'à 16 kHz[7]. Conformément au théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage doit être d'au moins 32 kHz. Si l'on désire, en outre, que le bruit de quantification soit inférieur à 60 dB[8], il est nécessaire d'affecter à chaque échantillon un mot de 10 bit (avec 10 bit, il est possible de définir 2^{10} = 1024 niveaux et en décibels 20log1024 = 60.20). Ainsi le débit du canal de transmission correspondant atteint alors 320 kBits / seconde, nécessitant une bande passante de 160 kHz, égale à dix fois la bande initiale en analogique. Ce facteur 10 constitue un bon ordre de grandeur du coût à payer pour la numérisation d'un signal.
Et encore, le calcul précédent ne concerne qu'un signal monophonique. Avec les mêmes hypothèses, la prise en compte d'un signal stéréophonique conduirait à disposer d'une bande passante de 320 kHz.

De telles grandeurs dépassent d'un facteur 3 à 4 les possibilités maximales d'un tourne-disque conventionnel, mais semblaient accessibles aux technologies optiques. Les chercheurs se sont donc penchés sur les travaux menés dans le cadre du vidéodisque qui est capable de délivrer jusqu'à 8 MBit / s, en se limitant dans un premier temps au son. Or, dans le domaine du son, une bande passante rigoureusement plate de 20 à 20000 Hz, associée à un rapport signal / bruit de 90 dB constitue une optique raisonnable, surtout si l'on regarde les caractéristiques de l'oreille humaine ainsi que celles des autres maillons de la chaîne électroacoustique. Ces performances sont obtenues avec une fréquence d'échantillonnage de 44.1 kHz et des *mots* de 16 bit. Elles conduisent à un débit de 0.707 MBit / s par canal, soit 1.41 MBit / s pour un programme en stéréophonie.
Le vidéodisque *Laservision* du constructeur Philips étant capable de délivrer jusqu'à 8 MBit / s, il reste au concepteur d'un audiodisque optique numérique ou d'un disque optique numérique destiné au stockage des données une marge confortable pour associer aux bits audio proprement dits :

- des bits de correction d'erreur,
- des bits de synchronisation,
- des bits de contrôle et d'information (titre de la plage lue, temps écoulé...), etc.

Le même raisonnement a prévalu au niveau des disques optiques numériques inscriptibles et réinscriptibles. La disponibilité de tels débits ouvrant des voies intéressantes au stockage des données, c'est donc à partir du *Laservision* que les travaux se sont développés pour aboutir à une gamme complète de mémoires optiques. Il est intéressant de souligner que la vidéo numérique d'aujourd'hui s'appuie sur le débit du CD audio (environ 176 ko / s) et que les progrès ont été faits en amont et en aval au niveau de la compression / décompression des images, sans remettre en question les principales grandeurs liées au vidéodisque.

Ces différents disques, mémoires optiques, seront vu en dernière partie. Après ces généralités, intéressons nous maintenant au procédé même de la gravure d'un disque optique numérique, ou CD.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

2 La gravure d'un CD

2.1 Codage du signal enregistré

2.1.1 Echantillonnage

La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 44.1 kHz. D'après la loi de Shannon, et compte tenu du fait que la plage d'audition humaine ne dépasse pas 20 kHz, la fréquence d'échantillonnage doit être égale ou supérieure à 40 kHz. Le choix de 44.1 kHz est le simple produit de l'histoire : les premiers enregistreurs numériques ont été développés à partir de magnétoscopes professionnels, qui eux-mêmes étaient calés sur les fréquences vidéo du NTSC (*National Television System Committe*) ; 44100 Hz = 25 x 2 x 294 x 3. Avec 25 images par seconde, 2 trames (1 paire et 1 impaire) pour faire une image, 294 lignes pour faire un image sur un écran et 3 échantillons par ligne.
La quantification, elle, a été fixée à 16 bit par canal, ce qui est un bon compromis entre la meilleure finesse possible, qui pousse la quantification vers le haut (rien n'empêchait de choisir 24 bit), la place disponible (mais on aurait pu agrandir le disque), et le coût des convertisseurs numérique / analogique.
De ces deux paramètres (fréquence et quantification), on en déduit le débit utile, 176.4 ko / s (44100 x (16 / 2)), auquel il faut ajouter les informations de redondance et de modulation pour obtenir le volume d'informations binaires stockées par seconde de musique.

2.1.2 Correction des erreurs

Il est hors de question de stocker tel quel le flux de bits en sortie de numérisation, en raison des nombreux risques d'erreur (poussières, traces, rayures, problèmes de gravure, problèmes d'asservissement), susceptibles d'intervenir à ce niveau de précision.
La qualité de restitution du signal sur un CD est en effet liée à la mise en œuvre de codes détecteurs et correcteurs d'erreurs performants auxquels on ajoutera un code de gestion des blocs d'information de synchronisation, l'ensemble étant choisi de manière à obtenir un multiple de 8, c'est à dire adapté aux processeurs 8 bit de l'époque.
Sur un CD, la probabilité d'erreur liée à la gravure et autres perturbations d'asservissement, de lecture, etc., conduit à un taux d'erreur de 10^{-5} soit 14 erreurs en moyenne pour une seconde de données, ce qui est évidemment inacceptable. La question qui se pose est d'identifier la longueur de « rafale d'erreurs » ou « Burst » jugée acceptable, tout en prenant en compte les inévitables erreurs aléatoires. Des considérations d'expansion (par exemple le taux de bits redondants par rapport aux bits utiles) ont conduit à choisir deux codes Reed Solomon croisés, associés à un entrelacement des paquets individuels de bits (trame), d'où le nom de CIRC (Cross Interleaved Reed Solomon Code) associé à ce détecteur / correcteur d'erreurs. Un des codes Reed Solomon est plus particulièrement chargé de corriger les erreurs aléatoires (1 ou 2 octets susceptibles d'apparaître n'importe où et n'importe quand), l'autre étant chargé de redresser les rafales d'erreurs, liées à une rayure par exemple.
La succession des traitements s'effectue comme suit :

- les données sont traitées par paquets (baptisés *trames*) de 6 échantillons, soit 192 bit ou 24 octets,
- le premier code Reed Solomon introduit 4 octets supplémentaires, la trame pèse alors 28 octets,
- un entrelacement entre 108 trames est réalisé,

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

- le second code Reed Solomon est alors mis en œuvre : 4 octets supplémentaires sont ajoutés, la trame pèse 32 octets,
- un traitement supplémentaire de changement de parité, qui n'affecte pas le nombre d'octets, est enfin réalisé.

Le signal résultant (32 octets) est ensuite modulé par la technique EFM justifiée au paragraphe 2.1.4.
La redondance introduite est donc de 33% par rapport aux données utiles (8 octets supplémentaires pour 24 octets utiles), ce qui est un bon compromis.

2.1.3 Gestion des trames

La gestion des trames fait appel à un octet supplémentaire baptisé **Subcode**. Traditionnellement, chaque bit de cet octet est désigné par une lettre de **P** à **W**. Les deux premiers bits, P et Q, sont utilisés pour identifier la trame elle-même sur le disque, les autres (R à W) étant disponibles pour d'autres fonctions qui, faute de normalisation, n'ont jamais été véritablement utilisées.

2.1.4 Modulation

Une autre caractéristique du CD a trait au transfert de la modulation numérique issue du CIRC sur une autre configuration binaire, mieux adaptée qu'un codage direct au processus de lecture des disques optiques. Le signal détecté étant lié, en effet, moins à la présence ou à l'absence d'une microcuvette qu'au passage sous le stylet optique de ses fronts, avant ou arrière, les ingénieurs de chez Philips ont choisi de n'accorder de signification binaire (notée 1) qu'à ces seules transitions.
Dans ces conditions, il aurait été difficile de distinguer à coup sûr deux « 1 » successifs qui ne seraient pas confirmés par la présence d'au moins un « 0 ». Le choix s'est donc porté sur un code à 14 bit qui autorise 16384 combinaisons (2^{14}). En choisissant parmi les combinaisons de bits celles qui se traduisent au moins par un « 0 » de part et d'autre d'un « 1 » (le motif minimal est donc 010, y compris lors de la succession de deux mots), on obtient un code suffisamment solide.
C'est là l'origine de l'allure un peu particulière de la gravure d'un CD, qui traduit la présence de « 1 » relativement rares, isolés entre des paquets de « 0 » (voir figure 1 ci-dessous).

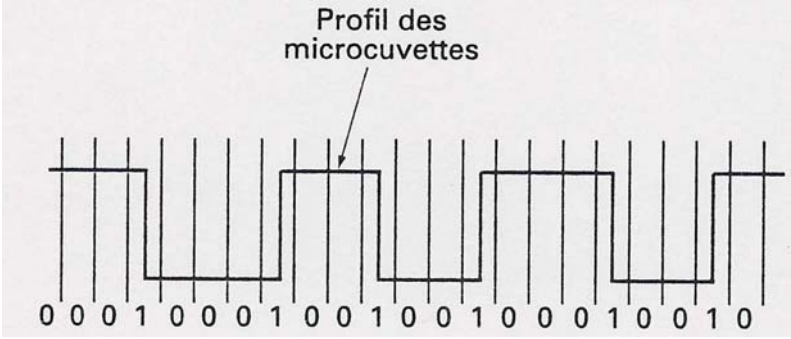


Figure 1 - Codage du disque compact

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

Ajoutons encore que, pour éviter la présence de deux « 1 » consécutifs relatifs, le premier à la fin d'un mot de 14 bit, le second au début du mot suivant, 3 bit de séparation sont ajoutés à chacun de ces mots, ce qui conduit à 17 bit au total pour 8 bit significatifs.
Notons que ce séparateur s'applique également entre trames de 588 bit ainsi qu'entre le subcode et les 3 octets de synchronisation, ce qui conduit à 33 séparateurs par trame.

2.1.5 Synchronisation des trames

A ces 33 octets (32 d'information codée, 1 de subcode) sont ajoutés 24 bit de synchronisation permettant un adressage en heure, minute, seconde, ce qui conduit à un paquet de 588 bit significatifs également appelé trame (voir la figure 2).

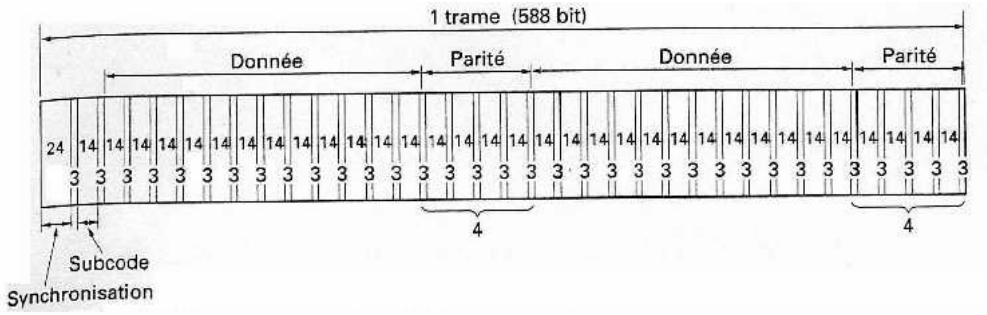


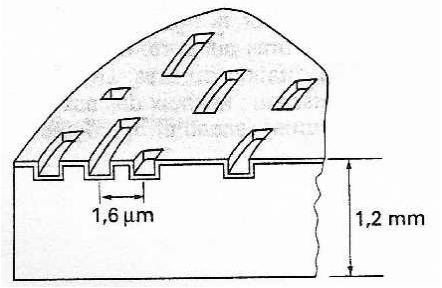
Figure 2 - Organisation d'une trame

2.2 Configuration du signal gravé

La configuration du signal gravé est très similaire à celle d'un vidéodisque optique, c'est à dire une succession de microcuvettes de longueur variable. Mais contrairement au vidéodisque pour lequel la longueur de la cuvette est représentative du caractère analogique du signal, le CD est bien un média à stockage numérique. Ce qui est détecté comme ayant une valeur de « 1 » est le passage à la frontière microcuvette - plan. La longueur d'une microcuvette ou de la zone plane entre deux microcuvettes ne délivre qu'une information quantitative en termes de nombre de valeurs « 0 » successives lié à la modulation EFM et aux bits de séparation. Il n'y a d'ailleurs, compte tenu du système de modulation, que 9 longueurs possibles de microcuvettes.

2.3 Structure du disque

Les spécifications dimensionnelles du CD sont montrées Fig.3 :



Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

Figure 3 - Caractéristiques géométriques d'un CD

Le signal est enregistré le long d'une spirale de 1.6 µm, soit une densité de 625 spires par millimètre. La partie gravée du disque comporte environ 20000 spires qui totalisent environ 5 km. La rotation, vue du laser de lecture, s'effectue en sens contraire des aiguilles d'une montre (vue de dessus, c'est à dire de l'étiquette, elle est donc dans le sens horaire) et l'information est lue et gravée de l'intérieur du disque vers l'extérieur, contrairement aux vinyles.
L'épaisseur d'un disque a été fixé à 1.2 mm qui correspond à trois couches pour les CD conventionnels vendus dans le commerce (voir Fig. 4) :

- une **couche protectrice**, le plus souvent en polycarbonate (PC) mais qui peut être en résine acrylique ou en PVC (polychlorure de vinyle), et qui représente l'essentiel de l'épaisseur du disque,

- une **couche réfléchissante** (vis-à-vis de la longueur d'onde du laser, ce qui n'impose pas une réflectivité dans le visible), par exemple en aluminium déposée par vaporisation afin d'obtenir un dépôt ne dépassant pas 0.1 µm,

- un **substrat** réalisé en résine haute résistance et qui recouvre, sur sa face externe, l'étiquette (appelée sérigraphie par abus de langage).

Nous verrons en dernière partie d'autres types de disques ayant une composition différente.

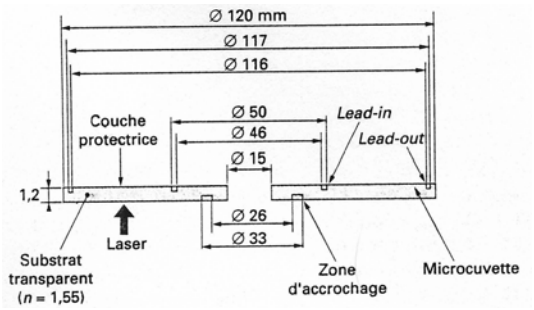


Figure 4 - Vue en coupe d'un CD

2.4 Lecture de l'information

La lecture de l'information est faite en détectant simplement le niveau du signal, soit en retour d'une zone plane, soit en retour du fond de la microcuvette. Sur un CD, la profondeur de celle-ci est de 0.1 µm. Cette dimension a été choisie après un raisonnement assez simple.
La meilleure différence de signal est en effet obtenue lorsque la différence de phase entre les rayons lumineux en retour du fond de la cuvette et en retour de la partie plane est égale à π. Pour une longueur d'onde λ cela revient à définir une cuvette de profondeur $\lambda / 4$, soit pour un laser de 0.78 µm une profondeur de 0.195 µm.
La microcuvette se trouvant sous une couche protectrice en polycarbonate d'indice de réfraction 1.5, la profondeur nécessaire devient 0.195 / 1.5 = 0.13 µm. Des considérations sur l'asservissement ont amené à choisir une profondeur un peu plus faible que 0.1 µm, ce qui permet, par ailleurs, une tolérance sur la longueur d'onde du laser utilisé.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

2.5 Asservissements

Les conditions de fabrication et d'utilisation d'un CD conduisent à certaines approximations.

2.5.1 Tracking

Les lecteurs / graveurs de CD font appel à deux procédés de déplacement de la tête de lecture (voir la figure 5) :

- radialement par rapport à l'axe de rotation du disque (fig. 5a),
- autour d'un axe de rotation qui lui est propre (fig.5b).

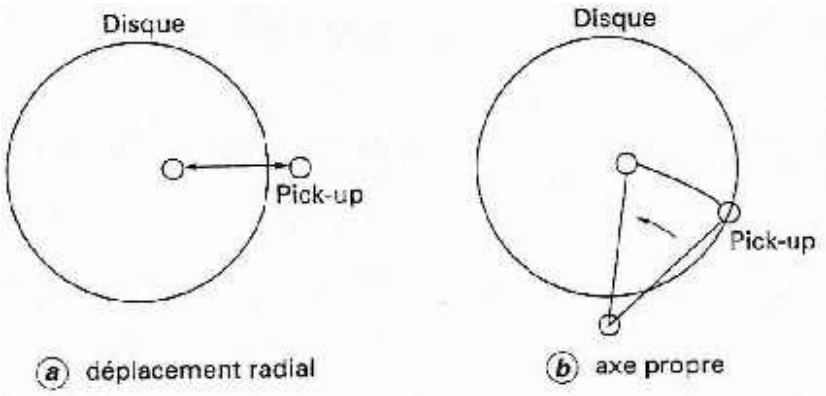


Figure 5 - Déplacement de la tête de lecture

Le second montage a l'avantage de simplifier le servomécanisme.
Le tracking de la spirale doit être assuré à plus ou moins 70 µm. Cette valeur a été fixée au vu de considérations concernant la production de disques et la tolérance mécanique des systèmes de centrage.

Les constructeurs ont développé de nombreux systèmes ; parmi ceux-ci, les plus connus sont les senseurs à trois faisceaux et le dispositif monofaisceau.
Le senseur à trois faisceaux a l'inconvénient de nécessiter la présence de deux faisceaux secondaires, obtenus au prix d'une optique un peu trop compliquée pour être produite dans de bonnes conditions économiques. Le senseur monofaisceau, lui, exploite la variation de la lumière réfléchie lorsque le faisceau s'écarte de la spirale. Le principe consiste à utiliser une photodiode capable d'analyser en deux sous-ensembles le faisceau réfléchi. Les variations de lumière, en fonction de la position du faisceau incident, sur chaque demi-photodiode permet de créer un asservissement.

2.5.2 Asservissement vertical

Les tolérances admises pour le CD en matière de déplacements verticaux de la tête de lecture sont de plus ou moins 0.5 mm. Sachant que la vitesse maximale de rotation du moteur (pour un lecteur de CD audio ; les lecteurs de CD-ROM à double et quadruple vitesse ne sont pas pris en compte

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

ici) correspondant à une fréquence de 8 Hz, on en déduit la tolérance en matière de profondeur de champ, plus ou moins 1.9 µm (ouverture numérique de 0.45 et laser 0.78 µm).

Il existe plusieurs méthodes d'asservissement. La plus connue est la méthode astigmatique[9] utilisant un senseur astigmatique vertical. Ce senseur est basé sur l'analyse de l'image du stylet optique sur le disque, observée au travers d'un système rendu astigmatique par l'introduction d'une optique cylindrique.
Une variante répandue est celle de Foucault[10]. Le montage optique est très voisin du senseur astigmatique. La différence réside essentiellement dans la forme circulaire des faisceaux après séparation. Les quatre photodiodes reçoivent alors une information lumineuse telle celle qui est expliquée par la figure 6.

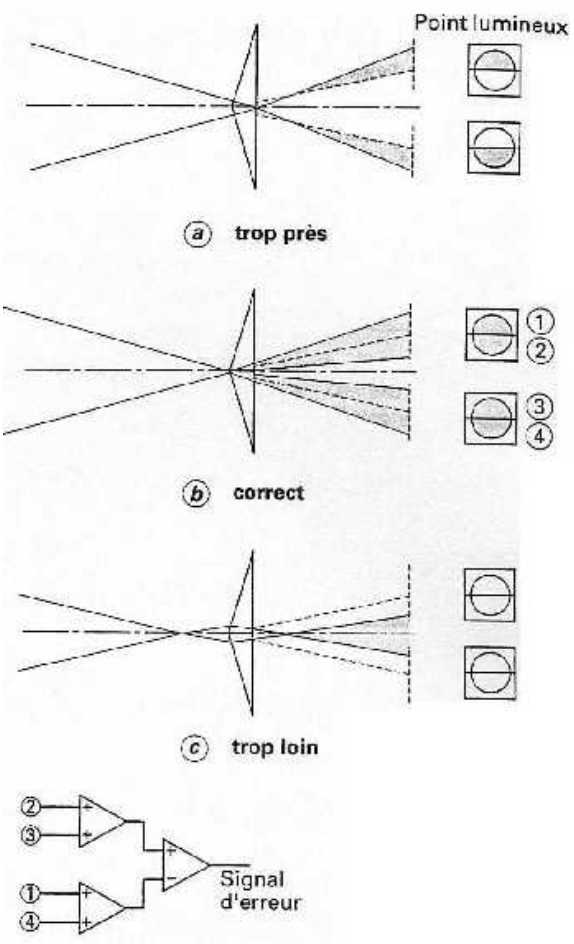


Figure 6 - Méthode de Foucault

2.6 Déplacement de la tête de lecture / écriture

Il existe essentiellement trois méthodes de déplacement de la tête de lecture / écriture. L'une fait appel à un axe de rotation spécifique pour un bras portant la tête de lecture. Les deux autres aboutissent à un déplacement radial de la tête.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

2.6.1 Axe propre

Le principe est illustré sur la figure 7. Le dispositif d'asservissement est monté sur le bras qui porte la tête de lecture et contrôle uniquement l'angle de rotation du bras. Le montage impose de ne travailler qu'avec un faisceau ; le choix des asservissements se porte donc sur un tracking monofaisceau et une détection par la méthode de Foucault.

Ce type de méthode est bien adapté aux lecteurs / enregistreurs de CD-ROM, car l'ensemble peut être déplacé en une seule manœuvre. La rapidité peut être améliorée en transférant vers l'ordinateur toute l'information concernant la table d'allocation des fichiers.

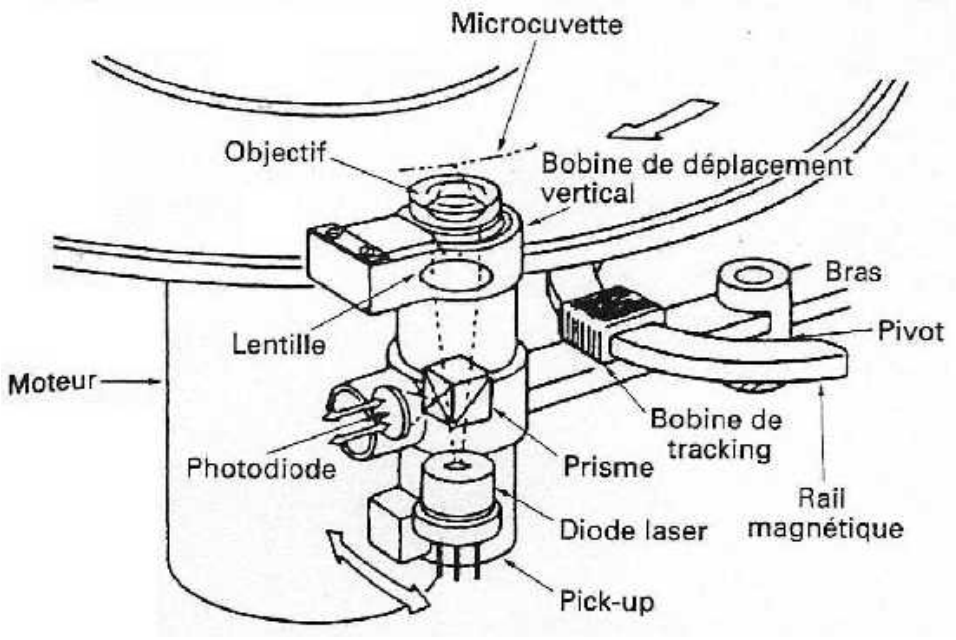
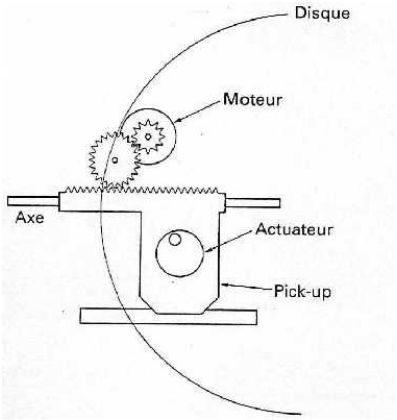


Figure 7 - Axe de rotation propre

2.6.2 Moteur mécanique

Le dispositif, illustré par la figure 8, a l'avantage d'être très économique sur le plan industriel. Il est donc utilisé dans les lecteurs bas de gamme. L'inconvénient majeur est la lenteur de déplacement de la tête, ce qui limite ces dispositifs aux seuls lecteurs de CD audio.



Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

Figure 8 - Moteur mécanique

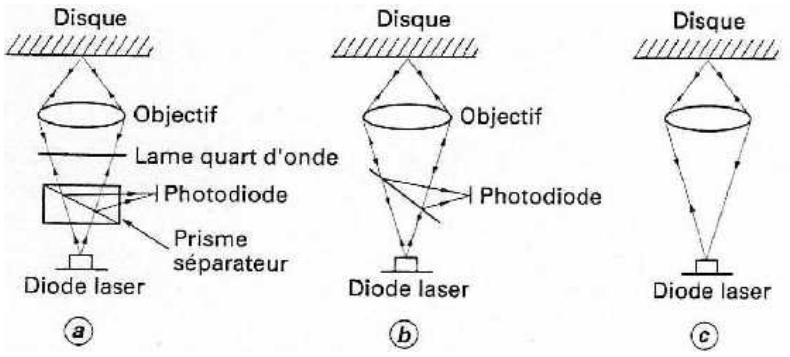
2.6.3 Moteur linéaire

Le dispositif à base de moteur linéaire est utilisé dans les lecteurs / enregistreurs nécessitant un temps d'accès le meilleur possible, en particulier pour les CD-ROM. Le dispositif fait appel à des paliers magnétiques, donc sans contact physique.

2.7 La tête de lecture / enregistrement

La tête de lecture des lecteurs CD a bénéficié des travaux menés sur le vidéodisque et a évolué vers davantage de simplicité.
Le montage ***a*** a surtout été utilisé pour les vidéodisques, tandis que le montage ***b*** se retrouve également sur les lecteurs de disques compact (voir figure 9). Le montage ***c*** est le plus récent : la lumière retourne vers la diode émettrice. Ce montage est connu sous le nom de **SCOOP** (*Self Coupled Optical Pickup*) est associé à deux méthodes de détection, suivant que l'on détecte la lumière émise de l'autre côté de la diode (**L-SCOOP**) ou les variations de tension sur la diode (montage **E-SCOOP**). L'intérêt principal de ces systèmes est la simplicité de fabrication industrielle, donc la diminution du prix de revient des lecteurs.

Figure 9 - Principaux dispositifs optiques de lecture de CD



Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

2.8 Les modes de gravure

Il existe plusieurs modes de gravures en fonction du disque à copier.
Voici les principaux modes facilement sélectionnables par l'utilisateur.

- **Monosession** : peu utilisé pour la gravure, ce mode ne permet pas de rajouter des données une fois le disque gravé. Si l'on utilise que 400 Mo sur un disque en contenant 700, le reste est perdu.
- **Multisession** : ce mode permet de graver un disque en plusieurs fois.

- **Track at once** : ce mode de gravure permet de faire une pause de 2 secondes entre les pistes d'un disque audio.
- **Disk at once** : l'inverse du précédent, permet de ne pas créer de pause entre plusieurs pistes d'un disque audio.
- **Photo-CD** : grave plusieurs sessions au format Kodak photo-CD pour sauvegarder des photos numériques.
- **CD-DA** : disque au format audio pouvant être lu par une chaîne hi-fi.
- **Vidéo CD** : standard vidéo permettant de mettre de la vidéo et du son sur un CD. Ces données sont compressées.
- **CD Extra** : CD contenant une partie audio et des données informatiques.

2.9 Les normes de gravure

Pour que le support gravé soit compatible avec les divers lecteurs du marché, les différents formats de CD obéissent à des normes. Les CD répondent à une norme de contenu (son, image, données) et une norme de contenant (le format du disque et ses principes chimiques, optiques et physiques). Toutes ces normes sont consignées dans des livres signalés par des couleurs. Ce sont les standards établis par les inventeurs des CD. En voici la liste .

- Le **Red book** : première norme pour le CD. Elle définit le mode de gravure pour les disques audio.
- Le **Yellow book** : c'est la norme définissant le CD-ROM.
- Le **Green book** : c'est un format propriété de Philips. Très proche du Yellow book, ce format est destiné au CDI (Compact Disk Interactive).
- L'**Orange book** : c'est le format qui permet de graver des CD-R (CD-Recordable).
- Le **White book** : norme permettant de graver des vidéo CD.
- Le **Blue book** : destinée au CD extra, cette norme permet de graver et regrouper un CD audio et un CD-ROM sur deux sessions.

3 Les disques numériques optiques

Dans cette partie, nous allons voir les disques que nous utilisons au quotidien pour la grande majorité d'entre nous.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

3.1 Le CD-R

Le CD-R ou WORM (Write Once Read Many Times) est un disque inscriptible. Ce disque est né des efforts de recherche des industriels de l'informatique désireux de disposer d'une mémoire amovible rotative à l'image de la disquette, c'est à dire réinscriptible. Face aux difficultés posées par cet objectif et à l'émergence croissante des besoins en archivage numérique, la recherche s'est orientée vers le développement de disques susceptibles d'être enregistrés de manière irréversible par l'utilisateur.
En termes de débit et de temps d'accès, les disques inscriptibles (et réinscriptibles) cherchent à atteindre le maximum des possibilités techniques. Dans la pratique, la plupart des disques optiques offrent des débits relativement faibles (< 1 Mo / s) en raison des contraintes d'écriture, ce qui limite le débit de lecture (on lit généralement à la même vitesse, ou à une vitesse inférieure, ce que l'on a préalablement écrit, voir les vitesses du graveur en Annexe p. 31).

3.1.1 Composant d'un CDR

Le CDR est un disque de 120 mm de diamètre et de 1.2 mm d'épaisseur en polycarbonate.
Le disque est recouvert par du **colorant organique** (*dye*). La fonction du colorant est de conserver les informations. Il se décompose sous l'effet du rayon laser du graveur qui génère de la chaleur (à 780-790 nanomètres de longueur d'onde). Le colorant noircit sous l'effet du rayon laser (création de l'information). Le colorant peut-être la phtalocyanine de couleur or (bonne qualité), la cyanine de couleur verte (qualité variable) ou bien le metal Azo de couleur bleu (durée de vie limitée).
Le CDR possède une couche réflective en Or. Elle permet de réfléchir le rayon laser qui va lire le CD. Pour des raisons économiques, l'argent a peu à peu remplacé l'or, afin de diminuer les coûts du produit final, et augmenter la réflectivité. Néanmoins, la durée de vie est moins importante pour un CD-R possédant une couche argent qu'une couche or.
Une couche de laque est aussi appliquée sur l'or et déborde aux extrémités du disque. Elle empêche le colorant de peler et de se détériorer avec l'humidité. Cette laque est également recouverte d'une couche de protection haute résistance afin de rendre le support insensible aux rayures.
Une étiquette (sérigraphie) peut être appliquée pour spécifier le fabricant, le type de produit, ...

3.1.2 Ecriture

Les CDR utilisent deux niveaux de puissance du laser pour réaliser soit l'écriture (énergie relativement élevée), soit la lecture. La puissance de lecture doit être choisie de telle manière qu'elle ne perturbe pas les qualités optiques du signal gravé.
Il existe différents procédés de gravure de l'information, suivant qu'il y a ou non enlèvement de matière. Mais dans tous les cas le principe consiste à utiliser un faisceau laser puissant pour écrire, et un faisceau plus faible pour lire l'information. L'écriture du signal à enregistrer est effectuée par un processus thermique, résultant de l'absorption d'un fin pinceau de lumière, jouant le rôle de *burin optique*, par un film photosensible. Lors de la phase d'écriture, le graveur identifie le fabricant du CD-R et adapte la puissance du laser suivant la qualité du CD-R tout au long de l'écriture. Lorsque le laser grave le CD-R, il y a lecture en même temps.
On distingue trois mode d'écriture : l'**écriture par ablation**, par **déformation** et par **changement d'état**.

Dans le premier cas, l'énergie fournie par le burin optique est utilisée pour vaporiser l'élément de matière thermosensible situé au point d'impact comme on peut le voir figure 10.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

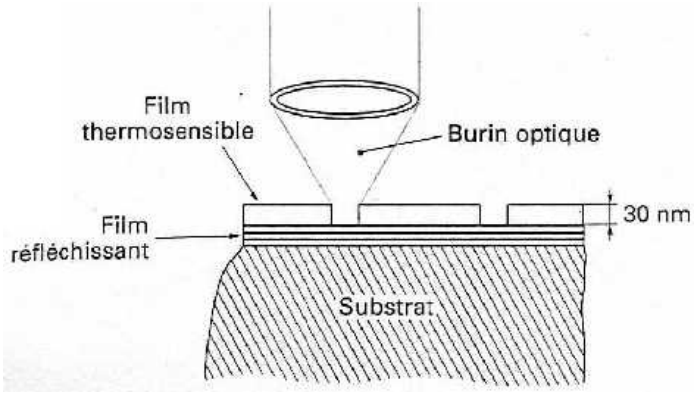


Figure 10 - Ecriture par ablation

Dans le cas de l'écriture par déformation, la chaleur dégagée par l'impact des photons d'écriture est utilisée pour décomposer un film plastique thermodégradable. Il se produit alors un dégagement de microbulles qui provoque l'apparition d'une micro-bosse haute de 0.3 µm environ comme le montre la figure 11.

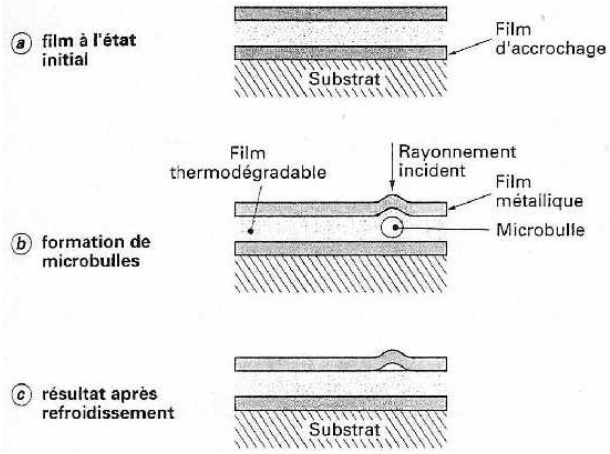
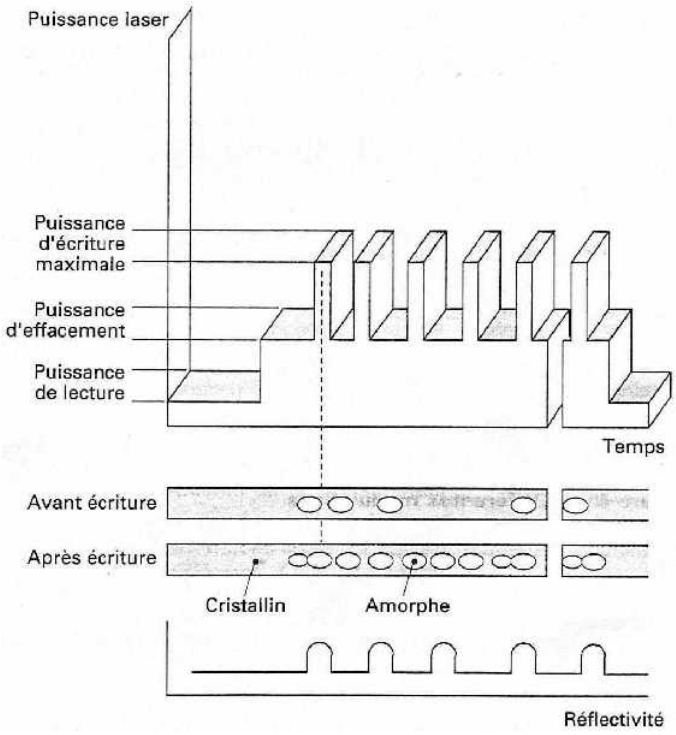


Figure 11 - Ecriture par déformation

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

Pour ce qui est de l'écriture par changement d'état, on utilise une couche sensible formée par un film mince de 0.05 µm d'épaisseur. Ici l'apport de l'impulsion de chaleur porte un court instant la région de l'impact très légèrement au-dessous de la température de fusion. Après quoi, le volume concerné de ce film retourne à l'état solide qui lui est imposé par la température du substrat. Le laser de lecture peut ensuite discerner les zones amorphes des zones dont l'état a changé car leur réflectivité diffère. Ce procédé est décrit figure 12.

Figure 12 - Ecriture par changement d'état d'un CDR



3.1.3 Composition d'un CDR

Le disque compact *Recordable* est divisé en trois parties principales :

- le **Lead in** qui est une partie située au début du disque et sur laquelle sera enregistrée la « table des matières » ou TOC (*Table Of Content*). La TOC contient la liste des « endroits » du disque où les morceaux débutent. Cette aire est gravée lors de la fin de la session et prend 9 Mb soit une minute,
- le **Program area** qui représente la partie du disque où les informations de l'utilisateur sont stockées,
- le **Lead out** qui est une zone tampon ne contenant aucune donnée et qui suit le dernier morceau du disque.

3.2 Le CD-RW

Le CD-RW (*ReWritable*) est un disque optique réinscriptible. On distingue deux procédés permettant d'assurer la réinscriptibilité : soit le changement d'état introduit dans le cadre du CDR, soit le procédé magnéto-optique, c'est à dire l'action d'un laser pour modifier un état magnétique sur un substrat.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

Les systèmes réinscriptibles, comme les CDR, utilisent deux niveaux de puissance du laser pour réaliser soit l'écriture (énergie relativement élevée), soit la lecture. Il est toutefois nécessaire de procéder à un effacement avant la réécriture du média par l'action d'un faisceau laser de puissance intermédiaire.
A l'écriture, le changement d'état du film magnétique utilisé est provoqué par élévation de la température du film au point d'impact. Le refroidissement qui s'en suit provoque la polarisation de la région dans telle direction arbitrairement choisie, et définit ainsi 1 bit d'information.
La lecture a ensuite lieu par observation de la rotation de la polarisation de la lumière réfléchie par le matériau aimanté.
Les disques effaçables à volonté (ou presque) répondent à un besoin clairement identifié en informatique : disposer d'un substitut haute capacité à la disquette et au disque dur dans les meilleurs conditions économiques.
Le RW pourrait donc être la disquette 700 Mbit du futur proche.

3.3 Le DVD

Depuis ces deux dernières années c'est la révolution en matière de support de grande capacité. Il ouvre de nouvelles voies en matière de stockage comme l'a fait le CD une vingtaine d'années plus tôt.
C'est d'abord dans le domaine de la vidéo que le DVD a percé. En effet, ses atouts sont incontestables : image numérique d'une définition horizontale de 500 lignes (contre 425 pour le LaserDisc et 240 pour la VHS), canaux de son multiples (stéréo, avec effet surround et diffusion sur cinq canaux), 32 sous-titres, 8 pistes sonores, neuf angles de caméra, capacité de stockage extraordinaire (de 4.7 à plus de 18 Go de données, soit jusqu'à 8 heures de vidéo), menus interactifs, etc. Que des qualités pour un média par ailleurs sévèrement protégé à sa naissance, tant contre la copie, que du point de vue de son exploitation géographique dans le monde.
Mais s'il a été baptisé *Digital Versatile Disc*, c'est d'abord parce que le DVD est polymorphe. A côté du DVD vidéo (pour le cinéma), du DVD-ROM (équivalent au CD-ROM), et du DVD-R (*Recordable*), le DVD peut aussi ne contenir que du son (DVD audio), mais de bien meilleure qualité que le CD audio actuel. La fréquence d'échantillonnage du DVD audio est en effet de 96 kHz, contre 44.1 pour le CD audio.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

3.3.1 La technologie DVD

Les DVD peuvent comporter plusieurs couches par face et être gravés sur une ou deux faces. Il existe donc quatre types de DVD. Sa grande capacité vient de la technologie employée pour la gravure. Les « cuvettes » gravées sont plus petites que sur un CD et sont également beaucoup plus rapprochées. Nous avons donc une densité d'informations plus grande mais avec une surface égale comme on peut le voir à la figure 13.

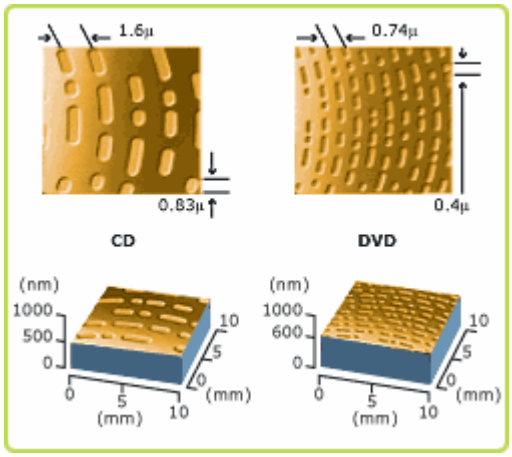


Figure 13 - Comparaison entre le CD et le DVD

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

CONCLUSION

Nous avons vu à travers ces trois parties que le graveur de CD était un dispositif plutôt complexe, fruit de l'évolution de la technique. Le graveur utilise un laser pour graver des données numériques, et ce laser permet à la fois la lecture et l'écriture de l'information en utilisant diverses lois de la physique et des asservissements. Pour que le media gravé soit lisible dans les différentes machines disponibles sur le marché, le graveur obéit à un codage de l'information propre à chaque support et à des normes précises établies par les constructeurs. Le graveur est donc un outil de stockage qui sert surtout l'image et le son au travers des différents formats de CD et de DVD qui coexistent à la vente.
L'innovation la plus importante est sans nul doute l'utilisation du disque magnéto-optique (CD-RW et DVD-RW) effaçable et réenregistrable à volonté. Mais si l'on peut formuler un souhait, c'est que les normes actuelles et les normes prévisibles à court terme soient autant que possible complémentaires et compatibles pour qu'elles puissent conduire à un support et un format numérique unifié et universel (multimédia), commun à l'ensemble des domaines de l'audiovisuel et de l'informatique.
On pourra également remarquer l'engouement spectaculaire pour les graveurs et les polémiques que son utilisation soulève en termes de copies illicites plus que licites.

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

GLOSSAI RE

-SHANNON[1] : mathématicien américain né en 1916 dans le Michigan.

-Diaphonie[2] : interférence parasite de signaux provenant de deux zones d'un même enregistrement.

-Entrefer[3] : partie d'un circuit magnétique où le flux d'induction ne circule pas dans le fer.

-Source cohérente[4] : source dont les émissions présentent entre elles une différence de phase constante.

-Tracking[5] : action pour le laser de suivre la piste avec précision

-Miroir galvanométrique[6] : miroir supporté par un cadre mobile dans un champ magnétique, parcouru par un courant. La déviation du cadre est proportionnelle à l'intensité du courant.

-kHz[7] : unité utilisé pour les fréquences. 1 kHz = 1000 Hz. Du nom de son inventeur le physicien allemand Heinrich HERTZ (1857-1894).

-dB[8] : décibel, dixième partie du bel, unité servant en acoustique à définir une échelle d'intensité sonore.

-Astigmatique[9] : défaut d'un instrument d'optique ne donnant pas d'un point une image ponctuelle.

-FOUCAULT[10] : physicien français (Paris 1819- 1868).

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr

BIBLIOGRAPHIE

ENCYCLOPEDIES

- Michel CALMET, « Introduction aux techniques d'enregistrement », Techniques de l'ingénieur, Volume TE1, E5401, p. 10 à 17, 1988

- Bernard PROST, « Disques optiques », Techniques de l'ingénieur, Volume TE1, E5450, 32 p., 1995

- Michel CALMET, « Enregistrement numérique du son », Encyclopédie Larousse, p. 401, 1994

SITES INTERNET

http://www.mitsuimedia.fr : site du constructeur de CD Mitsui

http://www.chez.com/smartdog/Rubrique_comment_ca_marche.htm : explication de la gravure des CD et DVD

http://www.idim-mirambeau.com/tests/cdrom/cdrom.htm : CD-ROM et complément d'information

http://www.ricoh.fr : site du constructeur de copieurs, photocopieurs et graveurs

Copyright - Enseignement des Métiers de la Communication
Malakoff 92240 - Tous droits réservés.
Site web : http://www.emc.fr