

Le disque compact

Jusqu'à l'avènement de l'enregistrement digital trois méthodes avaient été utilisées pour l'enregistrement du son : le disque, la bande sonore des films et la bande magnétique. Ces enregistrements sont appelés analogiques car le signal enregistré est proportionnel à l'amplitude du son.

Dans tout système d'enregistrement le premier élément est un microphone qui transforme l'amplitude du son en amplitude de tension électrique (fig. 69.1). Sur le disque analogique, le dessin de la gravure représente l'amplitude du son. De fait, l'oscillation du burin de gravure est corrigée : les sons graves sont écrasés car leur gravure demanderait trop de place, et les aigus sont amplifiés. Lors de la reconstitution du son les vibrations de l'aiguille, passant dans les sillons du disque, sont captées, amplifiées, et les modifications apportées lors de l'enregistrement sont corrigées en sens inverse : les sons graves sont davantage amplifiés que les sons aigus. L'affaiblissement relatif des sons aigus lors de la reproduction permet de réduire le bruit de frottement des aiguilles.

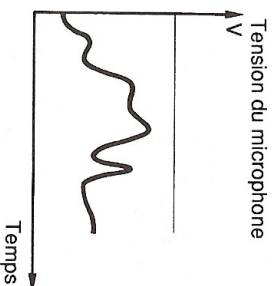


Fig. 69.1. La variation dans le temps de la tension électrique du microphone décrit le son.

Sur la bande sonore d'un film la surface au-dessus de la courbe de la figure 69.1 apparaît noire. Le film est éclairé par une lampe, et la lumière qui passe à travers un élément de longueur de la bande sonore est autant plus intense que la partie noire est petite. Cette lumière tombe sur une cellule photoélectrique dont le courant, proportionnel à l'éclairage, actionne le haut-parleur après amplification. Dans l'enregistrement magnétique la bande est magnétisée par le courant de la tête d'enregistrement, proportionnellement à la tension microphonique, et la tête lectrice délivre un signal électrique suivant la magnétisation de la bande.

Lors du procédé d'enregistrement et de reproduction, le son subit des distorsions. Certaines distorsions sont dues à l'imperfection inévitable du système électroacoustique, d'autres résultent d'un compromis entre le prix d'un perfectionnement et la perception de ce perfectionnement par l'auditeur. Ces distorsions appauvrissent le signal initial.

D'autre part, des sons parasites, tels que le bruit des moteurs et surtout celui du frottement de l'aiguille de lecture sur le disque, rajoutent un signal perturbateur appelé bruit. Quel est l'effet de l'appauvrissement sonore ou du bruit sur l'auditeur ?

Si vous habitez le boulevard Haussmann, vous ne percevez pas avec la même intensité le poste de radio de votre voisin de palier à 2 h de l'après-midi ou à 2 h du matin. Nos organes sensoriels ne détectent pas la différence absolue entre deux signaux mais leur différence relative. En augmentant de deux unités l'intensité d'un son de 10 unités l'auditeur ne perçoit qu'une variation de 20 %, alors que si le son initial avait eu une intensité d'une unité, l'auditeur aurait perçu une augmentation d'un facteur de 3. Pour cette raison, en acoustique il est plus pratique d'utiliser des unités qui expriment la variation fractionnelle plutôt que la variation absolue. Le rapport des amplitudes D , mesuré en décibels (dB), est défini comme $D = 20 \cdot \log_{10} \frac{A_1}{A_2}$. (L'amplitude du son peut être mesurée par sa pression.) Comme l'intensité du son I est proportionnelle à A^2 , on peut aussi écrire $D = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_1}{I_2}$. Un rapport d'intensité $\frac{I_1}{I_2} = 2$ correspond à $D \approx +3$ dB, alors que $\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2}$ donne $D \approx -3$ dB.

La sensibilité de l'oreille humaine dépend de la fréquence du son. Sur la figure 69.2 nous représentons cette sensibilité. (Avec l'âge la sensibilité vers les sons aigus diminue.) Au vu de cette courbe il est évident que cela ne vaut pas la peine de transcrire ou d'enregistrer des sons dont les fréquences dépassent 16 – 20 kHz.

Nous entendons différemment le son du « la » normal joué par un diapason, par un piano ou un violon, car le timbre d'un son dépend de son contenu d'harmoniques. Plus important est un orchestre, plus complexe sera son spectre sonore. Il n'y a pas d'instrument de musique qui émette un son aigu de 16 kHz, mais les harmoniques qui dominent les détails fins du son peuvent même atteindre des fréquences supérieures à cette valeur. Pourtant, lors d'un cycle d'enregistrement-reproduction, on perd un peu des basses fréquences et beaucoup plus des hautes. Un matériel de haute fidélité (en anglais : *high fidelity* = hifi) a une caractéristique plate entre 20 Hz et 16 kHz. Sur la figure 69.3 nous montrons la réponse de fréquence d'une platine cassette moderne réglée à une puissance de sortie moyenne. De plus, les amplificateurs hifi possèdent des réglages indépendants pour les sons graves et les aigus permettant de restaurer les pertes d'intensité éventuellement subies aux deux extrémités de la bande de transmission.

L'autre aspect d'un enregistrement est sa dynamique, c'est-à-dire le rapport entre les sons les plus forts et les plus faibles. Les plus forts sons saturent souvent amplificateurs et haut-parleurs, tandis que les plus faibles restent noyés dans le bruit. Le meilleur enregistrement analogique avec un matériel professionnel atteint une dynamique (entre *fortissimo* et *pianissimo*) de 75 dB, donc un rapport d'intensité de $3 \cdot 10^7$. Le matériel amateur reste bien en dessous de ces performances : pour un disque à microillons 35 à 40 dB, pour une platine cassette avec des circuits récents de traitement antibruit (par exemple Dolby) de 60 dB environ.

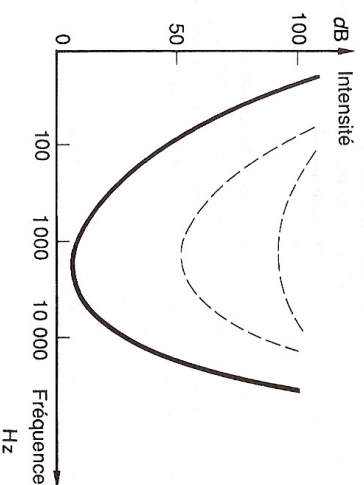


Fig. 69.2. Seuil de sensibilité de l'oreille humaine en fonction de la fréquence du son (audiogramme). Les ordonnées de la courbe continue représentent les intensités du générateur, nécessaires pour être entendues. Plus bas est un point, plus grande est la sensibilité. En lignes discontinues : courbes d'égale sonorité (sons perçus avec la même sensation d'intensité).

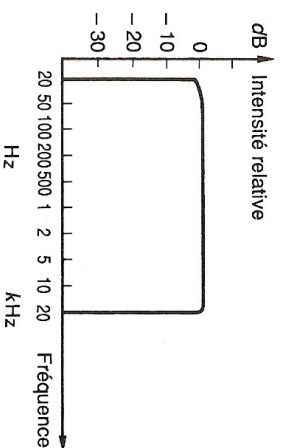


Fig. 69.3. Intensité relative du son reproduit par une platine cassette performante en fonction de la fréquence du son.

Les deux types d'enregistrement analogiques répandus, le disque et la cassette, ont chacun des défauts spécifiques. À l'état neuf la qualité du disque est excellente, mais elle se dégrade après chaque écoute à cause de son usure. Une cassette bien traitée se dégrade moins, mais les cassettes pré-enregistrées n'atteignent pas la qualité du disque ou des copies faites à la maison : l'inscription sur la bande est séquentielle,

et la duplication en usine se fait à grande vitesse, ce qui fait perdre dans les aigus. (Inscription séquentielle signifie que les codes successifs sont enregistrés sur la bande dans l'ordre de l'écoute, alors que toutes les gravures d'un disque sont reproduites simultanément sous la presse de fabrication.)

L'enregistrement digital du son est exempt de tous ces défauts. Un codeur digital-analogique examine à intervalles réguliers (échantillonnage) la variation d'amplitude du signal et donne numériquement (comme un voltmètre digital) cette amplitude. Ce nombre est enregistré en forme binaire sur un support (disque ou bande) d'où il est relu par le décodeur qui restitue l'information analogique ; puis celle-ci entre dans la chaîne amplificateur-haut-parleur traditionnelle.

Sur la figure 69.4 nous reprenons la variation de l'amplitude avec le temps, de la figure 69.1. Au bout de chaque durée d'échantillonnage τ_e , l'amplitude est mesurée et codée. En simplifiant nos considérations, pour un codage linéaire d'un mot écrit en 2 octets, la dynamique de l'amplitude va de 1 à 65 536, ce qui correspond à $D \approx 96$ dB ; cette dynamique est 4 000 fois supérieure à celle d'une cassette. (1 unité binaire — en anglais « binary unit » — s'appelle 1 bit ; 8 bits = 1 octet.) Comme le codage est exprimé en entiers, un signal dont l'amplitude est par exemple 19,4 est codé 19. L'erreur de 0,4 unité appelée erreur de quantification, n'est importante que pour les sons faibles. Une autre erreur est commise si la variation de l'amplitude est trop rapide par rapport à la durée d'échantillonnage. Sur la figure 69.4 le codeur n'affiche pas l'amplitude du point (a) mais celle du point (b). Afin d'éviter cette dernière erreur la fréquence d'échantillonnage $f_e = 1/\tau_e$ doit être supérieure à la fréquence maximale qu'on veut enregistrer : $f_{\max} \approx 20$ kHz.

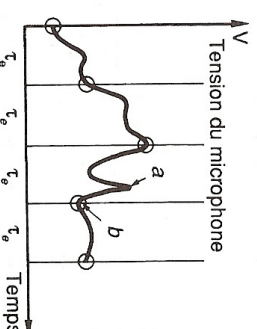


Fig. 69.4. Codage linéaire des amplitudes. La case horizontale représente la durée d'échantillonnage τ_e .

Comme on n'entend pas les sons de fréquence supérieure à 16 kHz, on limite avec des filtres la bande à transmettre à $f_{\max} < 20$ kHz. On peut montrer que pour tout échantillonnage une fréquence parasite $f_{\text{par}} = f_e - f_{\max}$ apparaîtra dans le spectre codé. Si l'on

veut éviter d'entendre ces parasites il faut que f_{par} ne soit plus audible, donc supérieure à 20 kHz. La fréquence d'échantillonnage doit donc être $f_e > 2f_{\text{max}}$. Pour des raisons de compatibilité avec les systèmes vidéo en Europe la fréquence d'échantillonnage du disque compact est choisie $f_e = 44,1$ kHz.

Les données numériques ne sont pas enregistrées telles qu'elles sortent du convertisseur analogique-numérique. Tout d'abord il faut rajouter certains signaux de contrôle desquels nous parlerons plus tard. D'autre part, le nombre de bits serait trop important pour être stocké. On transcrit donc le code de conversion en un code d'enregistrement qui est le plus approprié au support choisi (bande magnétique digitale ou disque à lecture optique).

Quand un enregistrement est reproduit en grand nombre, on ne peut pas éviter que quelques erreurs se produisent. Sur un disque analogique, le défaut de pressage le plus courant est un bruit qui pendant quelques tours du disque revient périodiquement. Dans un enregistrement numérique un faux code représente un son d'un volume complètement différent. Plusieurs codes correcteurs d'erreurs ont été développés pour détecter les erreurs et les corriger au mieux. Nous en présentons ici deux exemples simples : le code de parité et la sommation des codes.

Prenons par exemple une série d'amplitudes $a = 5$, $b = 17$, $c = 19$, $d = 15$ et $e = 10$, exprimées en binaire comme 101, 10001, 10011, 1111 et 1010. La parité du zéro est paire, celle du 1 est impaire. La parité du nombre binaire est la somme des parités des chiffres le composant (impaire + impaire = paire). Ainsi, les parités successives des nombres précédents sont 0, 0, 1, 0 et 0; et l'on rajoute à la fin de chaque mot cette parité. Nos codes deviennent donc 1010, 100010, 100111, 11110 et 10100. Si un nombre impair d'erreurs se glisse dans un code, la parité est changée. (Par exemple, si à la place de 101 nous lisons 111, la parité du mot n'est plus 0 mais 1.)

La deuxième méthode peut non seulement détecter l'erreur, mais aussi la corriger. Nous additionnons les mots deux par deux et nous écrivons ces sommes aussi sur l'enregistrement. Si après lecture nous trouvons une seule fausse somme dans une série, les codes simples sont bons mais l'adde somme est fausse. Si nous trouvons deux sommes successives qui se révèlent fausses, par exemple $b + c$ et $c + d$, alors que les autres sont correctes, il est évident que c'est le mot c qui était mal lu. On peut le retrouver par l'opération $c = [(b+c) + (c+d) - b - d]/2$. La correction suppose donc que le lecteur effectue les calculs décrits et garde en mémoire le son jusqu'à l'exécution de la correction. Si plusieurs mots sont détruits, le lecteur remplace les mots manquants par interpolation.

Le codage est très serré sur le support, et un défaut détruit les mots souvent en sàve. Si l'on veut conserver les sommes, il faut les inscrire à une certaine distance des valeurs simples. Dans un enregistrement, des séries de valeurs et des séries de sommes sont entrelacées suivant une séquence prédéterminée, et le lecteur doit mémoriser les valeurs jusqu'à la lecture (et le contrôle) des sommes correspondantes.

Les vrais codes correcteurs d'erreurs sont plus complexes et sont capables de corriger aussi bien les erreurs ponctuelles que les erreurs en sàve.

Les codes sur le disque compact sont représentés par de minuscules collines hautes de 0,16 μm et larges de 0,6 μm . La distance entre deux tours de la spirale est 1,6 μm . Le début et la fin d'une colline signifient un 1; quand sur une longueur d'un μm environ il n'y a pas de changement d'état, c'est un 0. Le faisceau laser éclaire ces collines; quand il tombe sur un 0, la lumière est réfléchie sur une cellule photo-électrique, quand il tombe sur un 1, elle est diffusée. Pour augmenter la sensibilité de la lecture, le lecteur est construit comme un interféromètre à lumière polarisée. De toute façon, comme la lecture est binaire, ce n'est pas l'intensité lumineuse réfléchie qui détermine l'amplitude du son mais seulement son existence ou son inexistence.

La qualité d'écoute du disque compact est nettement supérieure à celle du disque analogique. Sur le boîtier du disque on trouve les lettres A et D inscrites dans trois cases. $\begin{bmatrix} D \\ D \\ D \end{bmatrix}$ signifie que l'enregistrement, le traitement du signal et sa reproduction sont digitalisés : ce sont des disques de la meilleure qualité technique. Les matrices d'origine de l'enregistrement analogique sont toujours de qualité technique supérieure à leurs reproductions d'époque : on réédite donc les anciens enregistrements d'une haute qualité artistique en corrigeant par filtres analogiques, ou plus souvent par traitement digital, leurs imperfections techniques. Dans ce cas l'inscription est $\begin{bmatrix} A \\ A \\ D \end{bmatrix}$ ou $\begin{bmatrix} A \\ D \\ D \end{bmatrix}$. Écoutez sur une chaîne peu performante un disque $\begin{bmatrix} D \\ D \\ D \end{bmatrix}$ ou $\begin{bmatrix} A \\ D \\ D \end{bmatrix}$, la différence n'est pas toujours décelable.

Que le support digital soit le disque à lecture par laser ou la bande magnétique, la qualité d'écoute reste invariable dans le temps : le faisceau laser n'use pas le disque, et l'usure modérée de la bande n'altère pas la lecture digitale. La qualité d'écoute et la conservation de cette qualité sont probablement les atouts principaux de l'enregistrement digital.