

# Techniques du « sur- échantillonnage » dans les convertisseurs numérique/ analogique

par Ch. Dartevelle.

*Dans le cas du système « Compact-Disc », à lecture par faisceau laser, la dernière étape de transformation des signaux consiste à passer de leur codage numérique à leur équivalence analogique, représentative des vibrations acoustiques, captées par les microphones de la prise de son.*

*Une opération beaucoup plus délicate qu'il n'y paraît à première vue, le signal d'échantillonnage (44,1 kHz) et ses harmoniques devant être filtrés de telle sorte qu'ils soient atténués d'au moins 50 dB par rapport à la bande de fréquences (20 Hz-20 kHz) du signal audio-analogique.*

*Mise au point dans les laboratoires de recherches de Philips à Eindhoven, la technique dite de « sur-échantillonnage » constitue une très intéressante solution à ce problème.*

## Principes du « sur-échantillonnage »

En sortie des convertisseurs numérique/analogique utilisés dans le système « Compact-Disc », on recueille normalement des signaux du type « en marches d'escalier », dont les différentes amplitudes sont fonction de chacun des mots du code à 16 bits utilisé, et demeurent constantes jusqu'à l'arrivée du mot suivant.

Pratiquement ces marches (a) décrivent un tracé reproduisant approximativement l'enveloppe du signal analogique d'origine (b), comme on peut le vérifier sur le dessin de la figure 1, où l'on a représenté un signal sinusoïdal à 4,41 kHz, échantillonné à une fréquence de 44,1 kHz.

Semblables marches sont caractérisées par des fréquences situées au-delà du spectre audio (20 Hz-20 kHz), et doivent être éliminées au moyen d'un filtre passe-bas analogi-

que, présentant des caractéristiques telles que leur niveau, en sortie, se situe au moins à 50 dB en dessous du signal audio.

Il va sans dire que, pour parvenir à ce résultat, la réalisation d'un filtre analogique n'est pas sans poser de délicats problèmes, tant au point de vue technique que prix de revient.

C'est pourquoi d'autres solutions ont été envisagées, notamment celles faisant appel au sur-échantillonnage, qui consiste — dans le cas de la formule retenue par les techniciens de Philips — à multiplier par un facteur de 4 la fréquence d'échantillonnage ( $44,1 \text{ kHz} \times 4 = 176,4 \text{ kHz}$ ), et à appliquer la résultante, d'abord à un filtre numérique et, ensuite à un filtre analogique simplifié (du 3<sup>e</sup> ordre), après la conversion numérique-analogique.

L'intérêt de cette technique est évident, et cela pour différentes raisons. Notamment parce qu'il est possible, en procédant de la sorte, d'affiner le profil de la courbe en marches d'escalier recueilli en sortie du convertisseur.

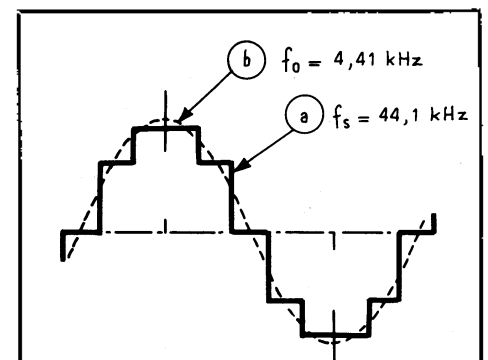


Fig. 1. — En (b), signal analogique à 4,41 kHz, échantillonné à une fréquence de 44,1 kHz (a). Le tracé en « marches d'escalier » reproduit approximativement le signal analogique.

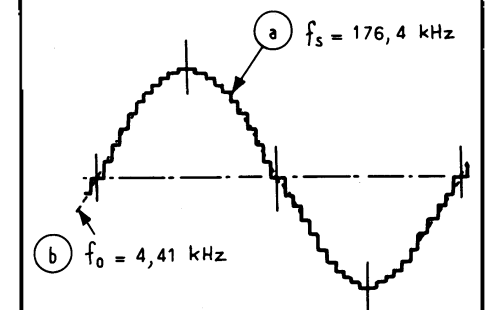


Fig. 2. — En (b), même signal que dans le cas de la figure 1, mais échantillonné cette fois (a) à une fréquence 4 fois plus élevée : 176,4 kHz. Dans ce cas, le tracé en « marches d'escalier » est nettement plus proche de celui du signal analogique.

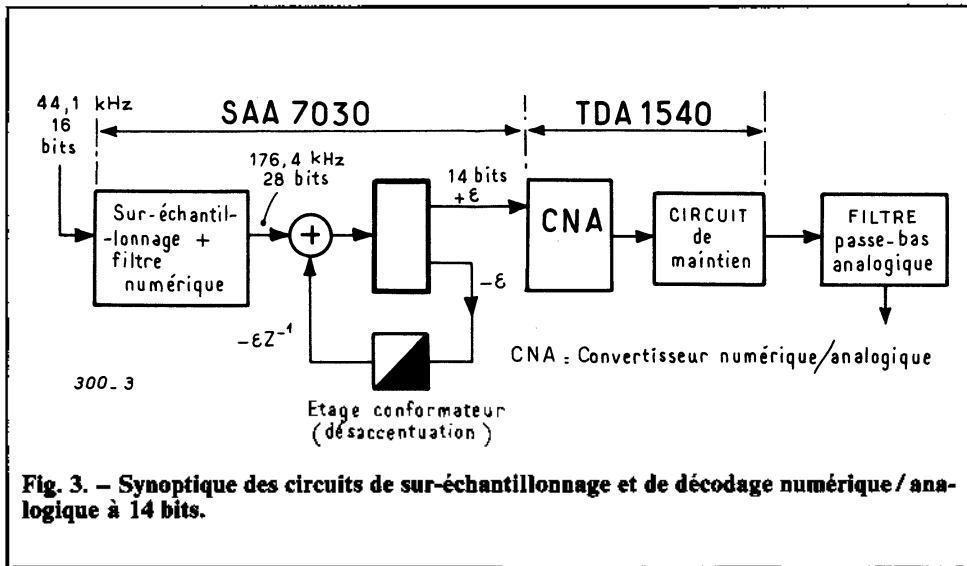


Fig. 3. - Synoptique des circuits de sur-échantillonnage et de décodage numérique / analogique à 14 bits.

En reprenant l'exemple du signal à 4,41 kHz, de la figure 1, mais échantillonné cette fois-ci à une fréquence 4 fois supérieure ( $f_s = 176,4$  kHz), le nombre des marches représentatives (a) du signal audio-analogique (b), ayant suivi la même progression, on obtient de la sorte un tracé se rapprochant nettement plus de l'enveloppe du signal analogique d'origine (fig. 2).

Avec pour principales conséquences, un filtrage beaucoup plus aisé des fréquences correspondant à ces marches et la possibilité d'employer un filtre analogique relativement simple à réaliser.

### Avantages du procédé

La possibilité de filtrer facilement les résidus inhérents au décodage numérique/analogique n'est évidemment pas, loin de là, le seul et unique intérêt du sur-échantillonnage. D'autres avantages découlent en effet de cette technique.

C'est ainsi que le fait de recourir, avant décodage, à un filtre numérique travaillant à 4 fois la fréquence de l'échantillonnage — et caractérisé par d'excellentes performances — permet notamment de se contenter d'un convertisseur numérique-analogique à 14 bits, moins onéreux qu'un modèle 16 bits, mais sans pour autant pénaliser le rapport signal/bruit de l'ensemble qui demeure comparable à celui d'un convertisseur 16 bits, c'est-à-dire de l'ordre de 96 dB.

Un des autres intérêts — et non des moindres — de la technique de sur-échantillonnage vient de ce que le filtre numérique associé ayant une caractéristique de phase linéaire, on ne se trouve pas confronté aux problèmes inhérents à un décodeur nu-

mérique/analogique, à 16 bits, nécessitant un filtre analogique à flancs raides : donc, de réalisation complexe, car devant avoir une réponse en amplitude et en phase, constante entre 20 Hz et 20 kHz, tout en permettant une atténuation d'au moins 50 dB du spectre audio, au-dessus de 24 kHz.

Ce qui nécessite un calage en fréquence très précis des divers éléments constitutifs du filtre, pour éviter notamment de ramener un bruit de quantification.

Des inconvénients évidemment ignorés dans le cas de l'association de circuits de sur-échantillonnage et d'un filtre numérique dont les caractéristiques

sont en quelque sorte « pilotées » par la fréquence d'horloge, ce qui a pour effet de le rendre insensible aux variations de vitesse de rotation du Compact-Disc.

Enfin, compte tenu que les paliers consécutifs dus au sur-échantillonnage sont 4 fois plus nombreux, la vitesse maximale de variation du signal de sortie — ou « slew rate » — que les circuits faisant suite au décodeur numérique/analogique ont à traiter, étant moins élevée, on réduit d'autant les risques de distorsion d'intermodulation.

### Conception et fonctionnement des circuits

Schématiquement les circuits de sur-échantillonnage et de décodage se présentent comme sur le dessin de la figure 3. Les opérations de sur-échantillonnage prennent place au niveau du filtre numérique transversal, en sortie duquel on recueille des signaux à 28 bits et une fréquence d'échantillonnage portée à 176,4 kHz.

Ramenés de 28 bits à 14 bits, les signaux obtenus après filtrage alors aiguillés vers un convertisseur numérique/analogique, tandis que les signaux d'erreur résultant de l'opération sont réinjectés en opposition de phase, à l'entrée d'un étage conformateur opérant une désaccentuation au niveau des signaux de la bande audio.

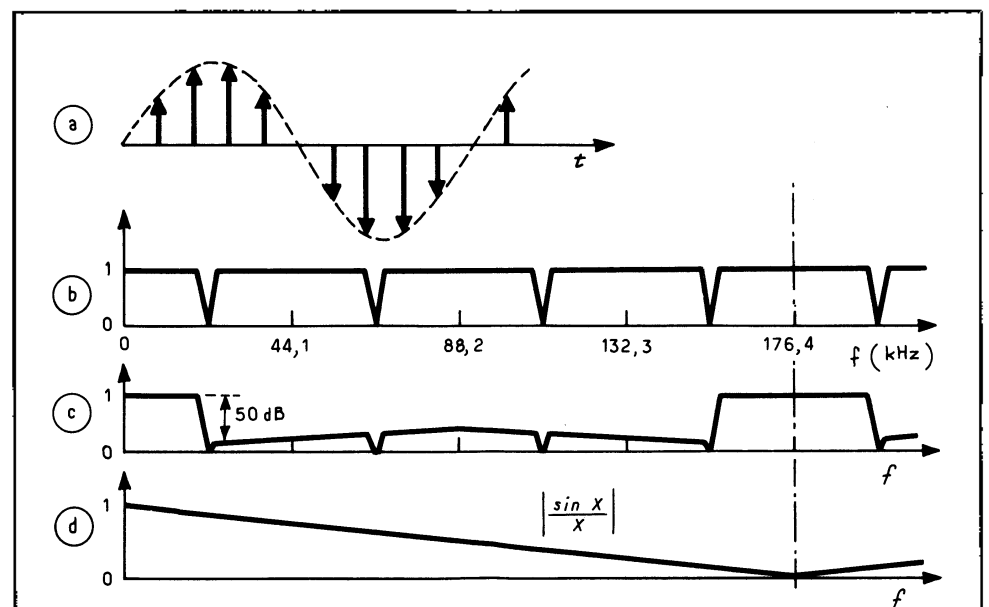


Fig. 4 - Représentation d'un signal analogique au moyen d'impulsions périodiques, se reproduisant à la fréquence d'échantillonnage (a). Spectre de fréquences des impulsions d'échantillonnage à 44,1 kHz (b). Spectre de fréquences de ces mêmes impulsions après sur-échantillonnage et filtrage (c). Fonction  $|\frac{\sin x}{x}|$ , avec son premier point d'inflexion à 176,4 kHz (d).

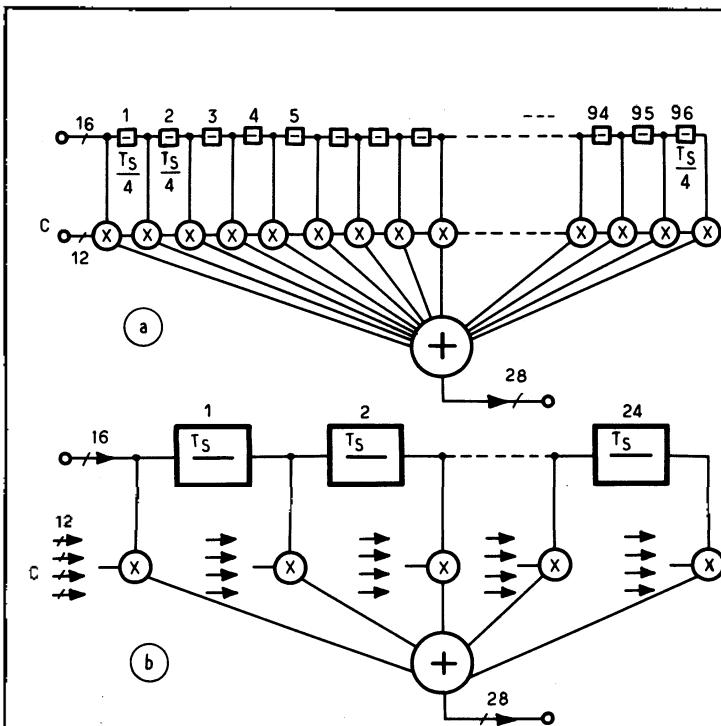


Fig. 5 - Représentation schématique du filtre numérique transversal à 96 éléments, dans chacun desquels les mots de 16 bits sont stockés pendant un intervalle de temps  $T_s/4$ , correspondant au  $1/4$  de la période du signal d'échantillonnage (a). En (b), schéma équivalent du filtre numérique utilisé en pratique, lequel ne comporte que 24 éléments de retard.

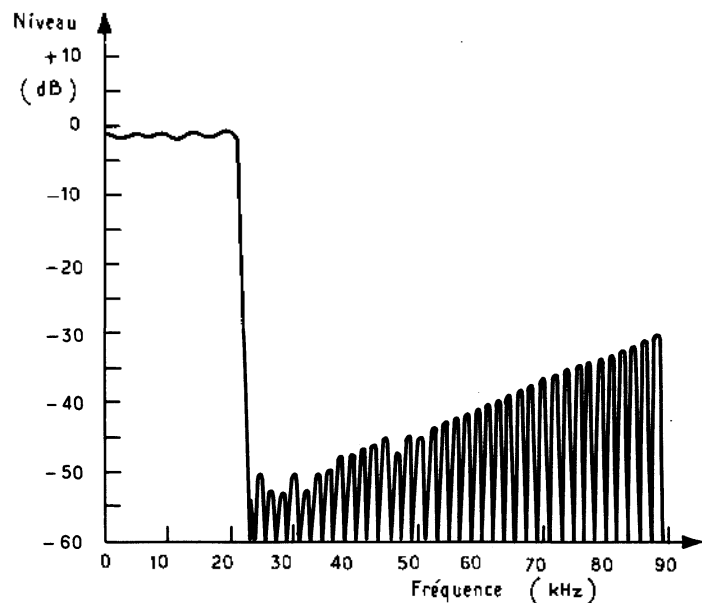


Fig. 6 - Représentation de la courbe de réponse - déterminée par ordinateur - du filtre numérique transversal. Le faible « overshoot » constaté aux fréquences supérieures est mis à profit pour compenser notamment l'atténuation apportée par la courbe de la figure 4 d et par le filtre analogique.

Ces différentes fonctions sont réalisées par un seul circuit intégré, en technologie NMOS (SAA 7030), permettant le traitement simultané des signaux existant sur les deux voies de transmission.

Les étages effectuant le décodage numérique/analogique, de même que ceux assurant le maintien des informations entre deux échantillonnages successifs, sont réunis sur un seul circuit intégré (TDA 1540), à technologie bipolaire, précédant le filtre analogique de sortie, qui est un modèle passe-bas, de Bessel, du 3<sup>e</sup> ordre.

En sortie du convertisseur numérique/analogique, on recueille une série d'impulsions périodiques, représentatives du signal analogique d'origine (fig. 4 a), qui se reproduisent à la fréquence de l'échantillonnage, soit 44,1 kHz.

Le spectre de fréquences de ces impulsions est représenté figure 4 b, où l'on retrouve les multiples de la fréquence d'échantillonnage, soit 88,2 kHz, 132,3 kHz, 176,4 kHz, etc., accompagnés de leurs bandes latérales.

La figure 4 c montre ce qu'il advient de ce même spectre de fréquences après filtrage du signal à 176,4 kHz, rendant beaucoup plus aisée l'élimi-

nation des fréquences situées au-delà de la bande audio.

En théorie, le filtre numérique utilisé à cet effet est constitué par 96 cellules distinctes, dans chacune desquelles un mot de 16 bits demeure stocké pendant un intervalle de temps  $T_s/4$  correspondant au  $1/4$  de la période du signal d'échantillonnage (fig. 5 a). En conséquence, on recueille, en sortie du filtre, 4 informations distinctes par période, mais dont 3 d'entre elles passent par la valeur zéro, compte tenu que le sur-échantillonnage est obtenu par introduction de valeurs d'échantillonnage nulles.

De ce fait, seulement 24 des 96 éléments constitutifs du filtre sont activés au même instant, les informations stockées correspondantes étant alors multipliées par un coefficient c.

En pratique, le filtre numérique n'est toutefois pas constitué par 96 éléments, mais par 24 seulement, maintenant chacun les mots de 16 bits stockés pendant un intervalle de temps  $T_s$  (fig. 5 b).

Soumises ensuite à une sommation, ces informations sont acheminées en sortie 4 fois par période d'échantillonnage, c'est-à-dire à une fréquence de

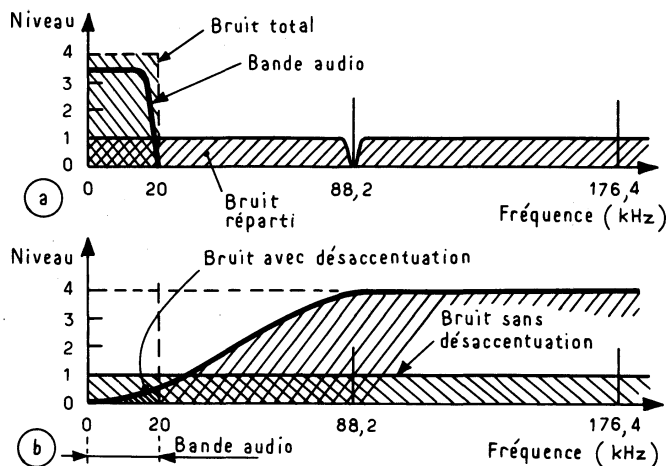
$$4 \times 44,1 \text{ kHz} = 176,4 \text{ kHz}.$$

Les coefficients multiplicateurs, cités ci-dessus, sont constitués par des mots de 12 bits. Chaque information est donc faite de  $16 + 12 = 28$  bits. Ces mots ont été choisis de telle sorte que la sommation des 24 informations ne puisse donner lieu à des bits d'erreurs et afin que les signaux de sortie soient exclusivement formés de mots de 28 bits.

Le spectre de fréquences des signaux soumis à un échantillonnage, et filtrés, est représenté figure 4 c, où l'on peut voir que les bandes latérales des signaux correspondant à 44,1 kHz ; 88,2 kHz ; 132,3 kHz, sont pratiquement supprimées.

Le convertisseur numérique/analogique fournit un courant dont l'amplitude est proportionnelle au dernier mot numérique reçu. Le courant étant gardé à une valeur constante dans un circuit de maintien, jusqu'à l'arrivée de l'information échantillonnée suivante, le spectre de fréquences - représenté figure 4 c - se trouve multiplié par une courbe de la forme  $[(\sin x)/x]$ , dont le premier zéro se trouve en fait au point 176,4 kHz (fig. 4 d). Avec, pour résultat, une atténuation de plus de 18 dB pour les bandes latérales des signaux à 20 kHz, situés de part et d'autre de ce point.

Fig. 7. — Grâce au sur-échantillonnage, l'énergie du bruit est répartie dans une bande de fréquences 4 fois plus étendue que la bande audio, donc diminuée d'autant (a). L'emploi d'un circuit de désaccentuation permet d'atténuer encore le bruit dans le bas de la bande de fréquences transmises, donc, en fait, dans le spectre audio.



Néanmoins, cette atténuation n'est pas suffisante et un filtre analogique passe-bas du 3<sup>e</sup> ordre est indispensable afin d'obtenir un affaiblissement supplémentaire de -3 dB aux environs de 30 kHz.

Pour cette fonction, c'est un filtre de Bessel qui a été retenu, en raison de la linéarité de sa caractéristique de phase dans l'ensemble de la bande passante. A noter que le circuit de maintien et le filtre de Bessel apportent une légère atténuation à l'extrémité supérieure de la bande passante ; laquelle est compensée par le faible « overshoot » du filtre numérique (fig. 6).

### Elimination du bruit de quantification

Tout signal quantifié est assorti d'un certain niveau de bruit résultant de sa conversion en un signal analogique et consécutif aux erreurs dues à son découpage en un certain nombre de paliers.

La valeur moyenne de ce niveau de bruit, dans la bande de fréquences échantillonnée, est de la forme :  $q/\sqrt{12}$ ,  $q$  représentant la hauteur des paliers de quantisation.

En conséquence, lorsque la hauteur des paliers est doublée — ou, si l'on préfère, lorsque leur nombre est réduit de moitié — ce qui se produit par exemple lorsque l'on passe de 16 bits à 15 bits, le niveau de bruit correspondant est lui-même doublé, sa valeur augmentant de 6 dB.

Si bien qu'en substituant un décodeur 14 bits à un modèle à 16 bits, on constate que le rapport signal/bruit redescend à  $14 \times 6 = 84$  dB au lieu de  $16 \times 6 = 96$  dB.

Néanmoins, et grâce aux techniques du sur-échantillonnage, il est possi-

ble de parvenir à des résultats analogues à ceux obtenus avec un décodeur 16 bits, bien qu'en se contentant d'un décodeur 14 bits.

Cela est dû à ce que l'énergie du bruit, dans ce cas, n'est pas distribuée uniformément dans la bande de fréquences comprises entre 0 et 2 kHz, mais au contraire répartie dans une bande de fréquences 4 fois plus étendue (0-88 kHz).

Et comme, seule l'énergie du bruit contenu dans la bande audio (0-22 kHz) est concernée — le reste étant éliminé par filtrage — on n'a donc plus affaire qu'au 1/4 de la puissance totale du bruit de quantification (fig. 7 a).

Ce qui signifie que le rapport signal/bruit dans la bande audio concernée se trouve amélioré de 6 dB par rapport à la valeur (84 dB) qu'il est possible d'obtenir avec un convertisseur numérique/analogique à

14 bits. Lequel passe de la sorte à 90 dB, soit une valeur équivalente à celle obtenue avec un décodeur 15 bits.

Mais il est encore possible d'aller plus loin en ce domaine et même de dépasser — bien qu'en utilisant un simple décodeur 14 bits — le rapport signal/bruit (96 dB) d'un décodeur 16 bits.

On y parvient notamment en filtrant le bruit de quantification de telle sorte que celui-ci ne soit pas uniformément réparti dans la bande de fréquences comprises entre 0 et 88 kHz. Ce qui est obtenu au moyen d'un circuit de désaccentuation mis à profit pour modifier la répartition du bruit de quantification de telle sorte que celui-ci soit atténué dans le bas du spectre, et relevé dans le haut de ce dernier (fig. 7 b).

Dans le cas d'une fréquence de sur-échantillonnage portée à 176,4 kHz on obtient de la sorte un accroissement de 7 dB du rapport signal/bruit dans la bande des fréquences comprises entre 0 et 20 kHz. Ce qui porte la valeur finale de ce dernier à  $90 + 7 = 97$  dB, soit 1 dB de mieux qu'avec un convertisseur numérique-analogique à 16 bits.

C.D.

### Bibliographie

D. Goedhart, R.J. Van de Plassche, E.F. Stikwoort : *Digital to analog conversion in playing a Compact Disc*. Philips Technical Review, vol. 40, 174-179, 1982, N° 6.

# Toute l'Electronique

## Une grande variété de rubriques :

Pour les produits nouveaux : **Sélection du mois et Nouveautés de l'industrie.**

Pour les informations générales : **le Panorama.**