

Le Compact Disc audio

Sommaire

1. Nature du son 
2. Production d'un son 
3. Caractéristiques d'un son 
4. Enregistrement d'un son 
5. Echantillonnage 
6. Numérisation 
7. Résultat de l'échantillonnage+numérisation 
8. Encodage des données 
9. Brassage des échantillons 
10. Code CIRC 
11. Mot de contrôle 
12. Codage EFM 
13. Le mot d'assemblage 
14. Synchronisation 
15. Taille de la trame finale 
16. Structure physique du CD 
17. Lecture du CD (principe) 
18. Normes 
19. Sources à citer 

1 – Nature du son

Le son est une onde d'énergie résultant de la **vibration** mécanique d'une "source sonore" et propagée de proche en proche grâce à l'élasticité du milieu environnant.

Sans milieu, et donc sans matière, il ne peut y avoir de son. Le son ne peut donc pas se propager dans le vide.

2 – Production d'un son

Un son peut être produit par tout objet engendrant une vibration de l'air, une corde, une membrane par exemple.

Lorsqu'on frappe un diapason, les branches métalliques se mettent à vibrer et produisent un son :

[frapper le diapason :](#)



3 – Caractéristiques d'un son

Tous les sons simples, tels qu'une note de musique, peuvent être décrits par trois paramètres :

- la hauteur,
- l'intensité (appelée aussi volume)
- le timbre.

Ces trois critères correspondent respectivement à trois caractéristiques de l'onde qui sont sa **fréquence**, son **amplitude** et sa **constitution harmonique**

Hauteur du son :

[Son grave](#)

[Son médium](#)

[Son aigu](#)

Intensité du son :

[Intensité faible](#)

[Intensité moyenne](#)

[Intensité forte](#)

Timbres de sons de même hauteur(500 Hz):

[Son1](#)

[Son2](#)

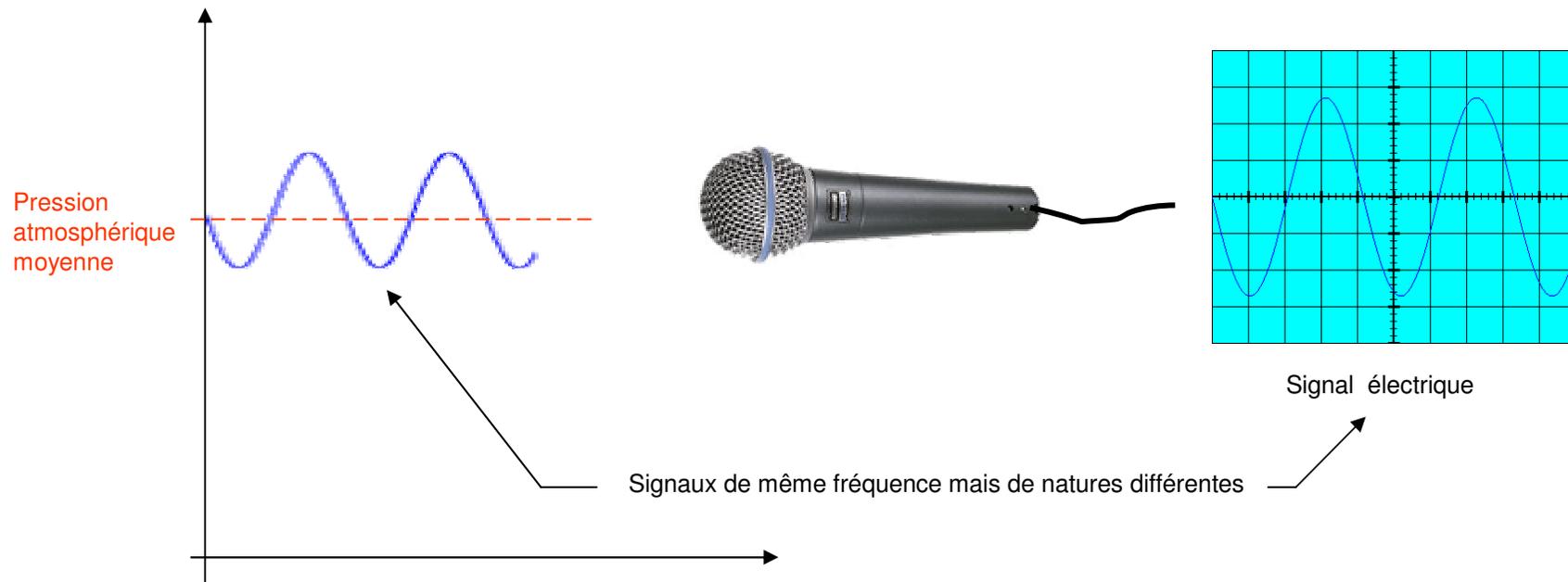
[Son3](#)



4 – Enregistrement du son

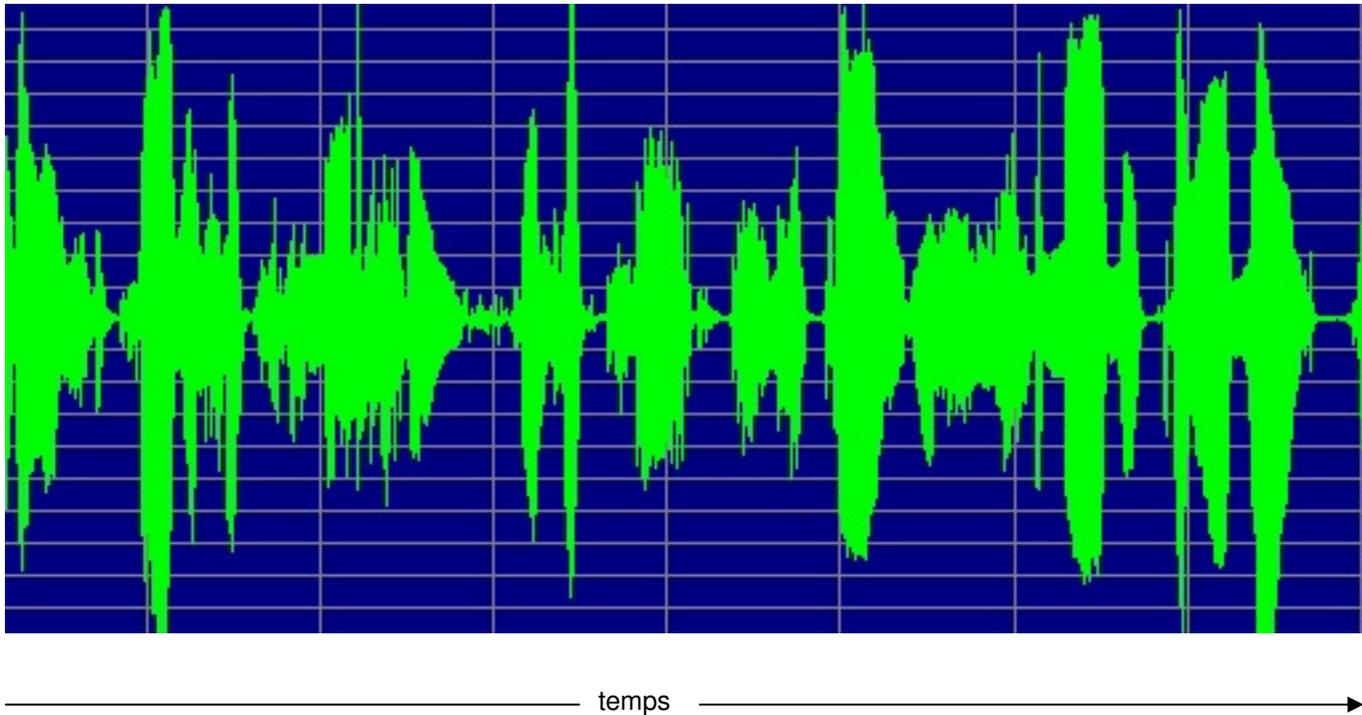
Pour pouvoir enregistrer un son, il est nécessaire de transformer les variations de pression du milieu ambiant en grandeur électrique.

Cette tâche est réalisée par le **microphone**. Cet objet convertit de façon très fidèle le son en tension électrique :



5 – Echantillonnage

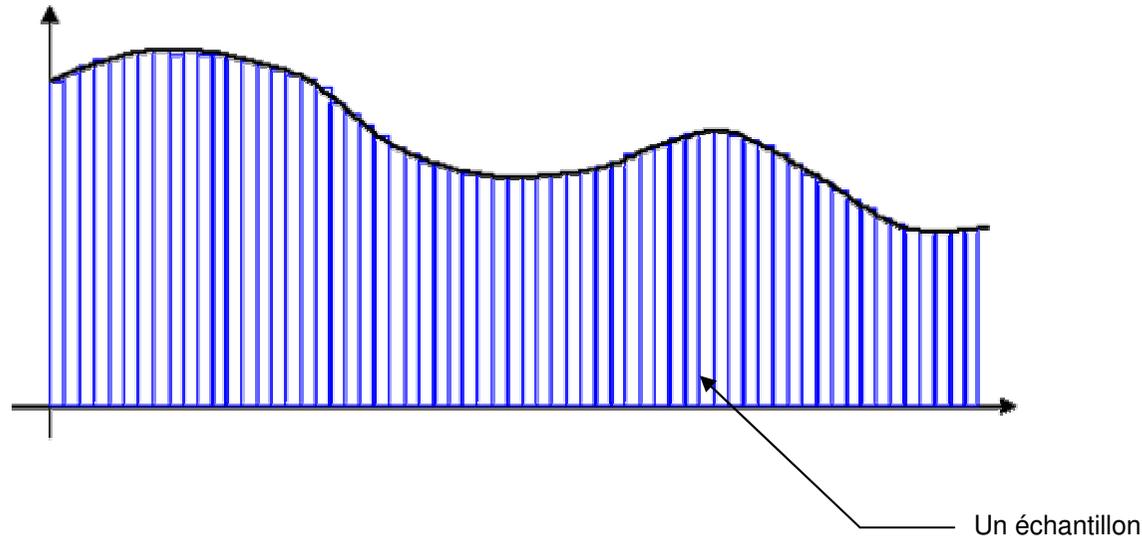
Le signal électrique délivré par le microphone est amplifié (amplitude amenée à 1V). Lorsque la source sonore n'est pas une de nature simple (cas général), le signal présente une forme très complexe :



Cette représentation d'un son est appelée **spectre de modulation d'amplitude** (modulation de l'amplitude d'un son en fonction du temps).



L'échantillonnage consiste à prélever à **intervalles** de temps **réguliers** l'amplitude du spectre de modulation :



La valeur du taux d'échantillonnage, pour un CD audio par exemple, n'est pas arbitraire, elle découle en réalité du théorème de Shannon. La fréquence d'échantillonnage doit être suffisamment grande, afin de préserver la forme du signal. Le théorème de Nyquist - Shannon stipule que la fréquence d'échantillonnage doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal. Notre oreille perçoit les sons environ jusqu'à 20 000 Hz, il faut donc une fréquence d'échantillonnage au moins de l'ordre de 40 000 Hz pour obtenir une qualité satisfaisante.



Fréquences d'échantillonnage les plus utilisées :

Fréquence d'échantillonnage (en Khz)	Applications
48	DAT, enregistrements professionnels
44,1	CD-audio
32	Radio FM
22	Radio AM
11	Voix
8	Téléphone

La fréquence d'échantillonnage du son d'un CD étant de 44,1 Khz, cela veut dire qu'il y a 44100 échantillons dans une seconde, soit :

$3600 \times 44100 = 158,76$ millions d'échantillons pour une heure de musique.



6 – Numérisation

La numérisation du son consiste à transformer la valeur de l'amplitude d'un échantillon en une valeur numérique. La fidélité du son numérisé dépend du nombre de bits choisi pour la numérisation :

pour n bits on a 2^n valeurs analogiques possibles pour un échantillon.

Ainsi, pour une amplitude de 1V du signal analogique on obtient :

N bits	Nombre de valeurs possibles	Ecart minimal d'amplitude entre deux échantillons
2	4	0,33 V
8	256	3,92 mV
16	65536	15,25 μ V

La **dynamique** (écart le plus grand entre l'intensité du son la plus forte et la plus faible mesurée en **dB**) du Compact Disc est donc de :

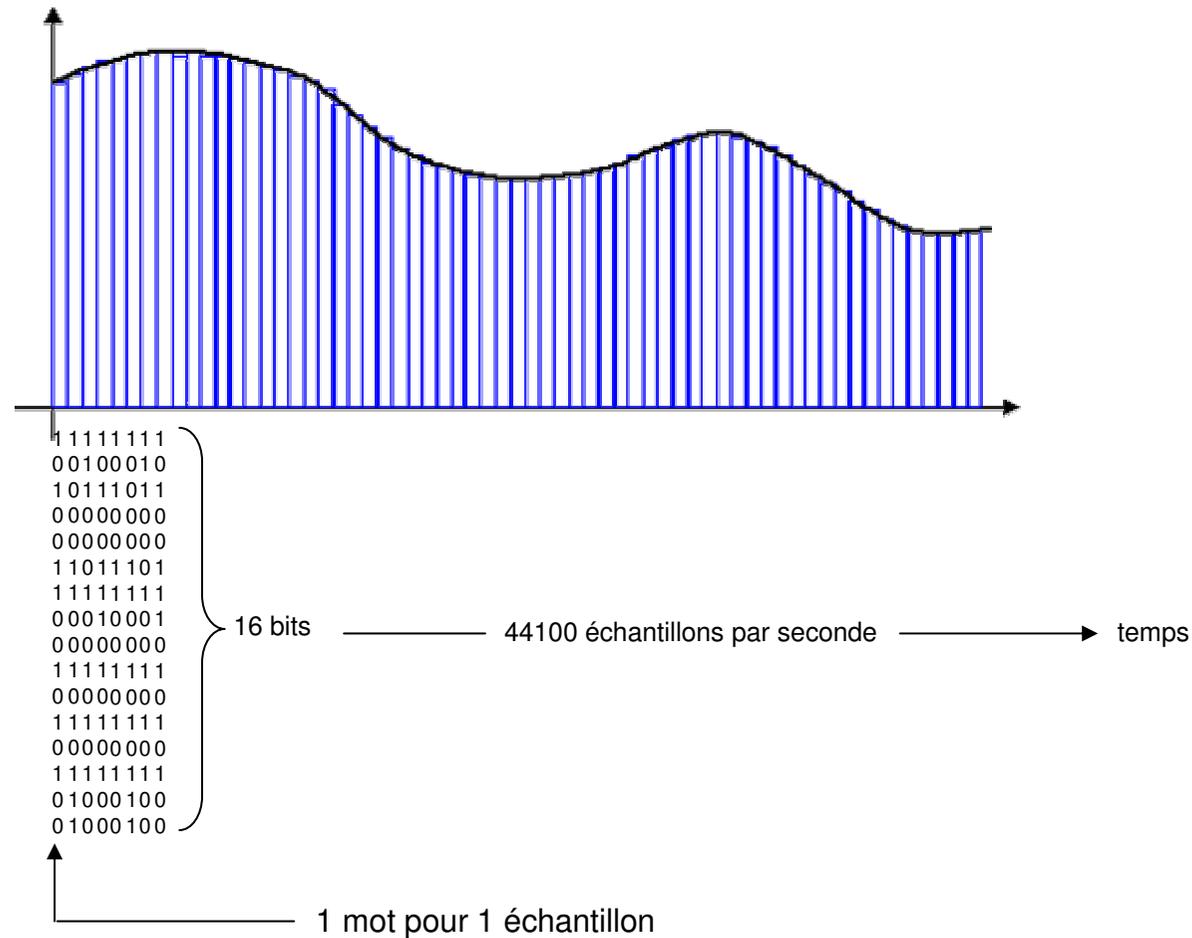
$$dynamique = 20 \times \log\left(\frac{1V}{15,25\mu V}\right) = 96dB$$

Le CD utilise une numérisation sur 16 bits. Le son étant stéréophonique, on utilise deux canaux sur lesquels on enregistre individuellement un son qui sera fourni au haut-parleur de gauche, ainsi qu'un son qui sera diffusé sur celui de droite.



7 – Résultat de l'échantillonnage et de la numérisation

On obtient donc pour le CD après l'échantillonnage et la numérisation une suite de mots binaires codés sur 16 bits pour chacune des 2 voies (droite et gauche) :



8 – Encodage des données

Le disque compact fut inventé conjointement par les firmes Philips et Sony Corporation (mais surtout Philips qui a beaucoup investi dans la recherche sur l'enregistrement optique depuis les années 50) avec, également, la participation de Hitachi pour l'audio-numérique (CD audio) en 1979.



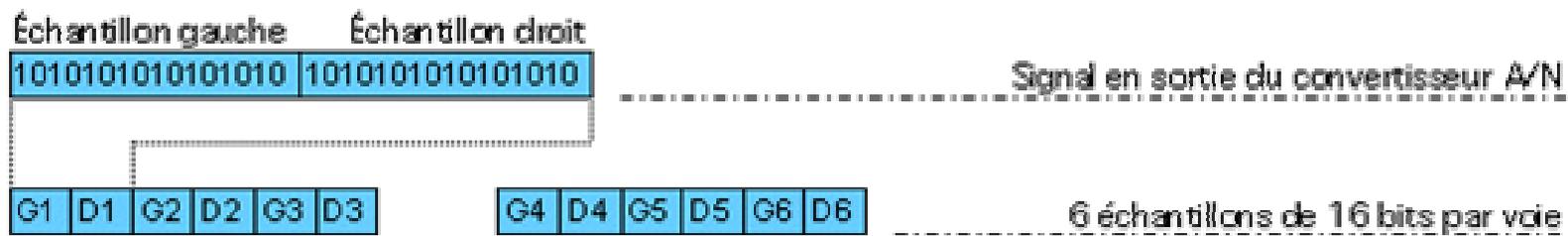
En 1980, un "livre rouge" a précisé les caractéristiques techniques du nouveau disque et le partage des brevets entre les deux concurrents : à Philips la conception du CD (sur la base de leur expérience de la technologie du *Laserdisc*) et des lentilles qui permettent la lecture ; à Sony la définition du format utilisé pour numériser la musique et la méthode de correction d'erreurs.



Les échantillons ou mots de 16 bits sont organisés sous forme de **trames**. Une trame contient 6 périodes d'échantillonnage. Elle comporte donc 12 mots de 16 bits soit 192 bits. La trame brute a la forme suivante :

G1 D1 G2 D2 G3 D3 G4 D4 G5 D5 G6 D6

(G pour gauche, D pour droite).



La suite de l'encodage consiste à modifier la trame de la manière suivante :

- brassage des échantillons pour corriger les rayures accidentelles du CD
- ajout d'un code CIRC destiné à déceler les erreurs éventuelles
- ajout d'un mot de contrôle
- transformation des mots de 8 bits en mots de 14 bits
- ajout d'un mot de 3 bits d'assemblage (merging bits)
- ajout de la synchronisation



9 – Brassage des échantillons pour corriger les rayures accidentelles du CD

Le principe en est le suivant :

Supposons que les échantillons à graver sur le CD aient les valeurs suivantes :

0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48	0,52	0,58	0,64	0,70	0,76	0,74	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	→ Numéro de l'échantillon

par apparition d'une rayure sur le disque il manque les échantillons 4,5,6,7.

à la lecture, on aurait donc :

0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48	0,52	0,58	0,64	0,70	0,76	0,74
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

il manque 4 échantillons successifs et la restitution du son va être altérée



Supposons maintenant que nous concevions un code qui écrive les groupes de 12 échantillons dans l'ordre suivant (les numéros correspondent à la position de l'échantillon dans le groupe) :

1,5,9,2,6,10,3,7,11,4,8,12

trame originale :

0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48	0,52	0,58	0,64	0,70	0,76	0,74
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Groupe1 de 12 échantillons

Groupe2 de 12 échantillons

on écrit donc sur le disque :

0,12	0,20	0,32	0,14	0,22	0,36	0,16	0,24	0,40	0,18	0,28	0,44	0,12	0,20	0,32	0,14	0,22	0,38	0,16
1	5	9	2	6	10	3	7	11	4	8	12	1	5	9	2	6	10	3

Groupe1 de 12 échantillons

Groupe2 de 12 échantillons

Enlevons les échantillons 4,5,6,7 (ordre temporel) :

0,12	0,20	0,32	0,14	0,22	0,36	0,16	0,24	0,40	0,18	0,28	0,44	0,12	0,20	0,32	0,14	0,22	0,38	0,16
1	5	9	2	6	10	3	7	11	4	8	12	1	5	9	2	6	10	3

Après lecture, on obtient :

0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48	0,52	0,58	0,64	0,70	0,76	0,74
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

soit la suite d'échantillons :

0,12			0,18	0,20		0,24	0,28	0,32		0,40	0,44	0,48	0,52	0,58	0,64	0,70	0,76	0,74
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

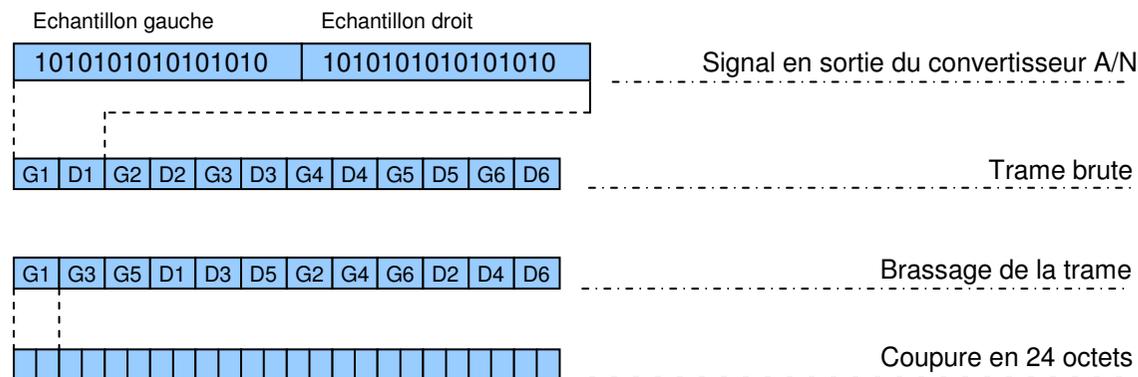


Dans le lecteur de CD, le dispositif électronique de lecture détecte le manque de quatre valeurs d'échantillons. Il va alors procéder à une **Interpolation linéaire**, c'est-à-dire qu'il va faire la moyenne de l'échantillon précédent et celle de l'échantillon suivant, ainsi, pour l'échantillon manquant N°10, il va lui donner la valeur :

$$\left(\frac{0,32+0,40}{2}\right) = 0,36$$

En pratique, l'interpolation permet de rattraper une rayure maximale de 2mm de large sans altération audible.

Après brassage des échantillons, ceux-ci sont « coupés » en 2 octets et on obtient donc la trame suivante :



10 - Ajout du code CIRC destiné à déceler les erreurs éventuelles

Le code **CIRC** (Cross Interleaved Reed-Solomon (Irving Reed et Gustave Solomon 1960)) est le code de correction d'erreur du Compact Disc constitué de deux codes de Reed-Solomon croisés C1 et C2. Chaque code comporte 4 octets de parité pour 24 octets audio. La trame complète comporte donc 8 octets de parité.

Ce code est dû à *Irving S. Reed* et *Gustave Solomon*.

Principe intuitif du codage reed-Solomon

Imaginons un bloc de 6 octets de long et que l'on transmet: 02 09 12 05 07 08

On ajoute deux octets de redondance.

Le premier est la somme des 6 octets (=43)

Le deuxième est la somme pondérée des 6 octets :

chaque octet est multiplié par son rang : $2*1 + 09*2 + 12*3 + 5*4 + 7*5 + 8*6$ soit 159.

A la sortie du codeur le bloc devient :

02 09 12 05 07 08 43 159

← perturbation

Suite à une perturbation , le récepteur reçoit le bloc : 02 09 12 08 07 08 43 159

Le décodeur fait la somme simple $02+09+12+08+07+08 = 46$

et la somme pondérée $2*1 + 9*2+12*3+8*4+7*5+8*6 = 171$

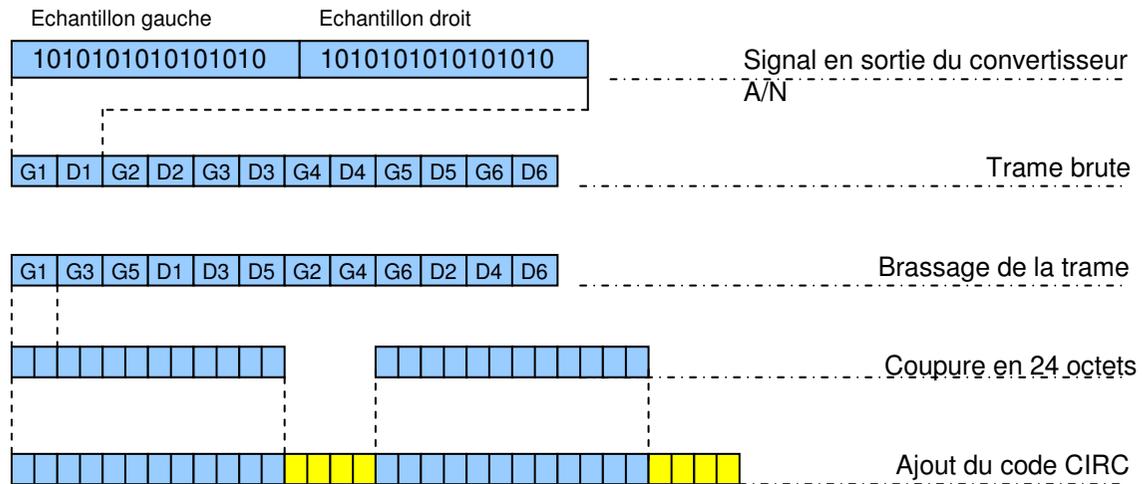
La différence des sommes simples ($46 - 43$) donne la valeur de l'erreur (=3)

et la différence des sommes pondérées divisée par l'erreur est égale à au rang de l'erreur ($(171-159)/3=4$). Il faut donc retirer 3 à l'octet de rang 4

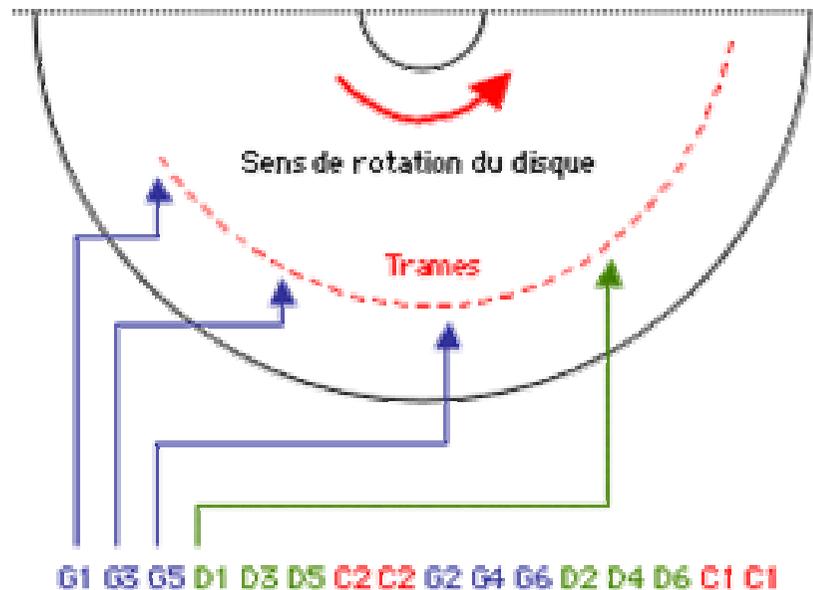
Sans erreur de transmission, la différence des sommes simples et sommes pondérées est nulle dans les 2 cas



Aspect de la trame après brassage des mots, coupure en 24 octets, ajout du code CIRC :



L'organisation temporelle sur le disque est la suivante :

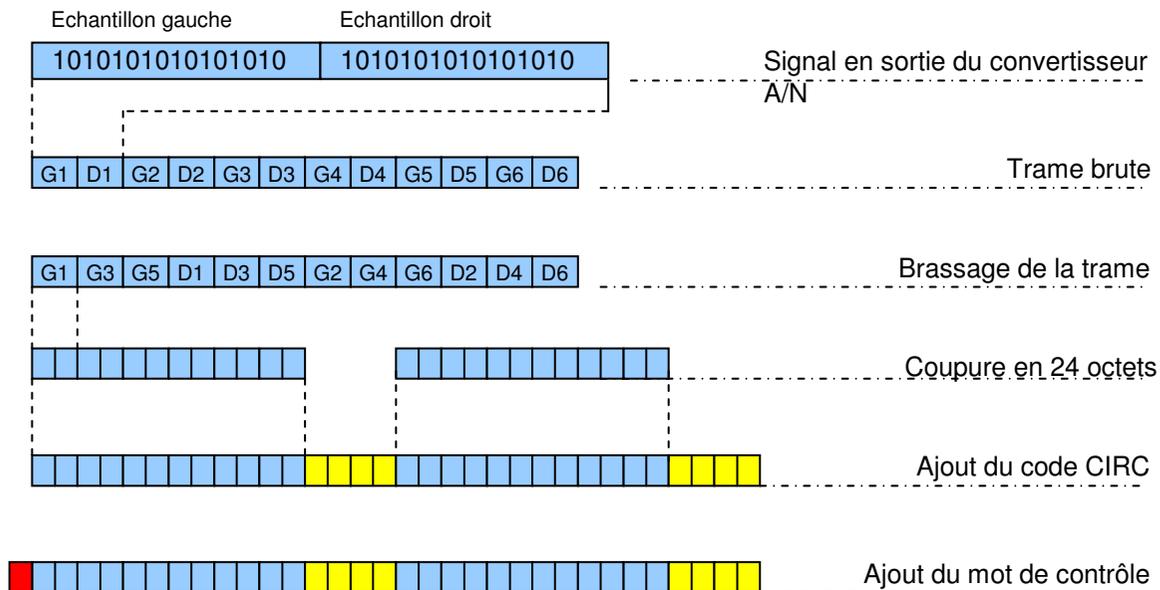


11 - Ajout du mot de contrôle

Chaque trame contient un mot de contrôle de 8 bits. En assemblant le mot de contrôle sur 98 trames on obtient un canal supplémentaire pour transmettre des données.

Sur le CD Audio, seuls les deux premiers bits de chaque octet (d'une trame) sont utilisés (canaux P et Q). Le canal P indique la présence d'une piste audio ou d'une zone non enregistrée. Le canal Q contient les informations suivantes :

- une indication de prè-accentuation (augmentation du niveau des aigus avant gravure – à noter que certains lecteurs ne savent pas traiter cette information) ;
- le numéro de la piste ;
- la position de départ de la piste ;
- la durée de la piste ;
- le temps écoulé depuis le début du disque.



12 - Transformation des mots de 8 bits en mots de 14 bits : modulation EFM

La modulation EFM (Eight to Fourteen Modulation) transforme les octets de 8 bits en mots de 14 bits.

Ce codage permet de supprimer les suites de bits à 1, car un bit à 1 est détecté par le front montant et non pas, par la valeur du signal détecté par le laser. Il permet également de minimiser les transitions 010 répétitives, sources d'erreur de lecture (Chaque bit à 1 doit être séparé du suivant par 2 à 10 bits à 0).

Le codage EFM permet aussi de réduire les suites importantes de bits identiques. En effet si le signal numérique enregistré sur le CD restitue le signal audio, il fournit également une synchronisation au mécanisme de lecture.

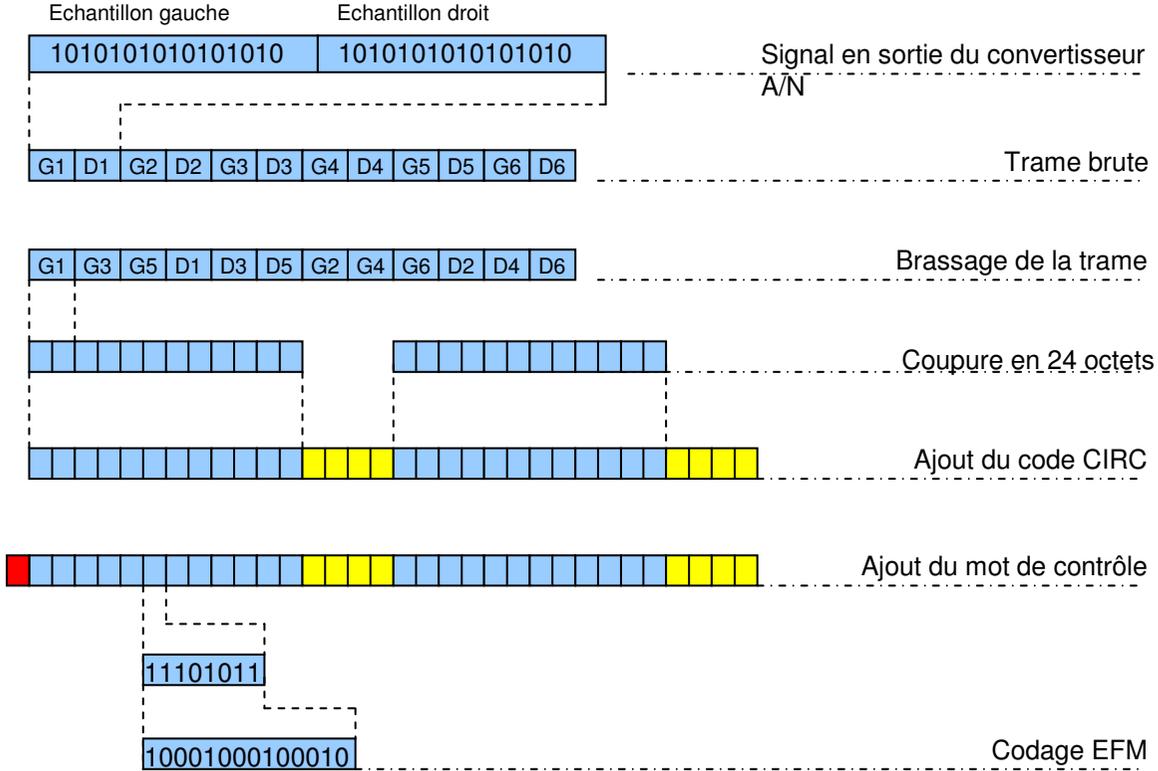
Tous les octets de la trame sont codés sur 14 bits

Exemple de codage EFM :

Index	Symbole (8 bits)	Code (14 bits)
100	01100100	01000100100010
101	01100101	00000000100010
102	01100110	01000000100010
103	01100111	00100100100010
104	01101000	01001001000010
105	01101001	10000001000010
106	01101010	10010001000010
107	01101011	10001001000010
108	01101100	01000001000010
109	01101101	00000001000010

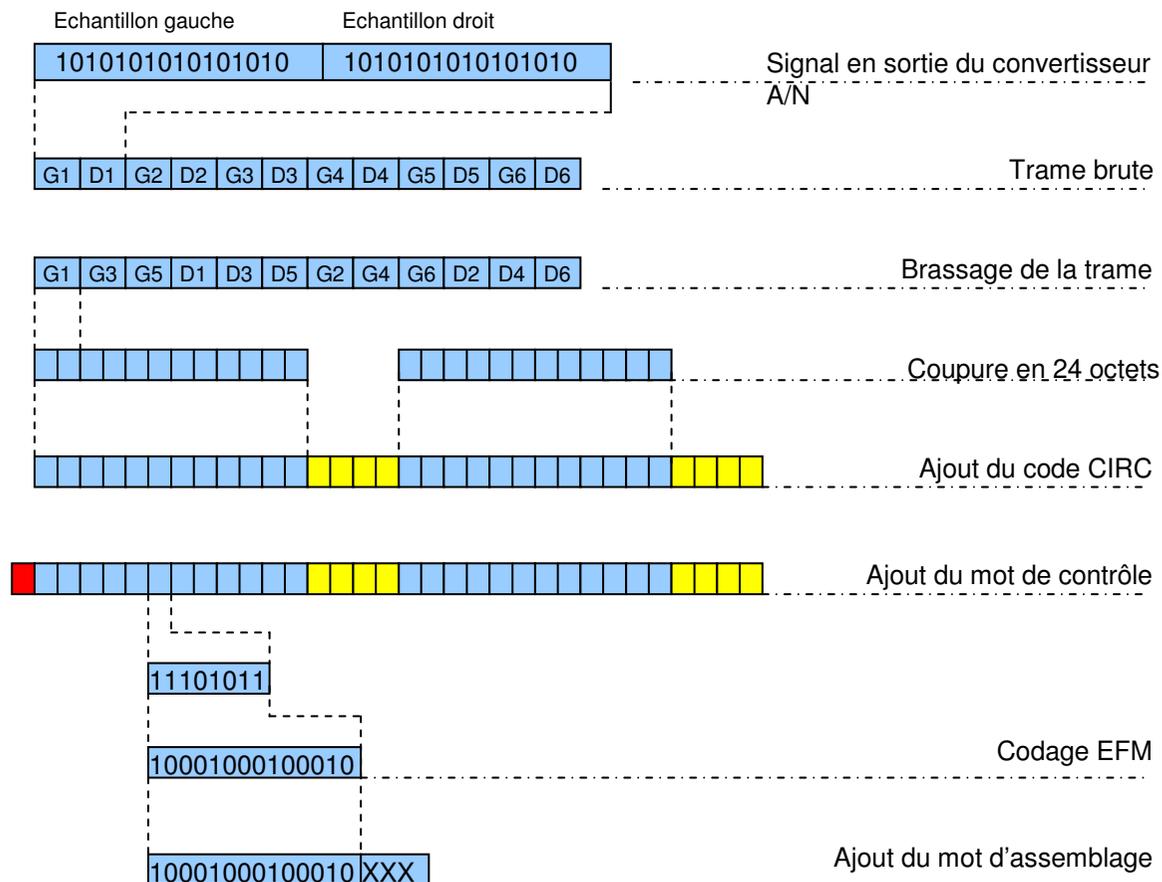


Aspect de la trame après modulation EFM :



13 – Ajout du mot d'assemblage de 3 bits (merging bits)

Les 3 bits d'assemblage sont utilisés pour permettre de respecter la règle de répartition des bits (2 à 10 bits à 0 entre chaque bit à 1) entre deux mots de 14 bits. Ils permettent également de réduire la valeur numérique moyenne du signal. Ces bits sont calculés pour chaque bloc de 14 bits.

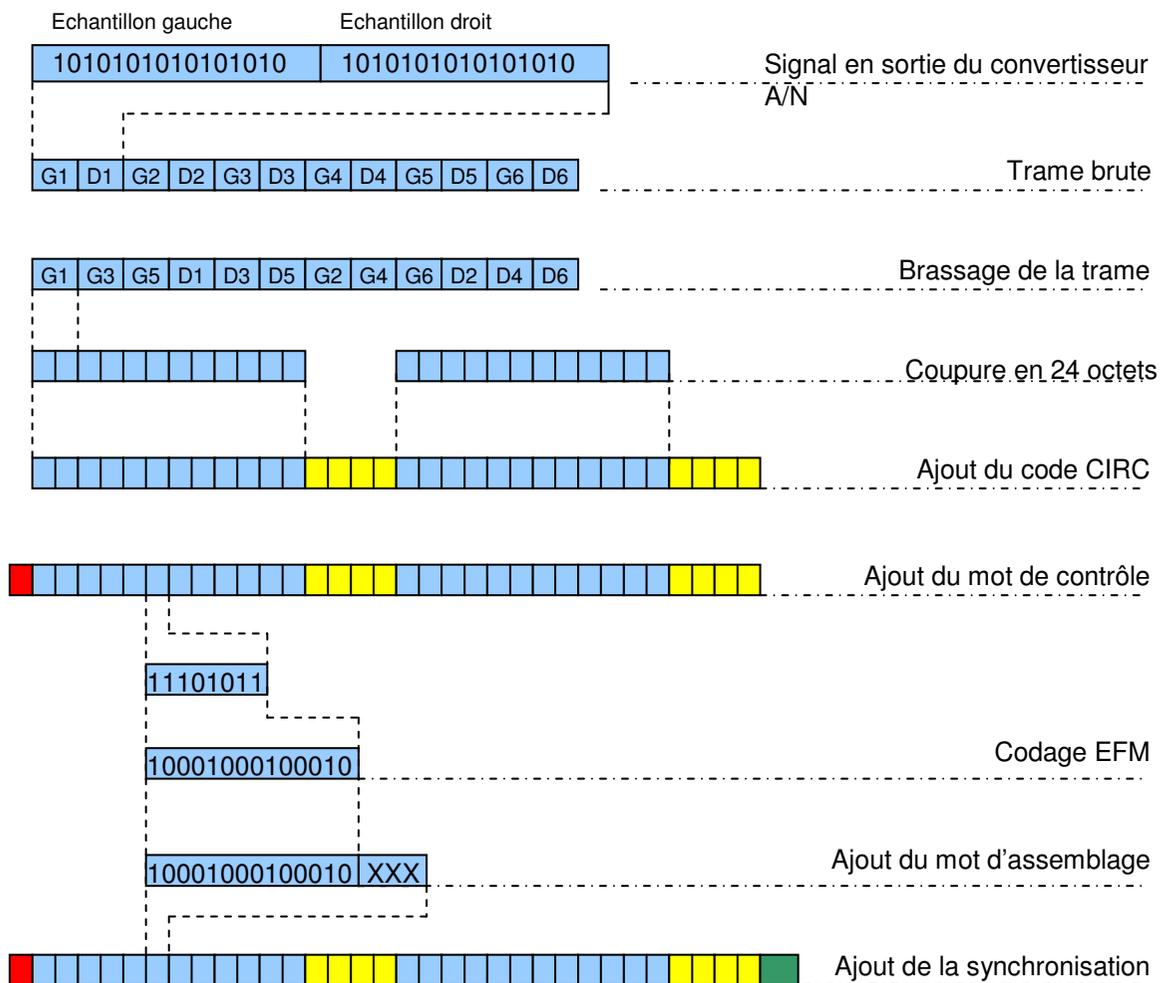


14 – Ajout de la synchronisation

Si les symboles des trames successives étaient inscrits à la suite, après le codage E.F.M. et l'adjonction du mot d'assemblage, le moindre saut de piste empêcherait de retrouver où commencer l'interprétation d'un mot. On remédie à cela en inscrivant sur le disque une séquence de synchronisation répétée à intervalles réguliers.

Cette séquence est constituée de 27 bits (100000000001000000000010 + 5 bits d'assemblage).

La synchro permet d'identifier la position d'une trame dans le flux binaire.



15 – Taille de la trame finale

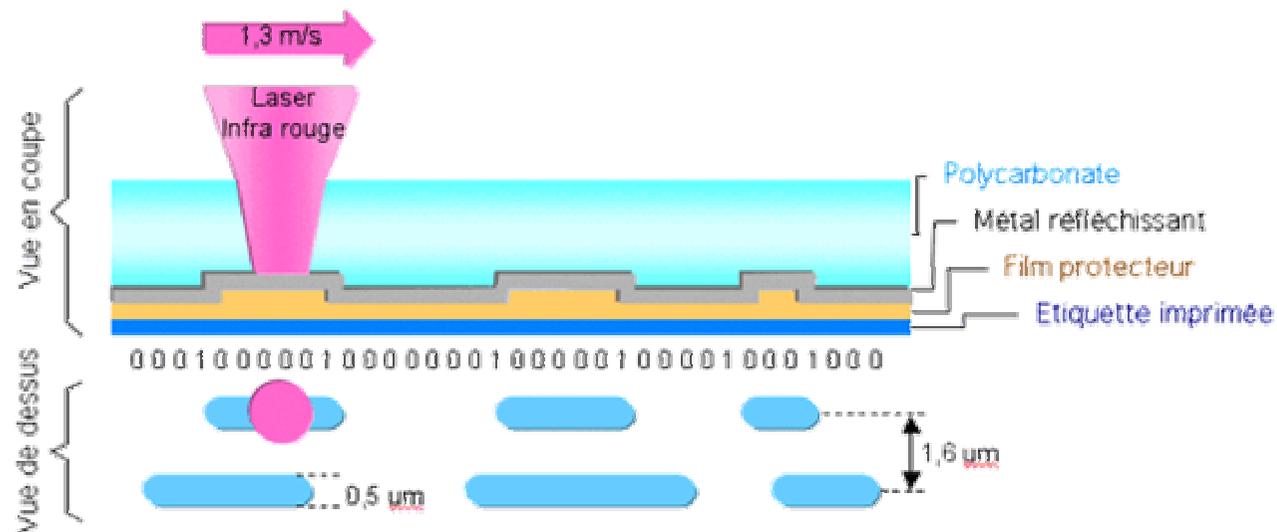
Constitution de la trame	Nombre de bits
24x8 bits de signal audio	192
Mot de contrôle	8
Code CIRC (8 x 8)	64
Synchronisation	27
Codage EFM (24 + 1 + 8) x 6	198
Bits d'assemblage (24 + 1 + 8) x 3	99
Total	588

Le nombre de bits nécessaires à la gravure est donc trois fois plus grand que le nombre de bits du signal audio.



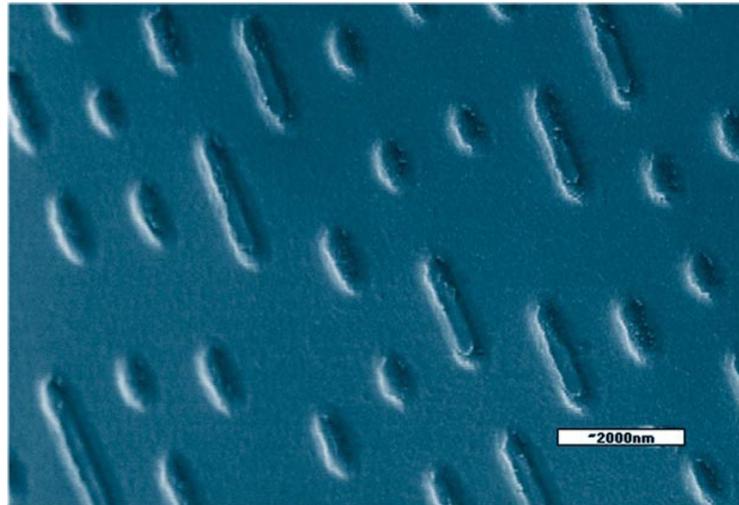
16 – Structure physique du CD

Les CD Audio sont fabriqués par injection d'un substrat en polycarbonate de 1,2 mm sur une matrice représentant les pistes numériques en relief. Cette couche est alors recouverte avec une métallisation réfléchissante de 50 à 100 nm (de l'argent et plus généralement de l'aluminium). Une couche de plastique d'une épaisseur de 1000 à 3000 nm est ajoutée pour protéger la métallisation. Au final, l'étiquette peut être imprimée. Les suites binaires sont représentées par des **micro-cuvettes** dans le substrat. La **transition** entre une zone plane et une micro-cuvette indique un 1 binaire. Sans transition c'est un 0 binaire qui est lu.



Les creux sont alignés le long de la piste :

- ils ont une profondeur de $0,12\ \mu\text{m}$ et une largeur de $0,6\ \mu\text{m}$
- leur longueur varie entre $0,84$ et $3,3\ \mu\text{m}$
- le pas de la piste en spirale est de $1,6\ \mu\text{m}$



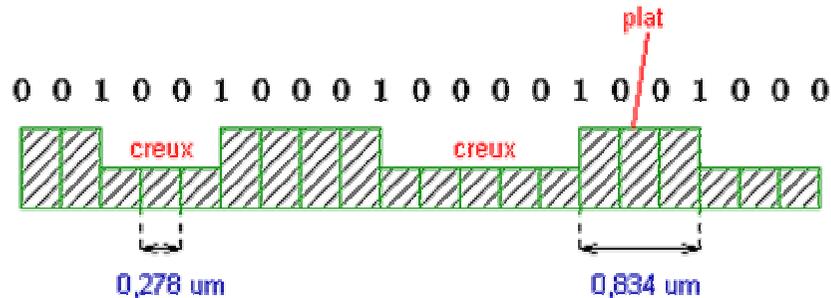
Pour se donner une idée des dimensions, si le disque était mis à l'échelle d'un stade de foot, une alvéole aurait la taille d'un grain de sable. La spirale fait 5 km de long, part du centre, va vers l'extérieur et compte 22188 tours.

On pourrait penser que les creux correspondent à des « 1 » ou des « 0 ». La réalité est un peu plus complexe et les données binaires sont inscrites sur le disque de la manière suivante :

- la taille d'un bit sur le CD est normalisée et correspond à la distance de $0,278\ \mu\text{m}$
- les « 1 » sont inscrits sous forme d'une transition (bord de cuvette)
- les « 0 » sont inscrits sous forme d'une zone plate (fond de cuvette ou plat)



Correspondance entre les creux et les données :



Grâce à la synchronisation et à un système d'horloge, la longueur d'un creux indique le nombre de bits à 0 puisque la taille normalisée d'un bit correspond à une longueur de 0,278 μ m.

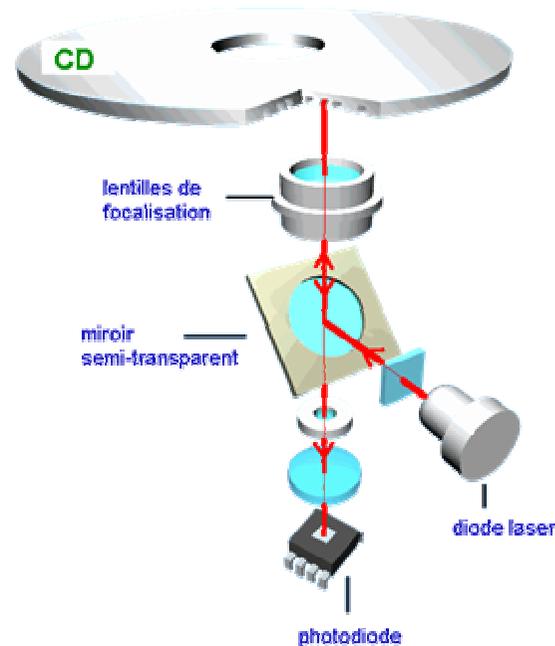
Il est à noter que la **vitesse linéaire** de lecture est constante (1,3m/s). Cette vitesse a été prise comme référence et notée **1x**. La **vitesse angulaire** varie donc en fonction du temps.

Ainsi, un graveur de CD ayant une vitesse de 8x inscrit les données avec une vitesse linéaire de $8 \times 1,3\text{m/s} = 10,4\text{m/s}$



17 – Lecture du CD

Schéma du système optique :



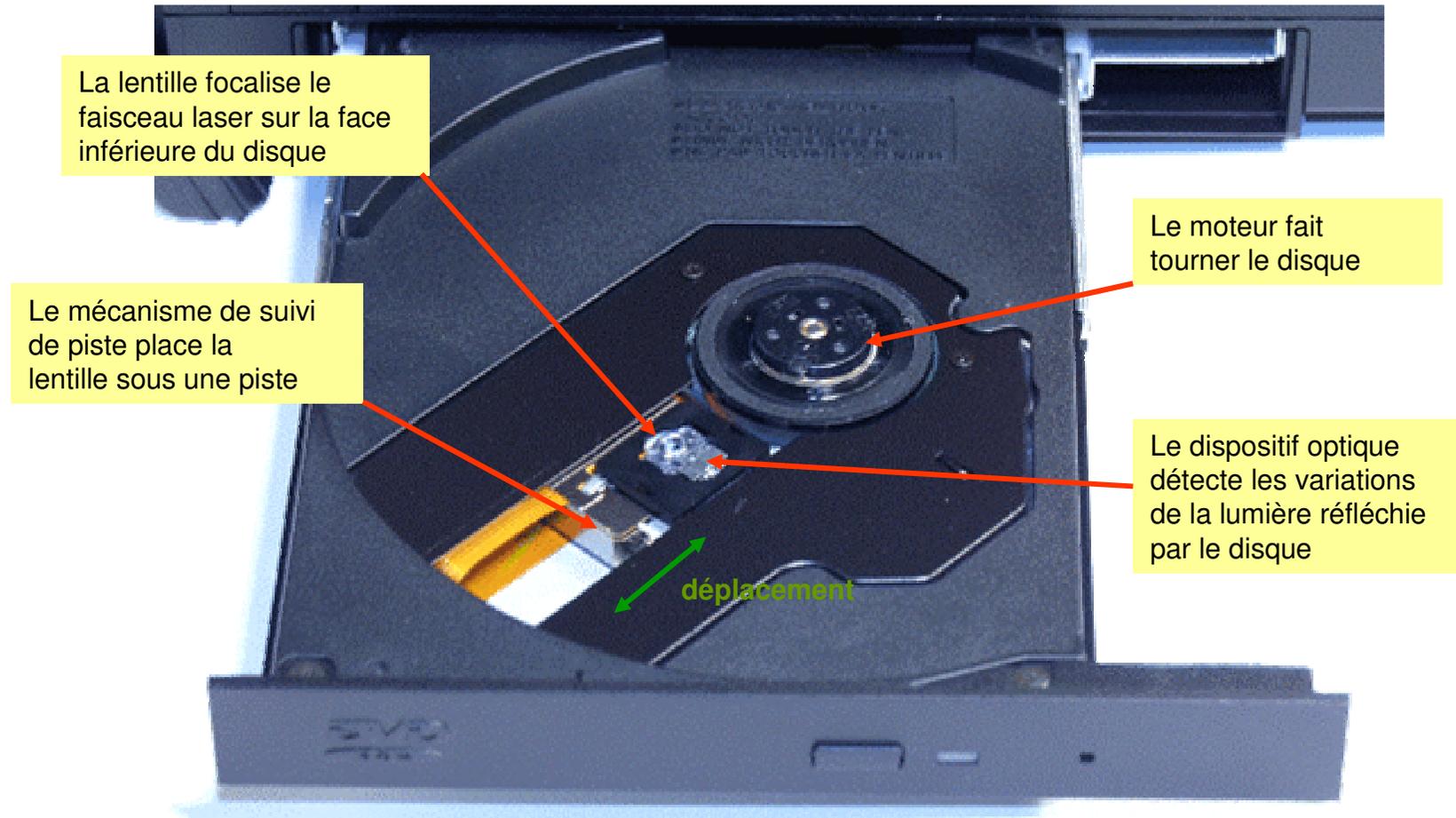
Une diode laser crée un faisceau fin de lumière monochromatique de longueur d'onde adaptée à la profondeur standardisée des creux.

Le faisceau lumineux est envoyé vers le disque par une lame semi-transparente, puis focalisé.

Le rayon réfléchi dont l'amplitude dépend des informations stockées sur le disque est focalisé sur la photodiode qui transforme son intensité en signal électrique.



Le tiroir du lecteur CD :



Exemple de capteur optique Sony :

SONY

CXA2586M

PDIC for CD-ROM/DVD-ROM

Description

CXA2586M is a PDIC (photodetector IC) developed as a photodetector for the optical pickup of CD-ROM/DVD-ROM.

The photodiode and circuit blocks operate at high speed. (Typ. 100MHz)

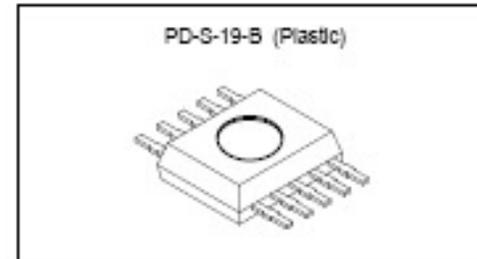
- Focus servo : astigmatic method
- Tracking servo (CD) : three-spot method
- Tracking servo (DVD) : differential phase detection method

Features

- High-speed I-V amplifier (current-voltage conversion circuit)
- High-speed photodiode
- Adding amplifier (addition of A to D)
- Compact transparent molded package (SOP)

Applications

Optical pickup for CD-ROM/DVD-ROM



Absolute Maximum Ratings (Ta=25 °C)

• Supply voltage	Vcc	5.5	V
• Operating temperature	Topr	-10 to +70	°C
• Storage temperature	Tstg	-40 to +100	°C
• Allowable power dissipation	Po	300	mW

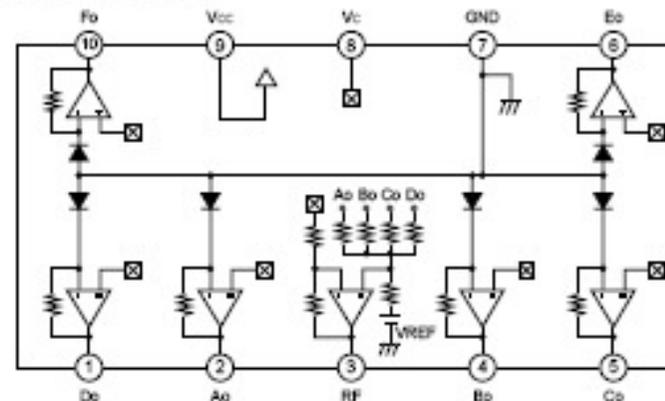
Operating Conditions

• Supply voltage1	Vcc	4.5 to 5.5	V
• Supply voltage2	Vc	1.5 to Vcc-1.5	V

Structure

Bipolar silicon monolithic IC

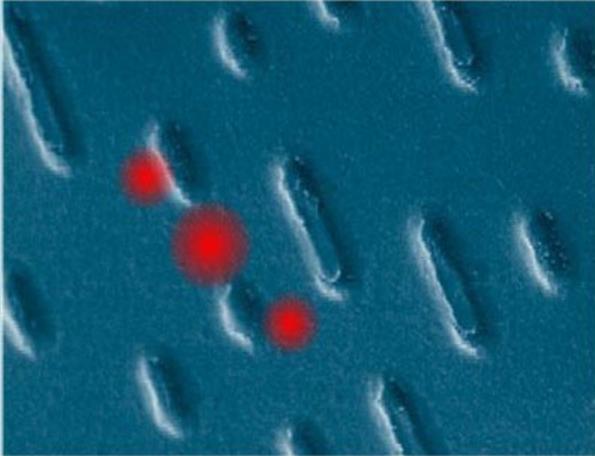
Block Diagram and Pin Configuration



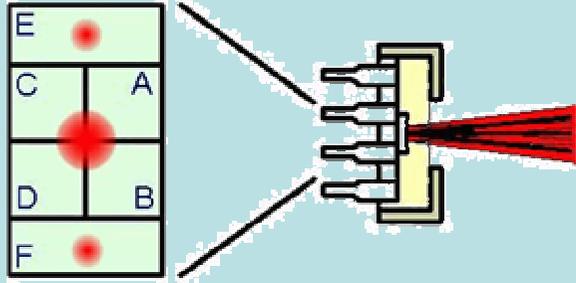
Le suivi de piste :

Fonctionnement normal

Sur le disque



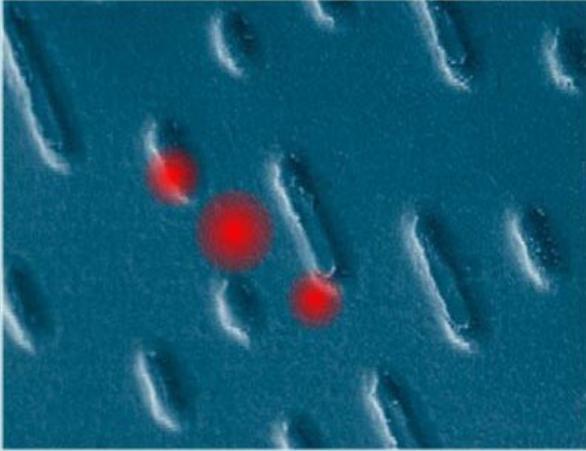
Sur le capteur optique



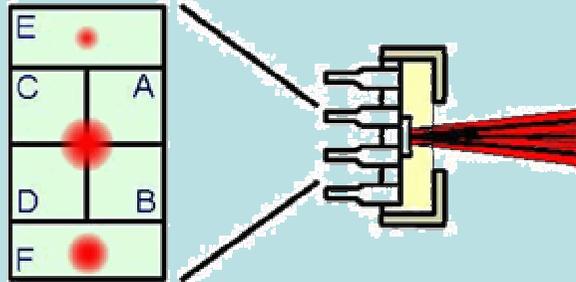
E	
C	A
D	B
F	

Erreur de suivi de piste

Sur le disque



Sur le capteur optique



E	
C	A
D	B
F	



18 - Normes fixées par Philips dans le « Red Book »

DISQUE	
Durée d'exécution	74 minutes, 33 secondes maximum
Sens de rotation:	Sens des aiguilles d'une montre vue de la surface de lecture
Vitesse de rotation	1,2 – 1,4 m/sec (vitesse linéaire constante)
Largeur de la piste:	1.6 μm
Diamètre	120 mm
Epaisseur:	1,2 mm
Diamètre du trou central	15 mm
Zone d'enregistrement:	46 mm - 117 mm
Région du signal:	50 mm - 116 mm
Support:	Tout support avec un indice de réfraction de 1.55
Longueur minimale du créneau:	0,833 μm (1,2 m/sec) à 0,972 μm (1,4 m/sec)
Longueur maximale du créneau:	3,05 μm (1,2 m/sec) à 3,56 μm (1,4 m/sec)
Profondeur du créneau:	~ 0,12 μm
Largeur du créneau:	0,6 μm
SYSTEME OPTIQUE	
Longueur d'onde standard:	780 nm (7,800 Å)
Profondeur de focale:	$\pm 2 \mu\text{m}$
FORMAT DU SIGNAL	
Nombre de canaux:	2 canaux (enregistrement sur 4 canaux possible)
Quantification:	16-bit linéaire
Fréquence d'échantillonnage:	44,1 kHz
Rendement binaire du canal:	4,3218 Mb/sec
Rendement des données:	2,0338 Mb/sec
Rapport données/canal:	8:17
Code correcteur d'erreurs:	Cross Interleaved Reed-Solomon Code
Code d'enregistrement:	Eight-to-Fourteen Modulation (EFM)



19 - Sources à citer :

- Stockage optique par **jean-philippe muller**
- <http://virlogeu.club.fr>
- Wikipédia

Auteur du diaporama : C.Weiss

