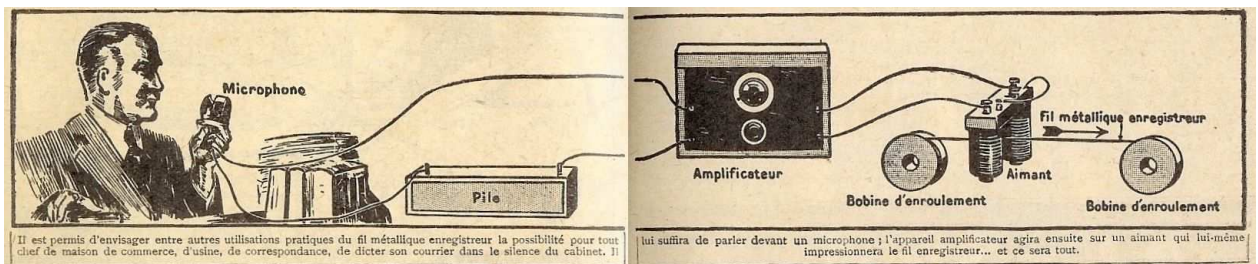


# STOCKAGE DE DONNÉES NUMÉRIQUES

Du fil magnétisé de Valdemar Poulsen aux disques durs de plus de 2 téra-octets de capacité, la mémorisation des données les plus diverses (analogiques ou numériques, sonores ou visuelles, ... ) a fait un bond immense en un peu plus d'un siècle.



Ce document tente de faire le point sur l'état actuel (2009) des techniques abouties dans le domaine du stockage des données numériques.

Ces techniques sont essentiellement au nombre de trois :

- Le stockage magnétique.  
( bandes, disques durs mécaniques)
- Le stockage électronique.  
( cartes mémoires flash, clés USB, disques durs SSD)
- Le stockage optique.  
( CD audio, DVD, Blu Ray)

## Références:

- *Le spin s'invite en électronique.* (Conférence d'Albert Fert Université de tous les Savoirs, janvier 2009)
- *Entretien avec Albert Fert.* Images de la Physique 2008.
- *Le magnétisme de l'ultime.* Olivier Redon.  
Clefs CEA n° 56.
- *Spectrosciences : La Physique des technologies.*  
Stockage magnétique et électronique ; stockage optique.  
<http://www.spectrosciences.com/spip.php?article86>
- *Le stockage optique.* Jipéhem.  
<http://www.ta-formation.com>



2 TO (  $2 \times 10^{12}$  octets,  $16 \times 10^{12}$  bits)  
sur une surface de quelques centaines  
de  $\text{cm}^2$

La densité de stockage est  
impressionnante

# 1 . Le stockage magnétique

## 1.1 Le principe

La plupart des matériaux ne conservent pas de trace de leur passé magnétique : Ce sont des matériaux non magnétiques. Quelques uns cependant, à base de fer, cobalt ou nickel en sont capables. Ces matériaux sont qualifiés de ferromagnétiques.

Si on examine au microscope un échantillon de matériau ferromagnétique, on constate qu'il s'organise en petits domaines (dits *domaines de Weiss*) de dimension inférieure au mm.

Chacun de ces domaines possède nativement une *aimantation* ; l'orientation de l'aimantation de chaque domaine est aléatoire ; en conséquence, l'aimantation globale de l'échantillon est nulle. (fig 1)

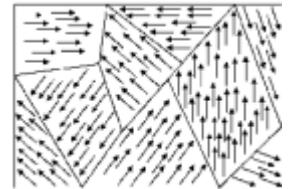


fig1

Quand ce matériau est soumis à un champ magnétique extérieur (on parle d'*excitation*), les aimantations de ces micro domaines s'orientent petit à petit sur la direction et le sens de l'excitation. (fig 2)

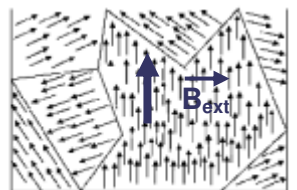


fig2

Lorsque l'excitation est de valeur suffisante, tous les domaines de Weiss ont leur aimantation alignée sur le champ exciteur ; le matériau est alors *saturé* et il ne sert plus à rien d'augmenter encore la valeur de l'excitation. (fig 3)

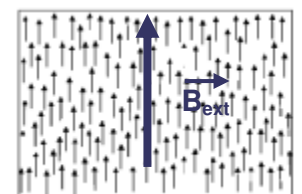


fig3

Le phénomène devient intéressant lors de l'annulation du champ exciteur ; Une certaine proportion des domaines reste alignée sur la direction de l'excitation : Il subsiste une *aimantation rémanente*, véritable trace de l'action de l'excitation passée. Ce processus est connu sous le nom d'*hystérésis magnétique*.

Les courbes ci-dessous (fig 4) résument quelques propriétés du phénomène d'hystérésis magnétique.

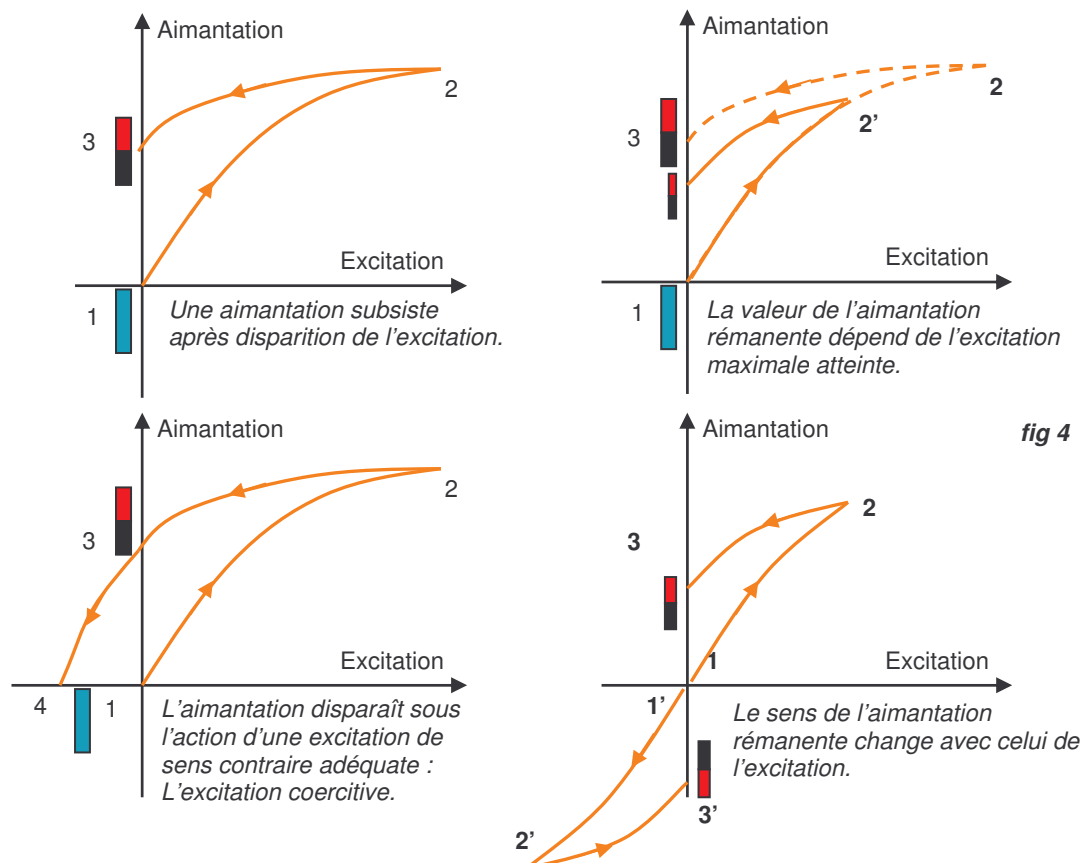


fig 4

Il ressort de ce qui précède un inconvénient de l'enregistrement sur support magnétique : Une perturbation magnétique extérieure, d'intensité suffisante, est capable d'effacer tout ou partie des données inscrites. Il y a intérêt d'utiliser des *matériaux ferromagnétiques durs*, c'est à dire caractérisés par une excitation coercitive élevée. (A l'inverse des *matériaux doux*, inutilisables ici)

## 1.2 Enregistrement – lecture sur bande.

La bande magnétique est apparue vers 1925 à 1930.

D'abord réservée à l'enregistrement sonore, elle a permis l'enregistrement vidéo dès la fin des années 1970

Le ruban magnétique est constitué de 2 couches : La couche dorsale et le liant.

La couche dorsale constitue le support matériel du ruban. Jadis fabriquée d'acétate de cellulose, elle est rapidement remplacée par un polyester, aussi appelé mylar. (L'acétate de cellulose se dégradait rapidement)

Le liant est le plus souvent un polyuréthane. On y introduit des particules d'un matériau ferromagnétique qui a la propriété de « se souvenir » de la direction et de la force du champ magnétique auquel il est exposé.

Les substances magnétiques les plus couramment utilisées sont l'oxyde de fer gamma  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , (donnant aux rubans magnétiques une couleur rougeâtre), le bioxyde de chrome  $\text{CrO}_2$ , voire même du fer pur.

On trouve parfois une 3<sup>ème</sup> couche, opposée au liant, et à base de noir de carbone : Cette couche sert à limiter les phénomènes électrostatiques et améliore la qualité de l'enroulement.

La tête de lecture – écriture :

Elle est constituée d'un petit électroaimant, dont le noyau comporte un entrefer, au voisinage de la zone de contact avec la bande magnétique (voir fig. 5 ci-dessous).

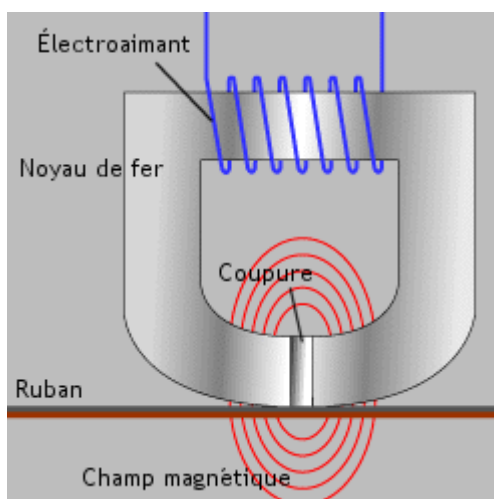


fig. 5 : Tête de lecture – écriture pour magnétophone

Écriture : Les informations à enregistrer sont converties en un courant appliqué à la bobine de l'électroaimant (quelques dizaines à quelques centaines de  $\mu\text{A}$ ).

Le champ magnétique créé par ce courant est canalisé par le noyau ; au niveau de l'entrefer, les lignes de champ divergent légèrement et se referment grâce au support magnétique que constitue la bande. La bande est ainsi magnétisée.

La largeur de cet entrefer et la vitesse de défilement de la bande fixent la densité des informations enregistrables ; en audio, ce couple de valeurs est en relation étroite avec la bande passante (l'entrefer doit être d'autant plus étroit que l'on souhaite une réponse étalée dans les aigües)

Remarque : L'écriture doit se faire sur un support vierge de toute aimantation ; la tête de lecture est précédée d'une *tête d'effacement*. La tête d'effacement est de structure assez voisine de la tête d'écriture (entrefer plus large) Elle est parcourue par un courant HF (2 à 5 fois la fréquence maximale qui sera enregistrée) d'intensité permettant la saturation certaine de la bande à son passage près de cette tête.

Un point de la bande qui défile devant la tête d'effacement subit une action de champ magnétique croissante puis décroissante dans le temps ; c'est la phase décroissante qui est à l'origine de la neutralisation magnétique.

Lecture : Lorsque le ruban défile devant la tête de lecture, les *variations* d'aimantation locale produisent une fém induite aux bornes de la bobine (moins d'un mV). Ce signal peut alors être interprété par l'appareil et retransmis sous forme de son ou d'image.

### 1.3 Enregistrement – lecture sur disques informatiques.

Dans le domaine informatique, l'enregistrement sur bandes a été abandonné dès la fin des années 1970. L'avènement des disques souples (floppy ou disquettes) puis des disques durs, au détriment des bandes, s'explique à la fois par des questions de capacités de stockage, mais surtout par des questions de temps d'accès aux données : L'accès à des données dispersées peut nécessiter de débobiner – rembobiner une bande, alors qu'il suffira de déplacer la tête de lecture à la surface d'un disque pour obtenir le même résultat.

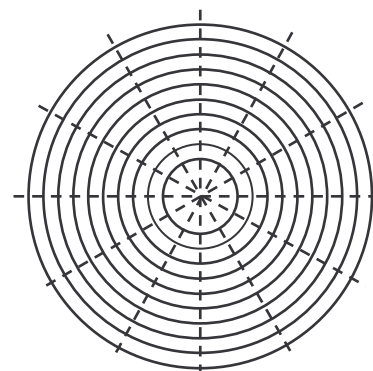
La composition des disques informatiques est voisines de celle des bandes magnétiques : Pour simplifier, on trouve une couche de substrat (souple ou rigide), recouverte d'une couche de matériau magnétique.

Les données sont réparties sur des cercles concentriques appelés pistes. Chaque piste est découpée en secteurs circulaires. (Voir fig. 6)

Une disquette est constituée d'un disque souple de polyester sur lequel est déposé un oxyde de fer sur les deux faces.

Un disque dur est composé de plusieurs disques, nommés plateaux. Ces plateaux sont rigides. Ils sont fabriqués en appliquant un mince film de métal ou d'alliage magnétique, comme le nickel, sur un substrat d'aluminium, de verre ou de céramique. Cette technique explique en partie l'incroyable quantité de données par unité de surface. (Ce sont également les progrès des têtes de lecture qui sont responsables de la forte densité de stockage)

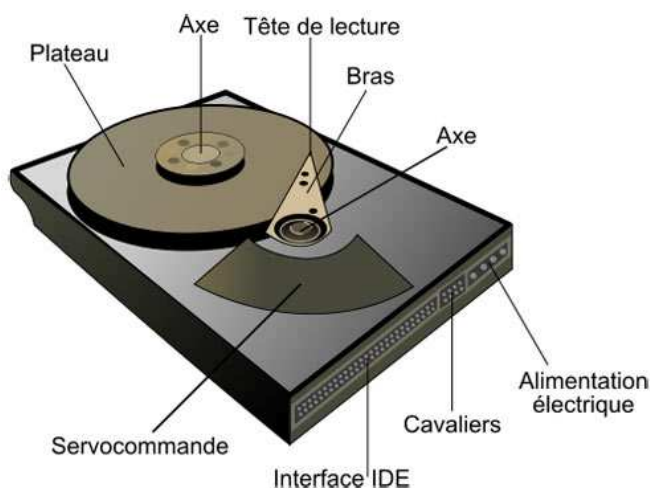
Il y a une tête de lecture par face, soit 2 par plateau.  
Les têtes se déplacent de façon radiale ; elles sont constamment à la « verticale » les unes des autres. (voir ci contre et ci dessous)  
Les plateaux du disque tournent à une vitesse comprise entre 5400tr/min et 15000tr/min, selon le modèle.



**fig. 6** : Organisation en pistes et secteurs ; exemple avec 10 pistes et 12 secteurs par piste



**fig. 7** : Structure multiplateaux d'un disque dur



**fig. 8** : A gauche, éléments mécaniques principaux d'un disque dur. A droite, détail d'une tête de lecture - écriture



La fig. 8 ci- dessus montre les détails mécaniques d'un disque dur ; il faut y ajouter la partie gestion électronique (contrôleur), située en dessous du disque, sur l'image de gauche.



### L'enregistrement :

La tête d'enregistrement fonctionne sur le même principe que celui d'une tête d'enregistrement sur bande : Un courant parcourt une bobine, enroulée sur un circuit magnétique muni d'un entrefer. La tête étant placée très près de la surface du plateau (bien moins d'un micromètre !), les lignes de champ se referment dans le support magnétique du disque.

Les premières têtes étaient en ferrite ; la miniaturisation aidant, elles sont maintenant réalisées en couches minces et diffusées sur une puce de silicium. ( On parle de tête TFI : Thin Film Inductive)

Selon le sens du courant dans la bobine, on peut magnétiser une zone dans un sens ou dans l'autre, soit traduire des « 0 » ou « 1 » logiques par la polarité d'un état magnétique.

Initialement, la magnétisation s'effectuait de façon longitudinale ; en modifiant la géométrie de la tête d'écriture, on est parvenu à inscrire les bits de façon transversale, ce qui a permis d'améliorer la densité de stockage. (voir fig. 9) L'enregistrement transversal supplante l'enregistrement longitudinal depuis 2004.

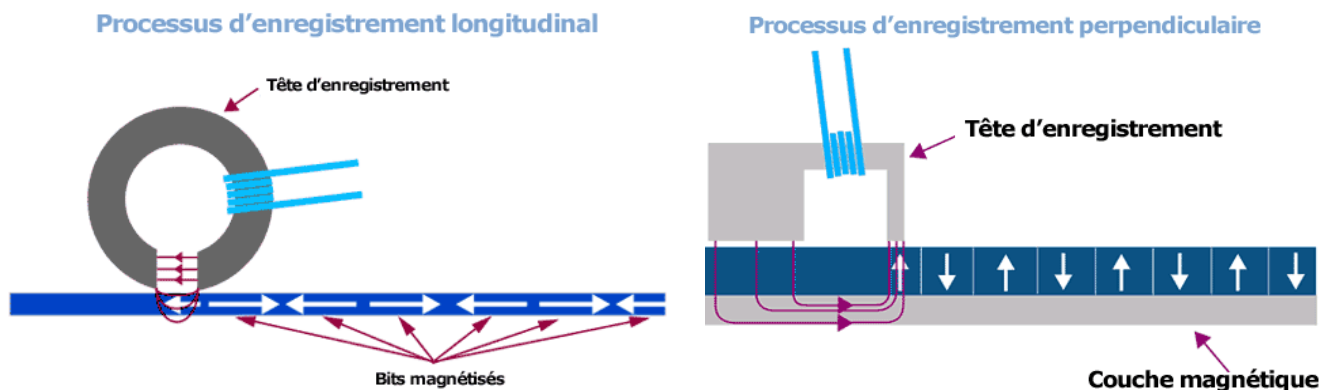


fig. 9 : Enregistrement longitudinal et transversal

### La lecture :

Les premiers disques utilisaient la même tête pour la lecture et l'écriture, comme dans un magnétophone. Ce procédé a été rapidement abandonné au profit de têtes de lecture utilisant une *magnétorésistance*, beaucoup plus compactes et plus sensibles. La résistance électrique de la tête varie avec l'état magnétique du plateau qui défile à proximité.

Mais, la course à la densité de stockage a amené ces premières magnétorésistances (dites AMR : anisotropic magneto resistance) à leurs limites : Il fallait utiliser un autre procédé pour lire les données.

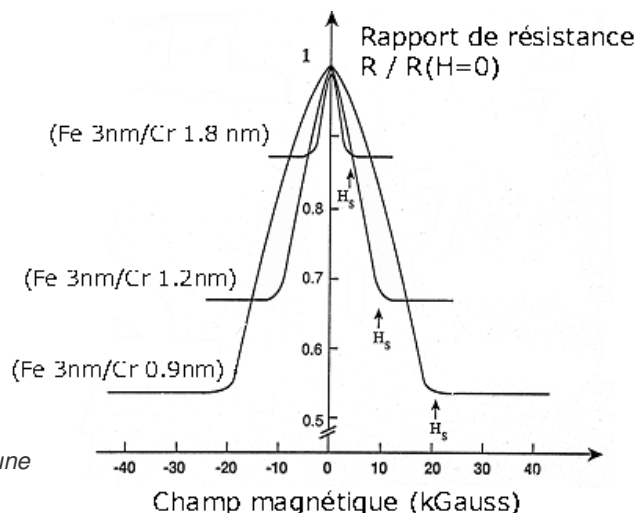
Ce procédé a été découvert par le français Albert Fert et l'allemand Peter Grünberg en 1988. Il porte un nom : la magnétorésistance géante ou GMR (pour Giant MagnetoResistance). Cette invention a été récompensée par le prix Nobel de Physique en 2007.

Pour résumer, une GMR consiste en un empilement de nanocouches alternées de matériaux ferromagnétiques ou non. Chacune de ces couches a une épaisseur de quelques nanomètres.

Les variations de résistance sont données sur la fig. 10 ; selon les épaisseurs de couches indiquées, le  $\Delta R$  peut aller de 10 à 80% environ.

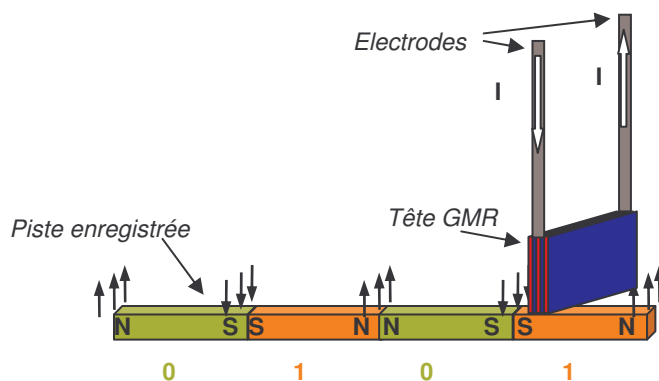
La détection de très faibles champs magnétiques provoque une inversion de *spin électronique* dans certaines de ces nanocouches. Il en résulte une modification de la mobilité des électrons du matériau et donc une variation de la résistance électrique.

fig. 10 : Variation de résistance pour une GMR de type fer-chrome

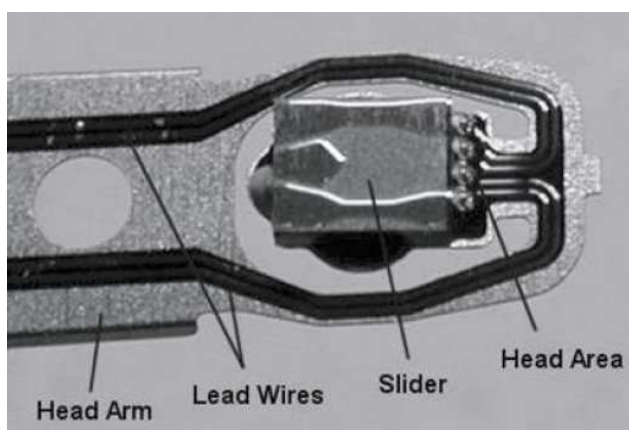


La GMR, découverte en 1988, s'est imposée pour les têtes de lecture de disque dur en 1997. Elle a permis une augmentation substantielle de la densité des informations stockées sur un disque dur : Alors que les AMR ne permettaient qu'une densité de 1GB /in<sup>2</sup> en 1996, les GMR autorisaient 6GB/in<sup>2</sup> dès 1998, puis 20GB/in<sup>2</sup> en 2000 !! (Rque : 1in<sup>2</sup>  $\Rightarrow$  2,54x2,54 cm<sup>2</sup>)

Au cours des seules 30 dernières années, le poids de l'ensemble têtes/patin de vol a été réduit d'un facteur 100, passant de 55 à 0,6 mg. (f. fig. 12) Cinq générations de têtes, issues de sauts technologiques majeurs, ont permis d'accroître le taux de croissance de la densité d'enregistrement de 25 % par an à plus de 100 % par an!



**fig. 11** : Disposition de la tête de lecture à magnétorésistance  
(la tête d'écriture n'est pas représentée)



**fig. 12** : Détail de l'ensemble tête – patin de vol.  
L'échelle est le  $\mu\text{m}$

Les dimensions de la tête en elle même sont tout à fait impressionnantes. Elle mesure dans sa largeur moins d'une centaine de nanomètres, une dizaine dans son épaisseur, et « vole » à 5000 à 10000 tr/min au dessus des plateaux du disque à une hauteur équivalente à 50 atomes.

Mais à force de manipuler ces chiffres de l'infiniment petit on en oublie ce qu'ils signifient en réalité. Voilà une petite comparaison à méditer : si cette tête était un Boeing 747, et le plateau du disque dur la surface de la Terre

- elle volerait à Mach 800
- à moins d'un centimètre du sol
- et compterait tous les brins d'herbe (en se trompant de moins de 5 brins sur une surface correspondant à l'Alsace !!)

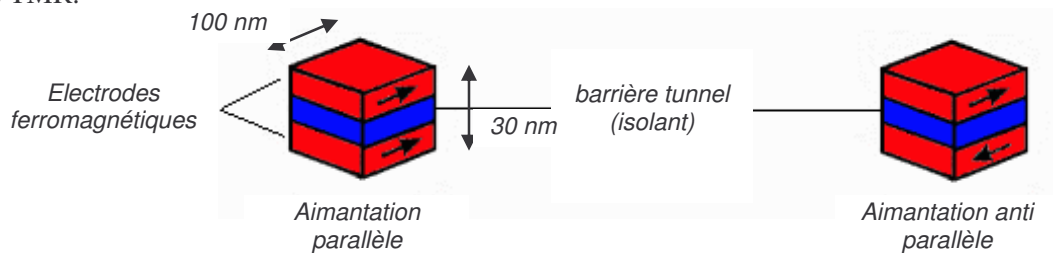


(Doc Seagate)

## 1.4 Évolutions présentes et à venir : Nanomagnétisme et spintronique.

Les disques durs ont encore progressé ces dernières années, en capacité notamment. Les têtes de lecture utilisent maintenant des magnéto-résistances à effet tunnel (TMR), encore plus sensibles aux variations de champ magnétique que les GMR.

Alors que la variation de résistance n'est que de 20 à 50% dans les GMR, elle peut dépasser 400% dans certaines TMR.



C'est l'électronique de spin ou *spintronique* qui est liée à ces progrès : Cette discipline réalise un mariage entre l'électronique et le magnétisme. Elle utilise le spin des électrons pour obtenir des propriétés ou des fonctionnalités nouvelles.

Toute l'électronique traditionnelle est basée sur les conséquences de la masse et de la charge de l'électron, c'est-à-dire la plus ou moins grande facilité à faire se mouvoir ces particules dans des semiconducteurs.

Mais les électrons sont aussi caractérisés par un moment magnétique élémentaire : le spin, dont la représentation classique est celle d'un mouvement de rotation de l'électron sur lui-même.

Tous les électrons ont un spin, qui de par sa nature quantique, ne peut se trouver que dans deux états, communément notés  $\uparrow$  (up) ou  $\downarrow$  (down). Cf fig. 14.

Dans les matériaux non magnétiques, les populations de spin  $\uparrow$  et  $\downarrow$  sont égales alors que dans les matériaux magnétiques il existe un déséquilibre entre ces deux populations de sorte que les électrons de spin  $\uparrow$  sont majoritaires.

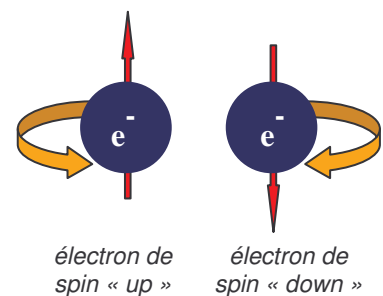


fig. 14 : Le spin électronique

La spintronique peut alors fonctionner dans les 2 sens :

Dans les magnéto-résistances (géantes ou à effet tunnel), la détection d'un champ magnétique peut provoquer une inversion locale de spin, laquelle va agir sur le passage d'un courant. (Lecture magnétique)

Mais le passage d'un courant dans une structure type jonction tunnel à composants magnétiques peut modifier l'état magnétique local par *transfert de spin*. C'est une technique d'écriture magnétique.

### Miniaturisation des supports

On ne peut indéfiniment réduire la taille physique d'un bit à la surface d'un disque dur classique : Il apparaît des interactions entre bits voisins qui ne garantissent plus la pérennité de l'information enregistrée. (Cette information pourrait, à la limite disparaître sous le seul effet de l'agitation thermique)

Une solution consiste à réaliser une « surface discrète » d'enregistrement, constituée de plots magnétiques, de taille nanométrique (cf fig. 15)

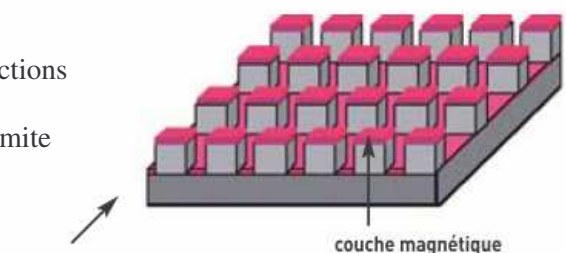


fig. 15 : Discretisation de la surface du disque dur.

### La fin de la prééminence des disques durs ?

La miniaturisation du disque dur mécanique ne comblera pas ses 2 lacunes principales : Les pièces en mouvement, synonymes d'usure, et sa « lenteur » (temps d'accès aux données supérieurs à la ms).

2 voies concurrentes sont en développement :

Les disques durs SSD (appartiennent aux mémoires flash, voir plus loin), et les mémoires non volatiles, de types M-RAM ou STT-RAM.



fig. 16 : Disque dur de 100GO pour I Pod (Doc Toshiba)

### Les mémoires M – RAM (Magnetic Random Access Memory)

Ces mémoires utilisent un mappage de jonctions tunnel, adressables en lignes et colonnes. (voir fig. 17)

Le passage d'un courant dans une ligne et une colonne fixe l'état magnétique d'un plot tunnel : Aimantations parallèles correspondant à l'inscription d'un « 0 » logique ; aimantations anti-parallèles correspondant à un « 1 » logique.

A la lecture le type de bit stocké dans un plot tunnel est détecté par l'état de résistance de ce plot.

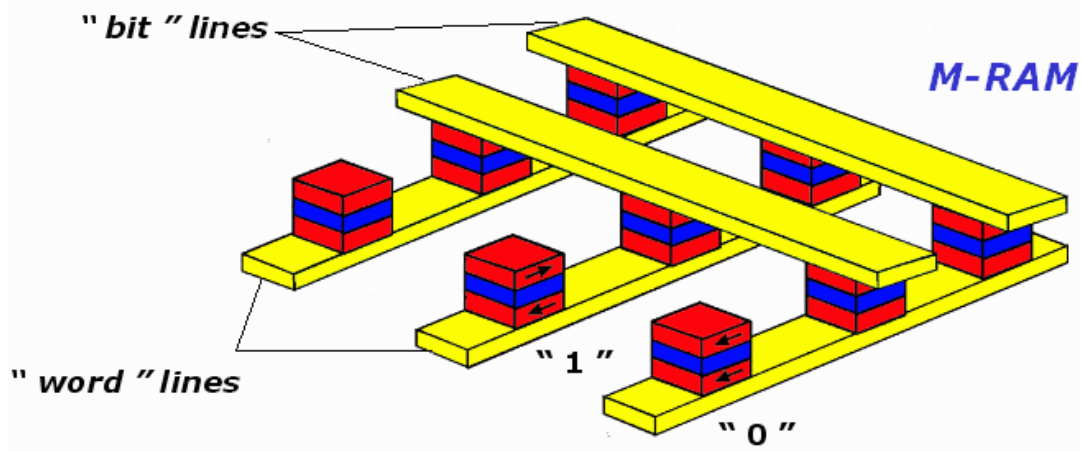


fig. 17 : Principe des cellules mémoires M-RAM à effet tunnel

Ce type de mémoire statique est non volatil. (imaginez vous un PC dans lequel Windows et vos principales applications sont déjà chargés en mémoire au démarrage !!) Un autre avantage est son temps d'accès, comparable à celui des mémoires D-RAM (volatiles !) de nos PC (quelques dizaines de ns). Par contre, la densité d'intégration est en retrait (200×200 nm), de même que la consommation.

Ces mémoires M-RAM ne sont à peine commercialisées qu'elles sont déjà concurrencées par des plans mémoire de structure voisine, mais commandés à l'écriture par des *courants polarisés en spin*, de plus faible intensité que dans les M-RAM, donc de consommation plus favorable : Ce sont les STT-RAM (*spin torque transfert random access memory*) ou mémoires à transfert de spin. Les jonctions tunnels utilisent l'oxyde de magnésium (MgO) comme barrière tunnel

Ces STT-RAM vont probablement apparaître dans les ordinateurs comme « embedded memory », c'est-à-dire mémoire intégrée au microprocesseur. (Cf. fig. 18)

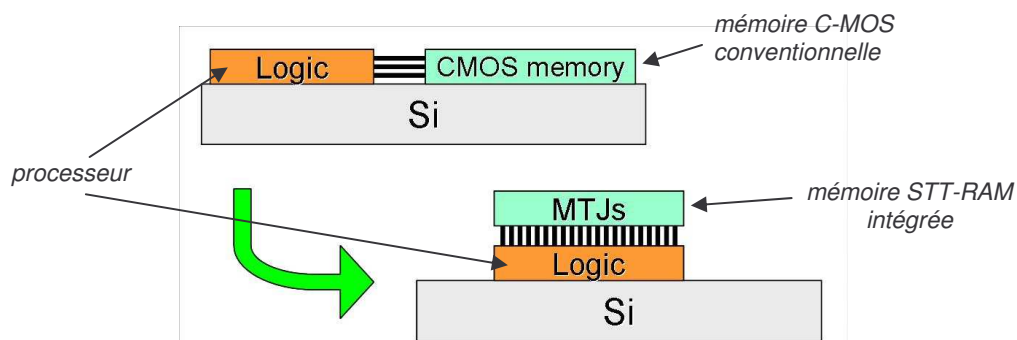


fig. 18 : L'association microprocesseur STT-RAM, premier exemple de structure hybride entre électronique CMOS et matériaux magnétiques.



## 2 . Le stockage électronique

Le stockage électronique consiste en les mémoires de type « flash », que l'on trouve dans les clés USB, dans les disques durs SSD (Solid State Disk), dans les cartes mémoires intégrées aux appareils photos numériques, aux PDA, aux téléphones portables...



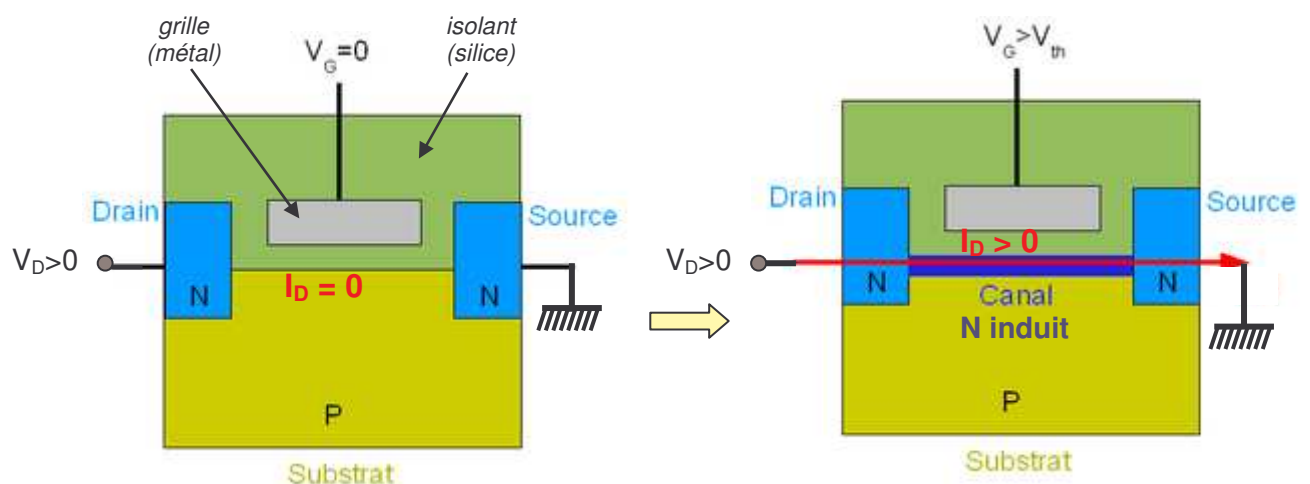
**fig. 19 :** Quelques exemples de mémoires flash :  
A gauche, disque dur SSD en taille 2,5 pouces  
A droite, les formats de cartes mémoires les plus courants.

Ces systèmes sont des mémoires non volatiles, de très petite taille et sans aucune pièce mécanique en mouvement.

Ces mémoires sont cependant moins rapides que les mémoires RAM (volatiles) des PC, car elles ne permettent pas d'accès aléatoire, mais seulement un accès par blocs aux données.

Les mémoires flash utilisent le principe des *transistors MOS à canal induit* : (Cf.fig. 20)

Une tension suffisante ( $V_{TH} \approx 3V$ ), appliquée sur la grille du transistor, permet la création d'un canal entre drain et source, par lequel peut s'écouler un courant, du drain vers la source (ceci nécessite toutefois la présence d'une tension  $V_{DS} > 0$ )

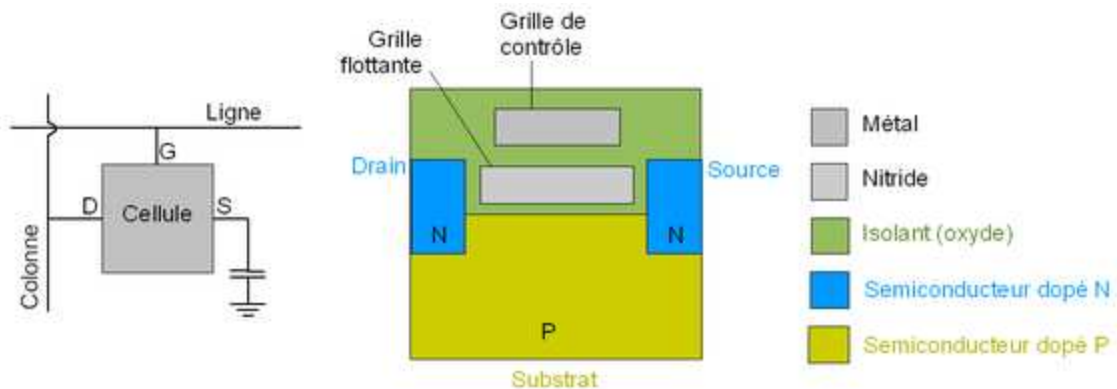


**fig. 20 :** Principe du transistor MOS à canal N induit.  
A gauche, aucun courant ne peut circuler entre drain et source.  
A droite, un potentiel de grille  $\geq 3V$  permet la création d'un canal N par inversion et le passage d'un courant de drain.

Crédits : P.Hirel/Spectrosciences 2008.

Dès que le potentiel de grille disparaît, la structure drain – source redevient isolante ; aucune information ne peut être stockée.

La solution retenue a été de diffuser une seconde grille flottante dans ce type de transistor, à base de nitrure de silicium. On aboutit ainsi à une structure de type MNOS : metal nitrure oxyde semiconductor. (Cf. fig. 21) Ces transistors ont été mis au point dans les années 1970 et sont employés dans certaines EEPROM (*ROM flash ou flash EPROM*)



**fig. 21** : Principe de la cellule de mémoire flash :  
Le transistor MNOS à double grille  
Crédits : P.Hirel/Spectrosciences 2008

Si on parvient à injecter des électrons dans cette grille flottante, ils y resteront piégés (théoriquement) indéfiniment.

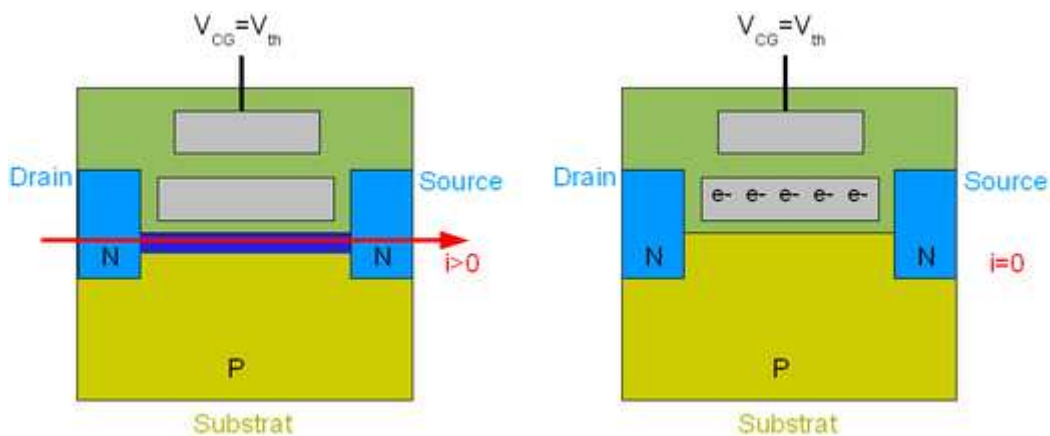
Il existe des mémoires flash de « type NOR » et de « type NAND », dont les fonctionnements sont assez voisins.

#### Comportement à la lecture :

Si aucun électron ne remplit la grille flottante, le transistor se comporte comme un MOS classique.

L'application de  $V_{TH} \approx 3V$  sur la grille de commande autorise le passage d'un courant de drain, ce qui correspond à la lecture d'un niveau logique « 1 ». (fig. 22 à gauche)

Inversement, si la grille flottante est chargée par des électrons, la tension  $V_{TH}$  appliquée sur la grille de commande ne provoque plus l'inversion et la création de canal. La structure reste isolante entre drain et source, ce qui correspond à la lecture d'un niveau logique « 0 ». (fig. 22 à droite)



**fig. 22** : Lecture d'une cellule de mémoire flash  
Crédits : P.Hirel/Spectrosciences 2008

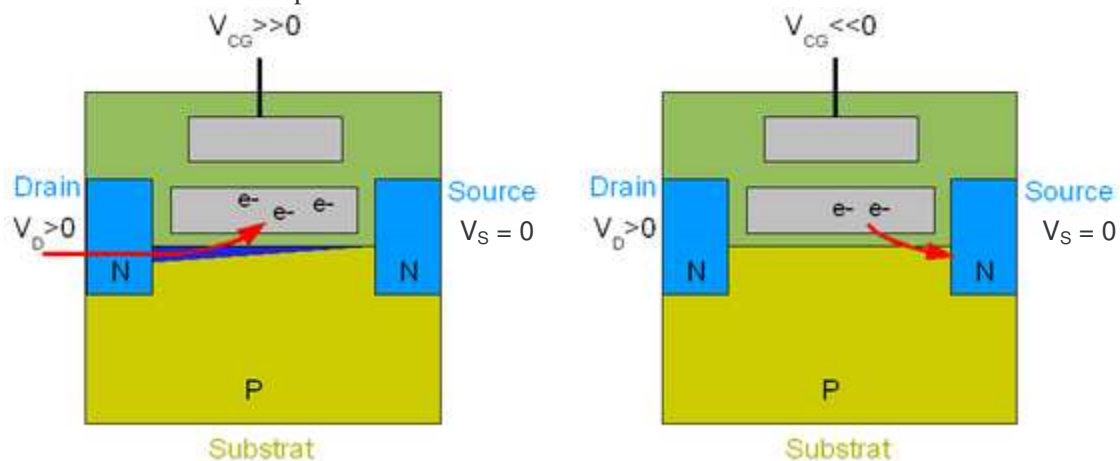
#### Écriture :

L'ajout d'électrons dans la grille flottante se fait généralement par une technique appelée injection d'électrons chauds (voir fig.23).

Une tension élevée ( 5 à 10V) est appliquée à la grille de contrôle pour provoquer la formation du canal, et simultanément un potentiel positif est appliquée au drain ; ceci provoque le pincement du canal.

Les électrons sont néanmoins accélérés dans le canal (effet de  $V_{DS}$ ), et passent au travers de l'isolant vers la grille flottante par effet tunnel. Il ne peuvent pas faire marche arrière car ils n'ont plus assez d'énergie : ils sont emprisonnés dans la grille flottante.

Pour retirer les électrons excédentaires de la grille flottante, c'est l'effet tunnel inverse qui est utilisé, (effet tunnel Fowler-Nordheim). Un potentiel de l'ordre de  $-10\text{ V}$  ( $< 0$ ) est appliqué à la grille de contrôle, repoussant ainsi fortement les électrons, et leur fournissant assez d'énergie pour qu'ils passent l'oxyde par effet tunnel et soient évacués par la source.



**fig. 23 :** Écriture et effacement dans une mémoire flash.  
Crédits : P.Hirel/Spectrosciences 2008

#### Durée de vie :

Les opérations d'écriture et d'effacement soumettent la grille flottante à rude épreuve ; selon la qualité et le type d'écriture, on estime qu'une mémoire flash peut supporter de 10000 à 100000 cycles.

Le principe même de l'écriture et d'effacement illustre la notion d'accès par bloc aux données : On adresse toute une ligne à la fois pour ces opérations !

Les lectures ne causent par contre aucune usure.

Dans les applications exigeantes (cas des disques durs SSD par ex.), le contrôleur de disque met en jeu des algorithmes chargés de répartir les écritures de manière uniforme sur l'ensemble de la mémoire flash. Cette technique permet d'améliorer significativement la durée de vie du support, et ceci est d'autant plus vrai que la capacité devient grande.

### 3. Le stockage optique

Arrivé sur le marché au début des années 1980, le *Compact-Disc* (CD) sert d'abord de support à la musique (CD-Audio). Son utilisation évoluera vers l'enregistrement de données (CD-ROM), les clips musicaux ou les films (CD-Video).

Les premiers prototypes, produits par Philips mesuraient 115 mm de diamètre, avec un codage sur 14 bits et une capacité de 60 minutes. Sony insista pour qu'on adopte un codage sur 16 bits et une durée de 74 minutes, ce qui a augmenté la taille du disque à 120 mm.

Selon les rumeurs, la capacité du CD 12 centimètres a été augmentée à 74 minutes, à la demande de Herbert von Karajan, pour que la version la plus lente de la 9<sup>e</sup> symphonie de Beethoven tienne sur un seul CD. Sony indique que c'est à la demande de l'épouse de son président, pour ces mêmes motifs...

Le DVD quant à lui, n'arrivera sur le marché que vers la fin des années 90, offrant une capacité de stockage environ six fois plus grande, ce qui lui permet d'être le support de nombreuses utilisations, d'où son nom : *Digital Versatile Disk*.

Ces deux médias de stockage que sont le CD et le DVD utilisent tous deux le même principe de lecture : la réflexion d'un laser sur une surface

**COMPACT  
disc  
DIGITAL AUDIO**



#### 3.1 Principe

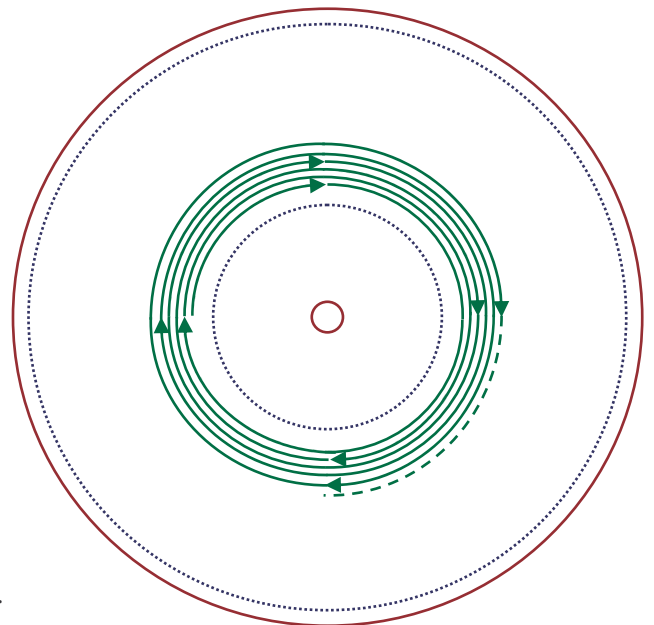
CD et DVD comportent 1 seule piste hélicoïdale, lue du centre vers la périphérie.  
(plusieurs pistes dans le cas d'un média multicouches)  
Longueur :  $\approx 5$  km pour le CD ;  $\approx 11$  km pour le DVD

Dimensions : Diamètre : 12 cm ; épaisseur 1,2 mm  
Diamètre trou central : 15mm  
Zone enregistrable : de 23 à 58,5 mm du centre.  
Zone des données : de 25 à 58 mm du centre.

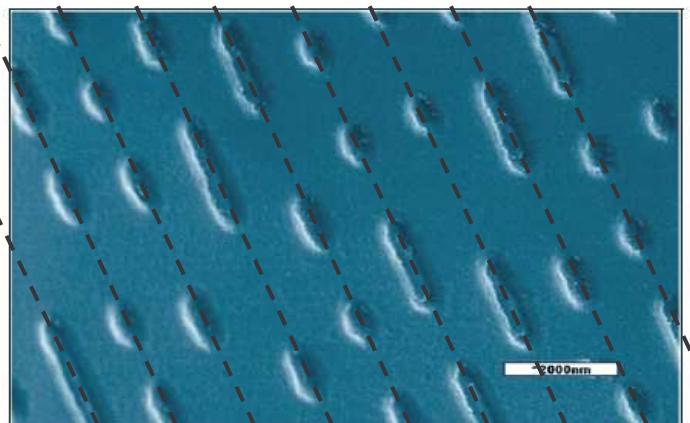
Capacités de stockage : CD  $\rightarrow$  600 à 800MO  
DVD  $\rightarrow$  4,7 GO par couche  
BLU RAY  $\rightarrow$  25 GO par couche

Stockage des données : Succession de creux (pits ou cuvettes) tout au long de la piste.  
Un faisceau laser suit la piste, à vitesse linéaire constante.  
(environ 1,2 m/s pour le CD et 4m/s pour le DVD)

Pour le CD, les cuvettes ont une largeur standard de 125 à 500 nm et une longueur qui peut varier entre 833 nm et 3,5  $\mu\text{m}$ .  
L'espace entre 2 tours de piste est de 1,6  $\mu\text{m}$ .



**fig. 24** : La piste en hélice et les cuvettes matérialisant les données enregistrées.





La lecture consiste à exploiter la variation de la lumière réfléchiée par le disque, selon que le faisceau laser éclaire une surface plate ou une région avec cuvette.

L'impact du faisceau est un spot de diamètre voisin de  $1\mu\text{m}$  (CD audio)

La profondeur des cuvettes est telle que la lumière réfléchiée sur le fond est en opposition de phase avec celle réfléchiée sur le « plat ».

L'intensité lumineuse réfléchiée varie ainsi entre 40 et 70% de l'intensité incidente.

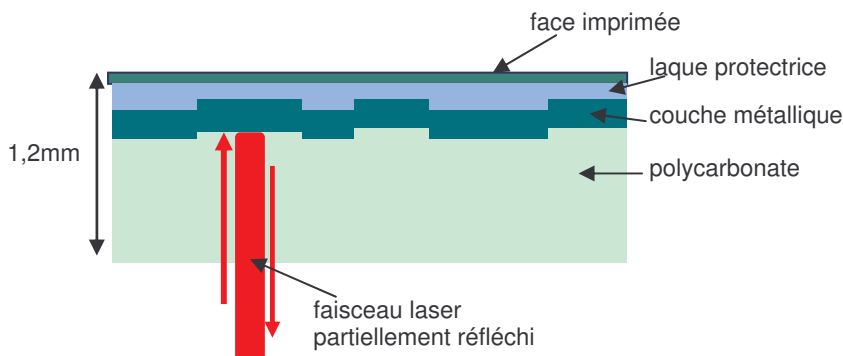


fig. 25 : Lecture des données par faisceau laser

Pour qu'il en soit ainsi, la lumière doit être *monochromatique* (laser), et la profondeur des cuvettes doit être de  $\lambda/4$ .

Pour le CD audio, le faisceau laser a une longueur d'onde  $\lambda \approx 780\text{ nm}$ , tandis que les cuvettes ont une profondeur de  $125\text{ nm}$ .

Or  $780 / 4 \neq 125$  !!

Il faut tenir compte de l'indice de réfraction du polycarbonate :  $n \approx 1,55$

Dans ces conditions :  $780 / (4 \times 1,55) \approx 125$  !!

Une intensité réfléchiée constante donne des « 0 » logiques, et les « 1 » correspondent aux variations d'intensité. (cf. fig. 26)

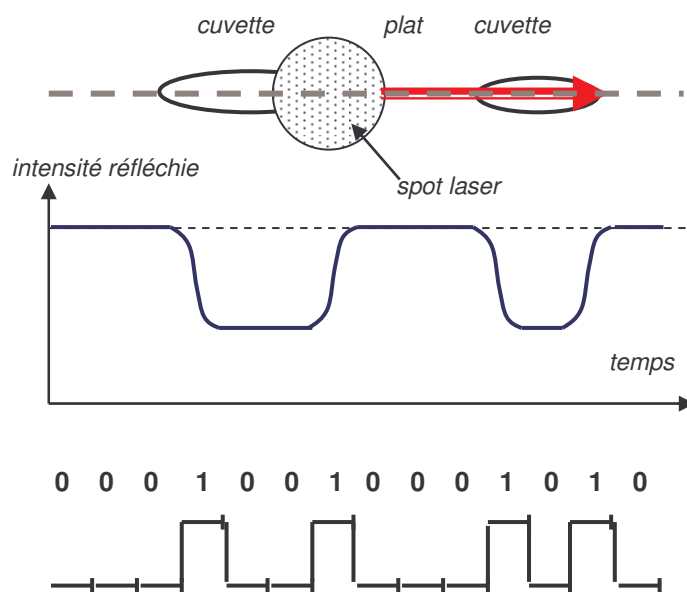


fig. 26 : Variation de l'intensité lumineuse réfléchiée et états logiques correspondants

### 3.2 Le système de lecture.

Le système de lecture comporte une source laser (diode laser) qui éclaire une face du disque après passage au travers d'une lame semi-transparente et d'un dispositif de focalisation.

Le faisceau réfléchi illumine un détecteur (photodiode) multizones (voir plus loin)

fig. 27 : Le système optique de lecture d'un CD ou d'un DVD

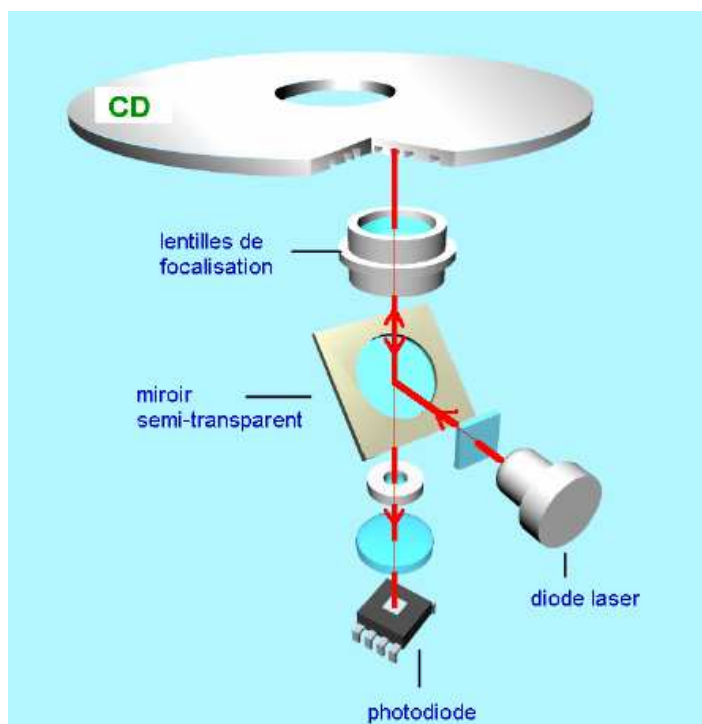


fig. 28 : Détails de la mécanique d'entraînement

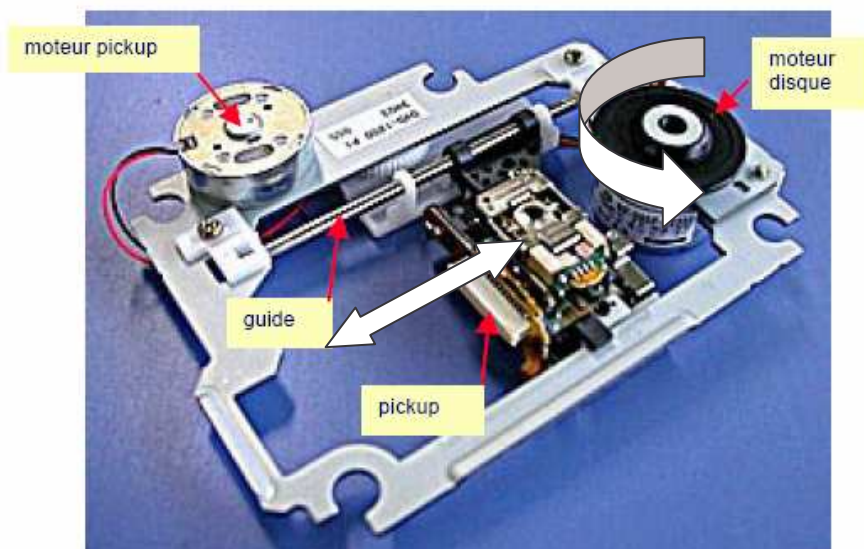
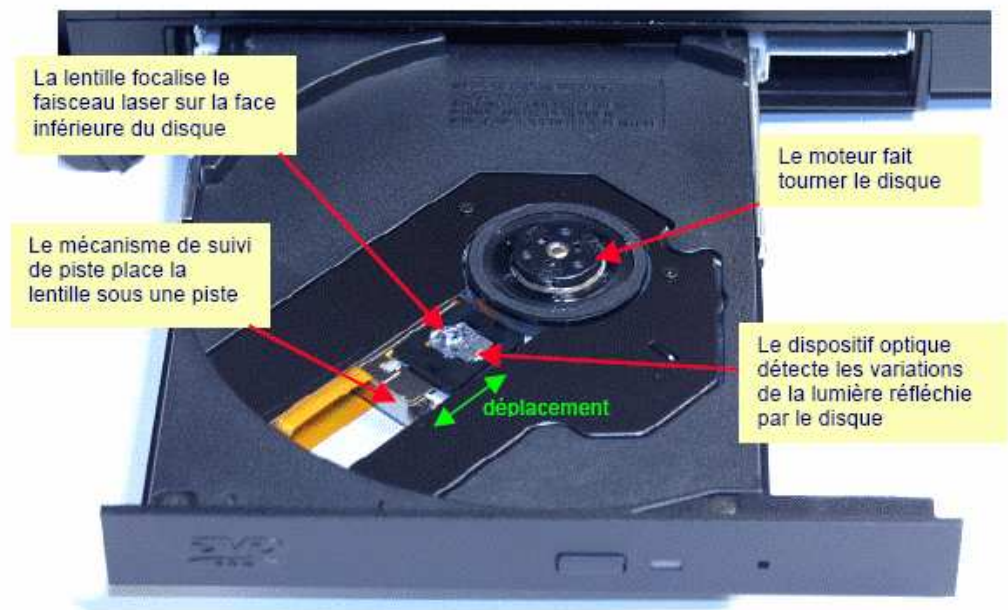
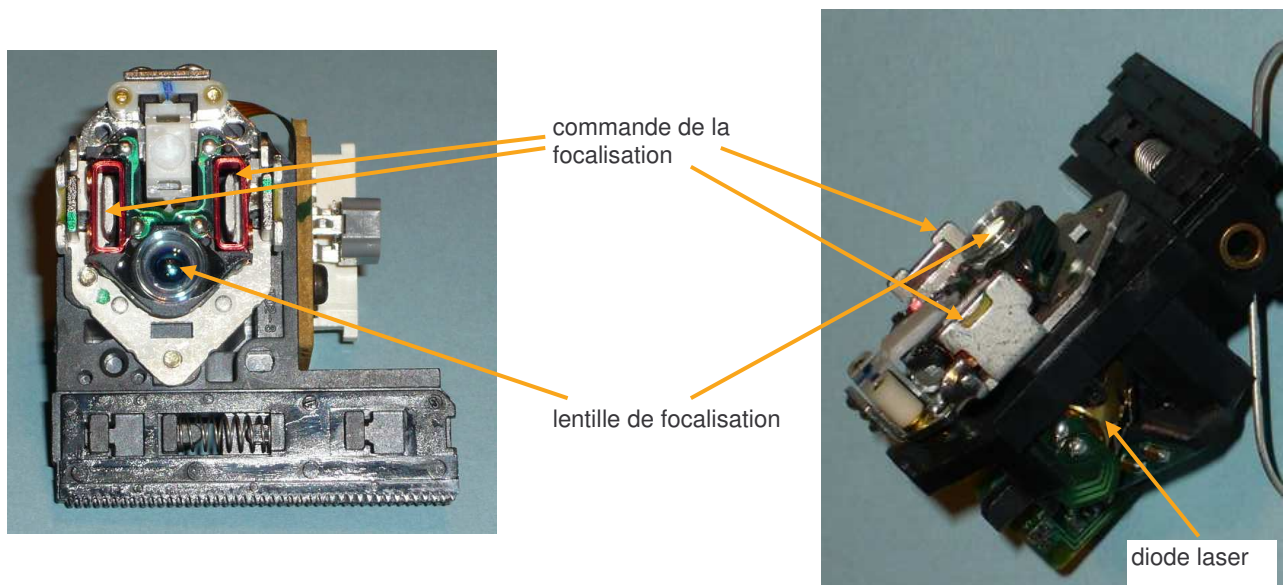


fig. 29 : Détails du bloc optique



### Le guidage du faisceau lumineux.

Le guidage du faisceau lumineux s'effectue selon 2 composantes : La focalisation, afin de minimiser le diamètre du spot sur le disque, et le suivi de la piste.

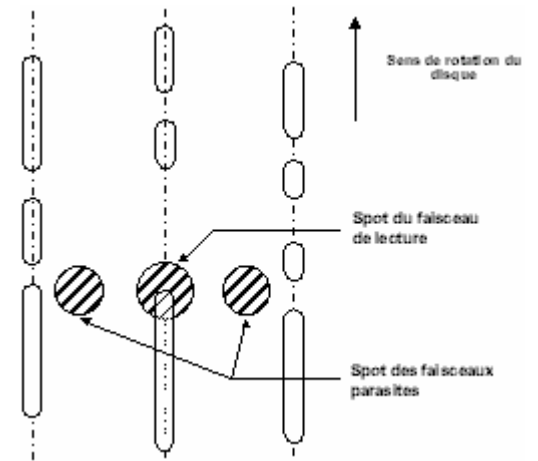
Il faut en outre assurer une régulation de la vitesse du moteur « disque », afin d'assurer la lecture des données à vitesse linéaire constante.

### Lecture de CD.

Juste après la diode Laser se trouve un réseau diffracteur qui va créer 2 rayons « parasites » de chaque côté du faisceau de lecture. Ces faisceaux ne vont donc pas balayer la piste elle-même mais de part et d'autre de la piste.

Le détecteur optique final comporte 6 zones (A, B, C, D, E et F)  
Les 4 zones centrales A, B, C et D reçoivent la lumière du faisceau de lecture ; la comparaison des intensités illuminant chaque zone permet de détecter une erreur de focalisation du faisceau.

Si le faisceau principal s'écarte d'un côté ou de l'autre de la piste, la quantité de lumière reçue par les cellules E et F devient différente. On peut ainsi élaborer une information d'erreur de position (erreur de tracking)



### Lecture de DVD.

Pour la lecture des DVD-ROM, l'asservissement de position n'utilise en général pas la technique du faisceau triple, mais une technique de détection de phase donnant de meilleurs résultats. On compare l'éclairement des zones A, B, C et D.

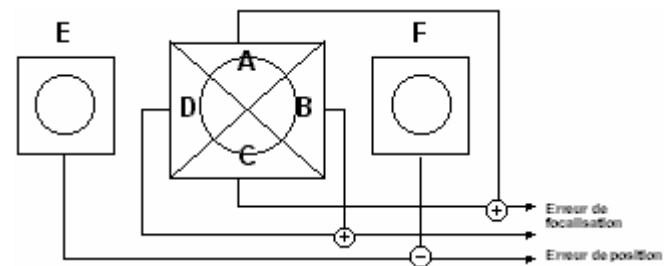


fig. 30 : Mise au point et guidage du laser par le système à 3 faisceaux

### Asservissement de vitesse.

De la lecture des données, on peut facilement extraire une horloge numérique ; la comparaison de cette fréquence à un oscillateur de référence permet de commander la vitesse de rotation du moteur d'entraînement du disque.

## **3.3 Densité des informations.**

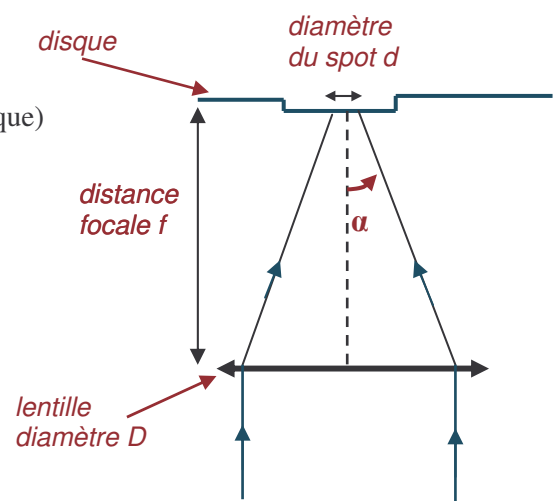
Elle est liée à la taille du spot (impact du faisceau laser sur le disque)  
A cause de la diffraction, le spot ne peut pas être ponctuel.

On définit l'ouverture numérique (numerical aperture) :

$$NA = \sin \alpha = \frac{\frac{D}{2}}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + f^2}}$$

D'où une approximation du diamètre du spot :

$$d \approx 1,22 \frac{\lambda}{NA}$$

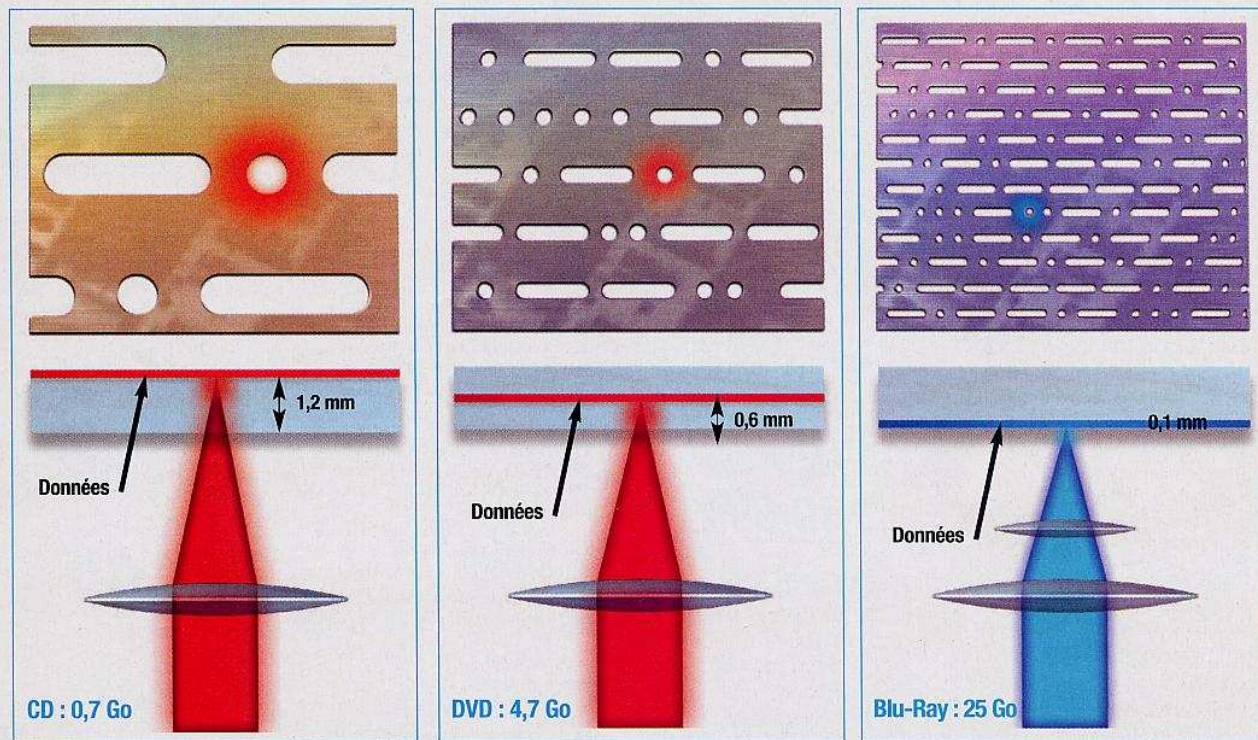


Plus la longueur d'onde du faisceau laser est faible (plus sa couleur évolue du rouge au bleu), et plus la collimation du faisceau sera efficace ; on pourra ainsi lire des données stockées sous une forme plus dense.

Pour le CD, on adopte  $\lambda = 780$  nm (infra rouge) ; pour le DVD,  $\lambda = 650$  nm (rouge), et pour le blu ray,  $\lambda = 405$  nm (bleu).



fig. 31 : LA DENSITÉ DE GRAVURE DES SUPPORTS OPTIQUES



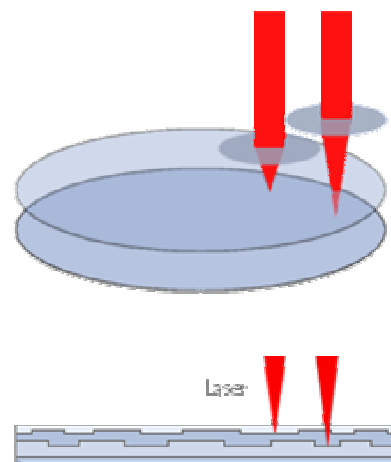
largeur piste :	1,6μm	0,74μm	0,3μm
longueur d'onde	780nm (IR)	650nm (rouge)	405nm (bleu)
ouv. numérique	0,45	0,6	0,85

Remarque : DVD simple ou double couche (4,7 GO ou 9,4 GO)

Les DVD existent en version «simple couche» et «double couche» (en anglais «Dual Layer», noté *DL*). Ces derniers sont constitués d'une première couche semi réfléchissante à base d'or et d'une seconde couche réflexive opaque à base d'argent, séparées par une couche de liaison (*bonding layer*).

Pour lire ces deux couches le lecteur doit disposer d'un laser pouvant changer d'intensité et d'un système optique pouvant changer de focale.

- Avec une intensité faible le rayon est réfléchi sur la surface dorée supérieure,
- Avec une intensité plus élevée le rayon traverse la première couche et est réfléchi sur la surface argentée inférieure.



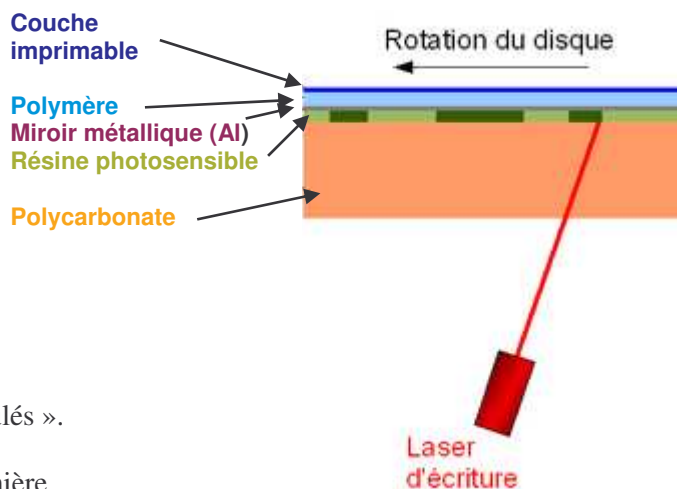


### 3.4 Les médias enregistrables.

Devant le besoin de stockage de données audio et vidéo (plus ou moins légales ...) des disques enregistrables une fois (-R) et ré-enregistrables (-RW) sont apparus sur le marché.

Pour simplifier, le rôle des creux (dans les disques pressés) est tenu ici par le pouvoir transparent d'une résine organique.

Lors de l'écriture, le laser (configuré à une puissance bien supérieure à celle utilisée pour la lecture) va "brûler" localement le matériau photosensible, le rendant opaque, aux endroits correspondant aux données à inscrire. La résine utilisée est une cyanine (verte ou bleue)



A la lecture, le laser est réfléchi par le miroir métallique ; l'intensité réfléchie est maximale dans les endroits où la résine photosensible est intacte, et minimale aux endroits ayant été « brûlés ».

Comme pour les médias préenregistrés, une lumière d'intensité constante est codée en « 0 » et les transitions d'intensité sont codées en « 1 ».

Pour un média réenregistrable (RW), le processus de « gravure » doit être réversible.

Le matériau photosensible est de type *polycristallin*, à base de produits tels que l'argent, l'indium, l'antimoine et le tellure.

L'écriture est réalisée par des impulsions laser de forte puissance ( $> 10\text{mW}$ ), qui liquéfient localement le matériau (température  $600$  à  $800^\circ\text{C}$  !!) ; le refroidissement l'amène dans sa phase *amorphe*, où il sera opaque. L'effacement est réalisé par des impulsions laser plus longues, mais de puissance plus faible ( $\approx 5\text{ mW}$ ) ; la fusion n'a pas lieu et le refroidissement amène le matériau en phase *cristalline* où il redevient transparent.

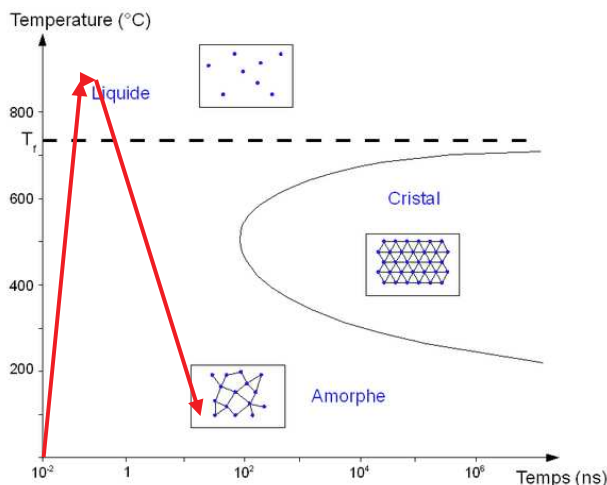


fig. 32 : Écriture par impulsion laser courte et intense

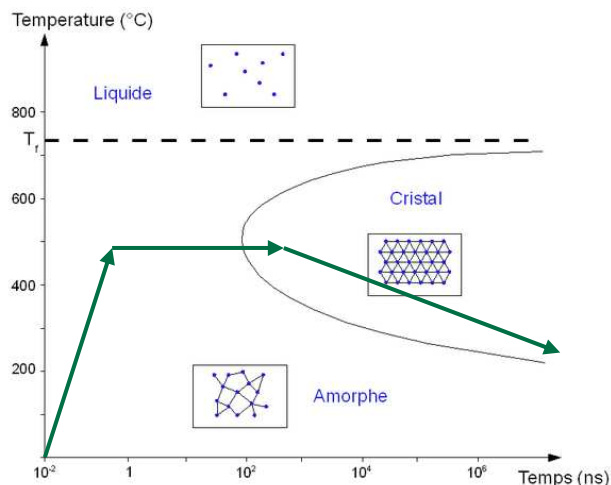


fig. 33 : Effacement par impulsion laser « longue » et de puissance modérée

#### Durée de vie des médias enregistrables.

Les cyanines des médias (R), tout comme les composés polycristallins des médias (RW) sont chimiquement instables. Notamment, la transparence diminue dans le temps. On estime à (bien) moins de 10 ans la durée de conservation des données sur un média optique enregistrable.

Il va de soi que l'exposition à la lumière permanente est un facteur de vieillissement accéléré !

### Le sillon de guidage

Afin de pouvoir guider le faisceau laser pour la gravure, la face interne du polycarbonate d'un média enregistrable comporte un sillon hélicoïdal pré-gravé.

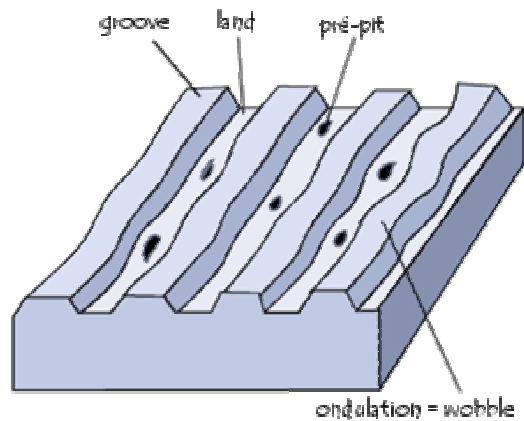
Les bords de ce sillon de « pre groove » ondulent périodiquement, ce qui permet l'asservissement de la vitesse de rotation du disque, par récupération de la fréquence d'ondulation.

Par exemple, pour le CD, l'amplitude des oscillations est de 30 nm, avec une longueur d'onde de 60  $\mu\text{m}$ .

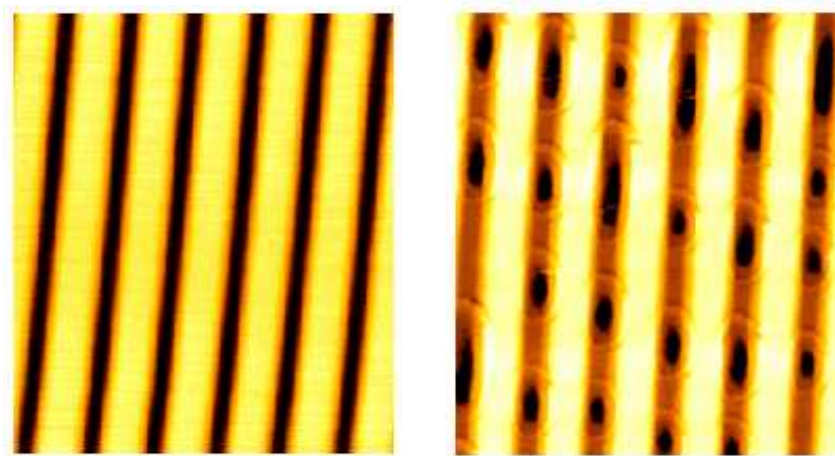
Pour le DVD, il existe plusieurs normes qui ont conduit aux familles -R (ou -RW) et + R (ou + RW).

Pour la norme - R, la fréquence d'ondulation est de 141 kHz, alors qu'elle est de 820 kHz pour le + R

(mais ce ne sont pas les seules différences entre ces 2 normes).



**fig. 34 :** Le sillon de « pre groove » d'un média enregistrable



**fig. 35 :** A gauche, un CD R vierge ; à droite, le même CD après gravure