

ÉDITORIAL

Mesure et haute fidélité



Yves Berré (66)

Ce numéro de FLUX est consacré à un domaine quelque peu délaissé dans ses colonnes, bien que déjà abordé dans le numéro de janvier 1998 : celui de la reproduction sonore et en particulier de la haute-fidélité. Cette dernière se situant au carrefour de deux univers qui en principe s'excluent mutuellement - du moins en apparence - celui de la technologie d'une part et celui de la perception artistique ou émotionnelle d'autre part, nul doute que certains articles ou opinions ne déclenchent des réactions du même type !

Il faut constater que le monde des médias considère de plus en plus le son comme un succédané de l'image, et que la plupart des nouveaux systèmes ou standards de reproduction actuels (MP3, Surround) tendent beaucoup plus à améliorer la commodité et la compacité des systèmes audio, voire l'agressivité de leur reproduction, que leur fidélité. La très sérieuse revue « *Que Choisir* » signale d'ailleurs depuis plusieurs années que si la qualité de l'image fournie par les téléviseurs tend à s'améliorer, celle de leur partie sonore va au contraire en se dégradant. De leur côté, des revues musicales telles que « *Diapason* » ou « *La Nouvelle Revue du Son* » affirment dans leurs tests d'écoute que dans les amplificateurs multicanaux dits « Home Cinéma », à prix égal par rapport aux amplificateurs stéréo traditionnels, la fidélité a presque toujours varié en raison inverse du nombre de canaux au profit de graves tonitruants et d'aigus clinquants issus du monde des jeux vidéos.

Il n'est pas inutile de signaler ici un comportement courant des techniciens quant aux phénomènes liés à la haute-fidélité, qui consiste à tenter de « prouver » par des mesures et des chiffres la qualité ou l'amélioration d'une reproduction. Or, c'est à mon avis une erreur de raisonnement car nous savons tous depuis nos cours de philosophie que les domaines artistiques ne relèvent ni des mêmes méthodes ni des mêmes raisonnements que les phénomènes scientifiques. Beaucoup de personnes qui trouvent normal qu'on puisse en croire ses yeux quand on leur montre un oscillogramme, refusent qu'on puisse en croire ses oreilles dans le cas de reproduction sonore, peut être parce qu'il est facile de visualiser simultanément deux oscillogrammes alors que la comparaison de deux échantillons sonores

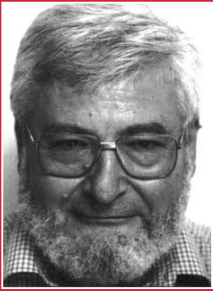
passe par la mémoire ; ils qualifient alors d'un ton condescendant le phénomène de « subjectif ». Pourtant, quand je fais accorder mon piano, je ne demande pas à l'accordeur de me fournir un relevé des fréquences de chaque note : nos oreilles nous suffisent pour juger l'amélioration apportée. De même les plus grands violonistes acceptent de payer une fortune pour jouer sur un Stradivarius sans avoir besoin de preuve scientifique de la supériorité de sa sonorité, même s'il existera toujours des oreilles insensibles ou des esprits chagrins ou pour déclarer qu'ils n'entendent pas la différence (ce qui est leur droit) ou que c'est du snobisme (ce qui excède leur droit). Quand on relit les publicités des années 80 relatives au matériel Hi-Fi, on reste abasourdi par un argumentaire pseudo-scientifique à grand renfort de bande passante, de taux de distorsion, de puissance efficace, sinusoïdale, etc. Mais la relation avec le ressenti à l'écoute était si improbable que les amateurs ont tout de même fini par s'en apercevoir et que, de guerre lasse, les annonceurs ont fini par abandonner toute argumentation à caractère technique pour promouvoir leur matériel, ainsi qu'il est aisé de le vérifier dans les revues spécialisées actuelles.

Bien sûr, cela n'interdit nullement de chercher à savoir comment ce qu'on entend est reproduit par un signal électrique ou acoustique, mais il ne s'agit que d'une investigation, au demeurant parfaitement légitime et qui peut permettre de traduire les phénomènes en termes techniques et de caractériser les performances de l'équipement de reproduction au plan électronique ou acoustique, et non pas d'une preuve de qualité, celle-ci ne pouvant être appréciée en dernier ressort que par l'oreille.

Certains lecteurs pourront s'étonner de ne pas trouver dans ces colonnes d'articles émanant d'industriels de la profession. Je le regrette autant qu'eux ! Deux des plus importantes firmes françaises de haut-parleurs et d'enceintes acoustiques, travaillant aussi bien dans le domaine grand public que professionnel, et dont les produits sont réputés dans le monde entier, avaient été sollicitées pour participer à ce numéro. Leur PDG – tous deux anciens Supélec – n'ont pas cru devoir donner suite. Dommage !

Yves BERRÉ (66)

Les mystères de la haute fidélité



Pierre Johannot (66)

Au vu du titre, on peut légitimement se poser la question : « Mais comment la haute-fidélité peut-elle encore comporter des mystères ? ».

Car si on se réfère aux caractéristiques des chaînes, celles-ci dépassent largement les plus sévères exigences de l'oreille humaine, même pour des appareils de bas de gamme : le moindre circuit intégré de puissance délivre une vingtaine de watts à des 0,01 % de distorsion, entre 10 Hz et 50 kHz...

Que demander de plus ?

Il en va de même pour les enceintes.

A des puissances de quelques watts comme il en va dans plus de 99 % des écoutes domestiques, les enceintes courantes présentent des caractéristiques qui devraient satisfaire largement l'audiophile le plus exigeant !

Le divorce mesures/musicalité

Et pourtant, un problème subsiste : il n'existe AUCUNE corrélation entre les mesures classiques que l'on peut faire sur une chaîne et sa musicalité, pour des éléments au-dessus d'un seuil minimal de qualité, s'entend.

Précisons le problème :

- Nous entendons par « mesures » celles que l'on sait faire actuellement : puissance, distorsion harmonique, distorsion d'intermodulation, bruit de fond, dynamique, éventuellement accompagnées de traitements informatiques sophistiqués.
- Nous comprenons dans « musicalité » l'appréciation d'un système telle qu'elle peut être formulée par un panel d'auditeurs habitués aux écoutes, sinon avertis, et dont les avis sont largement convergents.

Concrètement, un audiophile pourrait concrétiser ses rêves en achetant les maillons les plus performants, voire les plus chers disponibles dans le commerce, accessoires inclus tels que câbles, filtres secteur et supports. Dans l'état actuel de la situation, il n'aurait aucune assurance d'avoir des résultats enthousiasmants, et l'ensemble pourrait s'avérer nettement moins bon qu'une chaîne dix fois moins coûteuse achetée à la grande surface du coin. Ou l'inverse d'ailleurs, mais sans explication au vu des mesures...

Ce paradoxe ne s'est pas manifesté immédiatement. Il a fallu attendre que les différents éléments aient chacun atteint leur maturité technologique. Mais dans l'ensemble, les caractéristiques des sources, amplificateurs et enceintes étaient déjà excellentes à la fin des années 70 et irréprochables aux mesures dans les années 80.

Le paradoxe devenait d'autant plus évident : en passant une dizaine d'amplificateurs au banc d'essais, en distorsion par exemple, le classement obtenu ne correspondait EN RIEN à l'appréciation musicale donnée par un panel d'auditeurs avertis, d'un commun accord... Les

coefficients de corrélation calculés ne dépassaient pas 0,3, traduisant une indépendance à peu près complète !

Comme si un mystère ne suffisait pas, d'autres apparaurent...

Les câbles et le compact-disc...

D'abord celui des câbles...

Quoi de plus innocent qu'un câble en Hi-Fi ? Il n'a à transiter que des courants faibles sous des tensions de l'ordre du volt, voire du millivolt, et ses caractéristiques primaires R, L, C peuvent difficilement être suspectées... Et pourtant, expériences faites, nombre d'audiophiles signalaient des modifications du rendu de leur chaîne après des changements de câble, modulation, haut-parleurs, et même câbles secteur, ce qui plongea la population audiophile dans un abîme de perplexité après les premières réactions qui, il faut le dire, relevaient plutôt d'un scepticisme allié à une franche gaieté !

Puis celui du disque compact ou CD

C'est au cours de cette bataille « des câbles » au milieu des années 80 que surgit le compact-disc qui, selon ses promoteurs, devait mettre tout le monde d'accord ; l'arme absolue en matière de musicalité grâce à des caractéristiques exceptionnelles : distorsion et bruit pratiquement nuls, dynamique d'enfer, bref, la perfection... C'était d'ailleurs le constat de la très sérieuse revue « *Que Choisir* » : « *Puisque tous les lecteurs CD ont des caractéristiques qui frôlent la perfection aux mesures, ils sont forcément équivalents à l'écoute, donc achetez le moins cher à qualité de fabrication égale* ».

Or, vingt ans après, on assiste à une renaissance, sinon du microsillon, du moins des platines destinées à lire les énormes stocks de vinyles existants. La mode des « disc-jockeys » souvent invoquée est très insuffisante pour expliquer ce déferlement. Dans tous les salons récents, les platines microsillons se taillent la part du lion et des

constructeurs comme Thorens qui les avaient abandonnées les remettent à leur répertoire, avec des modèles de haut de gamme de plusieurs milliers d'euros !

Sans parler d'échec pour le CD, ce qui serait faux au vu de la taille des marchés, il faut bien reconnaître qu'il subsiste un vrai problème, et que, si la commodité d'usage du CD ne saurait être mis en doute, sa perfection aux mesures ne reflète absolument pas la musicalité qu'il devrait avoir...⁽¹⁾ Les audiophiles CDphobes parlent de « silences artificiels », d'« extinctions écourtées », voire de « musique surgelée ». Sans cautionner ces vues, il faut bien accepter l'existence d'un problème...

Mais le CD pose bien d'autres interrogations. Les audiophiles se rendent compte notamment que le rendu des lecteurs dépendait de manière sensible de la nature du support du lecteur.

La première réflexion fut que, si la qualité du support importait, c'est qu'on diminuait ainsi le taux d'erreur de lecture, en supposant audibles les processus de correction qui étaient alors sollicités.

Malheureusement, les mesures montrèrent immédiatement que les corrections d'erreurs n'entraient que très rarement en fonction, par exemple quand la surface du CD était très dégradée.

La conclusion de l'ensemble des études est, qu'en pratique, le CD ne présente AUCUNE erreur de lecture.

(1) L'un des avantages les plus souvent cités du CD par rapport au microsillon est son absence de bruit de fond. Or, s'il est vrai qu'un microsillon en bon état lu avec un ensemble platine/bras/cellule de haute qualité ne possède pratiquement aucun bruit de fond, même après une centaine de passages (des tests sérieux ont été faits), il faut pour obtenir ce résultat un équipement dont le prix n'a aucune commune mesure avec celui d'un lecteur CD de qualité moyenne, sans parler de la difficulté de mise en œuvre (réglages « pointus » de l'équilibrage du bras, de l'orientation de la cellule, etc.) ni de la nécessité d'un préamplificateur-correcteur RIAA coûteux lui aussi si on le veut de qualité comparable. En réalité, le CD est meilleur (et beaucoup plus commode) que le microsillon sur une installation de bas de gamme, mais pas en haut de gamme. D'où son immédiat succès populaire.

Il existe pourtant un grand nombre d'améliorations (ou « tweaks » en anglo-saxon) que les audiophiles mettent en œuvre dans leurs lecteurs et notamment le CD723 de Philips, appareil peu coûteux facilement améliorable, chouchou des audiophiles. Mais là aussi, alors que la différence entre un 723 « de base » et un 723 modifié est évidente, les mesures des différences entre les signaux de sortie sont nulles en numérique, ce que l'on savait déjà, mais sont également insignifiantes en analogique, en tout cas très inférieures aux 90 dB admis comme seuil de sensibilité.

Pour tenter de résoudre le problème sans revenir au microsillon (solution sérieusement envisagée, surtout pour éviter les copies illicites!), on s'est lancé dans le DVD-Audio et surtout le SACD (Super Audio Compact Disc), avec des mots de 24bits échantillonnés à 96 kHz au lieu des 16/48 du CD. Si le résultat global a été sensiblement meilleur, la divine surprise qu'on aurait pu espérer n'a pas eu lieu... Pire, les platines microsillon ne furent toujours pas détrônées dans le cœur des audiophiles!

Une analyse complémentaire des défauts du CD mit en cause le « jitter », cette instabilité de déclenchement sur les fronts d'horloge, sensible dans la conversion numérique/analogique. Certains constructeurs japonais allèrent jusqu'à utiliser des horloges atomiques au césium pour résoudre ce problème, avec une amélioration audible mais non décisive!

En dehors des problèmes spécifiques au CD et qui sont plus particulièrement révélateurs du divorce mesures-musicalité en Hi-Fi, un certain nombre de questions avaient été soulevées pour d'autres maillons.

Les amplificateurs

Les premiers à avoir été mis en cause, sinon en examen, ont été les amplificateurs car on s'était rapidement rendu compte que celui-ci jouait un rôle crucial dans la musicalité d'une installation, avant les enceintes. Les sources (CD, vinyle, tuner, etc.) étaient a priori moins suspectes une fois éliminées les rares brebis galeuses du marché.

Deux problèmes furent progressivement étudiés:

- La Distorsion d'Intermodulation Transitoire ou DIT, découverte par Matti Ojala dans les années 1975,

mettait en cause la vitesse de réaction de la boucle d'asservissement des amplificateurs dans la boucle de contre-réaction, couplée à une saturation transitoire des circuits. L'amplificateur se trouvait transitoirement « aveuglé » et non-capable de traiter les signaux faibles simultanés.

Une solution fut rapidement trouvée par l'usage de circuits internes suffisamment rapides.

- La Distorsion Thermique ou DT, due à Gérard Perrot vers 1985 : les transistors de sortie présentent un gain qui fluctue en fonction de l'échauffement du silicium, corrélé avec le signal. La contre-réaction corrige ce défaut qui reste malgré tout audible. Là aussi, des solutions satisfaisantes ont été trouvées.

On notera que des technologies à base de tubes électroniques restaient insensibles à ces deux types de défauts, ce qui explique partiellement l'engouement pour le tube dans le domaine de la Hi-Fi!

Et les câbles...

Restait le problème des câbles...

Une première hypothèse pour expliquer le « son » des câbles était fondée sur des phénomènes de mémoire des isolants, déjà étudiés par Benjamin Franklin à la fin du XVIII^e siècle: les isolants gardent une mémoire des impulsions de tension sous forme de charges piégées. Il était donc légitime de penser que des câbles puissent présenter un certain « traînage » ou une certaine mémoire des signaux précédents.

Mais en pratique, les capacités et les tensions mises en jeu sont tellement faibles que cet effet reste négligeable, bien qu'encore souvent évoqué.

Une deuxième hypothèse allait s'avérer beaucoup plus fructueuse par les développements qu'elle allait permettre: les Microdécharges D'Interface ou MDI.

Les Microdécharges D'Interface (MDI)

Quelle était cette hypothèse? On sait que, si on augmente le champ électrique à la surface d'un conducteur, on commence à observer des phénomènes de décharges dans l'air en fonction de la tension appliquée et des rayons de courbure locaux: c'est l'effet couronne. Les ordres de grandeur sont de la centaine de kV pour des rayons millimétriques.

L'hypothèse de départ des MDI est que de telles décharges peuvent se produire pour des tensions de quelques volts à condition de présenter des aspérités locales inférieures au micromètre, comme il peut en subsister sur les conducteurs après tréfilage.

L'interface conducteur-isolant est alors le siège de microdécharges, voisines des décharges partielles ou DP bien connues dans les isolations haute-tension.

Même si cette hypothèse des MDI n'a pas encore reçu de confirmation aux mesures autres que des variations aléatoires du bruit de fond, elle s'est avérée extrêmement fructueuse en ce sens que la plupart des problèmes de la haute-fidélité sont dus à des phénomènes haute-fréquence se propageant majoritairement sur la surface isolante des composants, câbles et boîtiers. Et finalement *dans* l'air, comme on le verra dans la suite...

Ce parasitage haute-fréquence est maintenant couramment admis par la plupart des constructeurs qui utilisent généralement les techniques de la CEM (compatibilité électromagnétique) pour s'en protéger, avec des résultats d'ailleurs variables qui montrent que le problème ne relève pas exclusivement de la CEM.

De plus, la situation aurait tendance à devenir de plus en plus aiguë avec le développement des communications à très haute fréquence, dont téléphoniques, dans la bande de 1 à 10 GHz. Les revendeurs sérieux connaissent bien le problème et font éteindre les téléphones portables lors de leurs démonstrations en auditoriums, comme Alain Choukroun ou Denis Beau.

Cette théorie des Microdécharges d'Interface expliquait au moins qualitativement la plupart des résultats bizarres notés par les audiophiles en matière de câbles. Il suffit de consulter les pages publicitaires des revues de Hi-Fi pour se rendre compte de l'énorme place prise par les câbles dans les installations. On remarque également la progression de la technique « argent isolé » PTFE, les surfaces argentées dont l'oxyde est conducteur générant moins de microdécharges, et le Téflon exempt de charges libres ne les favorisant pas.

Ce concept de Microdécharges d'Interface associé aux techniques de la CEM a abouti à un ensemble de protections ^[1] permettant

d'assurer une bonne immunité aux MDI pour l'appareillage haute-fidélité, câbles de liaison et alimentation secteur compris.

Les constructeurs qui ont assimilé ces principes, dont YBA, Euphya et Neodio en France, produisent des amplificateurs à la musicalité incontestable. A noter que les technologies à tubes présentaient depuis toujours une forme d'immunité « naturelle » à ces perturbations.

Néanmoins, si la musicalité présentait des progrès notables, la corrélation mesures-musicalité n'était toujours pas assurée...

C'est alors que nous eûmes connaissance d'un certain nombre de faits troublants, dont l'origine n'était pas forcément farfelue, qui semblaient remettre en cause les sacro-saintes propriétés acoustiques de l'air, en particulier sa linéarité vis-à-vis de l'écoute musicale.

Même en faisant la part d'effets psychologiques d'auto-persuasion, il fallait reconnaître qu'un nombre significatif d'audiophiles reconnaissait des effets indépendants de la chaîne et de l'acoustique de la salle d'écoute, et donc mettant en cause l'air lui-même :

- l'influence d'une pulvérisation très fine d'eau dans la salle d'écoute,
- le brassage lent de l'air de la pièce,
- l'orientation des enceintes en tenant compte du champ magnétique terrestre (!),
- la disposition dans la zone d'écoute de pièces en céramique (barres, triskell⁽²⁾),
- l'influence des ioniseurs, d'ailleurs pas forcément positive,
- le « Hallograph Sound Field Optimizer » de la société américaine Shakti, sorte d'antenne à trois éléments placée par paires derrière les enceintes,
- le résonateur mural Acoustic System, sorte de petite coupelle posée sur un support tripode accolé au mur,
- le « Synthoniseur » de la société française OSH, censé atténuer le comportement parasite des molécules d'eau de la salle d'écoute.

(2) Le triskell est un élément décoratif de l'architecture celtique en forme de roue solaire sensé avoir des propriétés bénéfiques dans nombres de domaines allant de la santé à la croissance des plantes. Celui dont il est question ici, et qui est commercialisé, est réalisé en pierre de synthèse; il s'agit donc d'un matériau fritté.

Il est à noter que la société OSH sous l'impulsion de Gérard Noël a dénoncé depuis 1986 le comportement de l'air acoustique en accusant en particulier les molécules d'eau présentes dans l'air.

Sans entrer dans une critique des théories précédentes, une idée était à retenir: il ne fallait pas exclure un comportement acoustique anormal de l'air sous certaines conditions.

Cette idée semblait extrêmement osée, voire sacrilège, la linéarité fondamentale de l'air en acoustique musicale n'ayant jamais été mise en cause depuis Boltzmann, Sabine et autres...

Pour pouvoir légitimement l'envisager, il fallait avoir éliminé TOUTES les autres causes possibles de dégradation de la musicalité.

C'est ce qui a été fait en particulier au laboratoire MDI des Etudes et Recherches d'EDF dans le cadre d'une recherche générale sur les parasites de transmission, de 1996 à 2002, où la plupart des protections ont été mises au point.

On citera par exemple les « Biocâbles® », en cours de développement en Allemagne, dans lequel le conducteur baignait dans une solution salée contenue dans une gaine étanche, et également des câbles secteur dont la surface externe était soumise à une combinaison :

- d'un champ électrique obtenu par piles,
- d'un champ magnétique réalisé par des aimants.

Ces deux champs étant colinéaires et (conventionnellement) opposés. On appellera cette combinaison « Champ Magnétoélectrique » dans la suite.

Au cours de ces essais, le champ électrique était appliqué entre deux grilles au centre desquelles passait le câble; on s'est rapidement rendu compte qu'il existait des écartements préférentiels voisins de 33 mm, 50 mm, 80 mm entre autres, qui semblaient montrer qu'il existait entre ces grilles des systèmes d'ondes stationnaires, sans qu'on puisse en deviner plus.

Un progrès fut obtenu en reliant ces grilles à une ligne de transmission bifilaire accordée en quart d'onde où l'on retrouva les longueurs critiques précédemment indiquées.

On se rendrait compte bien plus tard qu'il s'agissait en fait de longueurs demi-onde, correspondant

aux fréquences de 1,9 GHz, 3 GHz et 4,5 GHz, qui matérialisaient en quelque sorte le rayonnement MDI.

L'air et les MDI: les ions lourds Langevin

Les essais précédents avaient été faits en vue de la protection d'un câble, secteur en l'occurrence, avec d'ailleurs des résultats variables...

Mais il était tentant (et facile!) de voir si une telle disposition à base de grilles et de champ magnéto-électrique pouvait avoir une incidence sur le son: après tout, des dispositifs simplistes comme des barres céramique semblaient en avoir une!

Un dispositif élémentaire constitué de deux grilles espacées de 80 mm, munies d'aimants S <= N et polarisées à 60V +=> fut donc installé entre les deux enceintes d'une mini-chaîne de bas de gamme. L'effet fut immédiatement audible.

Sans avoir transformé une citrouille en carrosse, on reconnaissait facilement que la distorsion subjective avait diminué et que l'on pouvait écouter sans gêne à un niveau nettement plus élevé.

Compte-tenu de la modicité des moyens employés, c'était un montage prometteur qui confirmait le doute sur l'innocence de l'air!

Entre ce dispositif primaire et l'Ionostat®, nom déposé du produit définitif, ont pris place un grand nombre de modifications et ajouts, au vu de notre lente compréhension des phénomènes qui se sont avérés plus complexes qu'espéré...

Pour comprendre le comportement « anormal » de l'air ainsi que le comportement (imaginé?) de l'Ionostat, il est nécessaire de revenir à l'analyse du milieu en cause...

L'air, support de la propagation du son, est composé d'azote (78,08 %), d'oxygène (20,95 %) et d'argon (0,93 %). Il faut y ajouter des éléments variables comme le gaz carbonique (0,03 %) et la vapeur d'eau.

En considérant l'air comme un gaz parfait, un volume de 22,414 litres contient Na molécules de gaz, Na étant le nombre d'Avogadro = 6,022 10²³; 1 cm³ d'air contient donc 2,7 10¹⁷ molécules.

L'air contient également un grand nombre de particules d'origine biologique, chimique ou minérale, environ 50 000 par cm³ dont 10 000 particules chargées.

On distingue :

- les ions « légers » où un noyau d'hydrogène H^+ s'accroche à une molécule d'eau H_2O pour former l'ion oxonium H_3O^+ . D'autres molécules d'eau viennent s'y ajouter pour former des hydrates $(H_3O^+) \cdot nH_2O$, n étant voisin de 10. Le mécanisme pour les ions négatifs est le même en partant d'un électron, puis de l'ion OH^- ;
- les ions lourds constitués par des associations de 1000 à 2000 des molécules précédentes, découverts par Paul Langevin en 1905, et qui présentent en fait la majorité des ions existant dans l'air. On compte 200 à 500 paires d'ions légers pour 10 000 paires d'ions lourds Langevin.

Les ions légers ont une durée de vie voisine d'une minute, et de une heure pour les ions lourds. Ces ions sont formés en permanence par des phénomènes allant de la radioactivité naturelle au rayonnement solaire ou cosmique et en passant par les phénomènes électrostatiques de l'atmosphère ou de l'activité humaine, industrie chimique comprise.

A priori, le suspect serait donc cet ion lourd Langevin, ayant une masse équivalente à plus de 10 000 molécules d'eau accompagnée de charges positives, négatives ou formant une association dipolaire. Chaque cube de côté 0,46 mm en contiendrait un, en moyenne.

En l'absence d'autres indications, il ne serait pas illégitime de penser que ce soit cette particule qui soit responsable de la dégradation du son par déformation des fronts d'onde sonore, ceci étant dû principalement à son caractère chargé, et donc responsable de chocs inélastiques avec les molécules polaires de l'air comme O_2 ou H_2O . L'azote N_2 reste heureusement hors de cause et reste irréprochable pour la transmission sonore !

La naissance de l'Ionostat® et son fonctionnement

L'ennemi présumé étant identifié, le premier réflexe serait de l'éliminer. Or, la tâche s'avère extrêmement difficile du fait que la particule suspecte se cache parmi 10¹⁵ autres particules neutres et innocentes !

Elle laisse des indices qui permettent cependant de l'identifier : les fréquences de 1,9-3-4,5 GHz qui correspondent à sa naissance et/ou sa disparition, puisque sa durée

de vie n'est que d'une heure, phénomène analogue à ce que l'on observe en matière de radioactivité.

Il n'est donc pas aberrant de penser qu'en utilisant des fréquences judicieusement choisies on puisse « artificiellement » exciter ces gros ions jusqu'à amener leur rupture.

L'astuce de l'Ionostat va être de capter ces fréquences naturelles par des antennes adaptées, dans un milieu magnétoélectrique favorisant leur dissociation et de les réémettre à l'avant de l'appareil de manière à amener de proche en proche la rupture des gros ions Langevin dans le local d'écoute.

Il est évident que ce processus est plus facile à écrire qu'à réaliser et qu'il a fallu de nombreux essais et d'encore plus nombreuses erreurs pour aboutir à un produit fini

Nous serions d'ailleurs enchantés que lesdits chercheurs se penchent sur ce problème un peu plus activement qu'ils ne l'ont fait jusqu'à présent, en se contentant de parler « de goûts et de couleurs », comme si les représentants de l'espèce humaine n'avaient pas en définitive les mêmes systèmes auditifs !

Cette parenthèse fermée, comment fonctionne l'Ionostat ?

Conformément à la figure 1, il consiste essentiellement en un empilement de trois grilles P, G1, G2 montées en parallèle à l'aide d'entretoises isolantes (1) de 32 mm et (2) de 90 mm qui servent à appliquer le champ électrique par des piles et le champ magnétique anti-colinéaire par les aimants (A) qui ont tous la même orientation, Sud vers l'arrière de

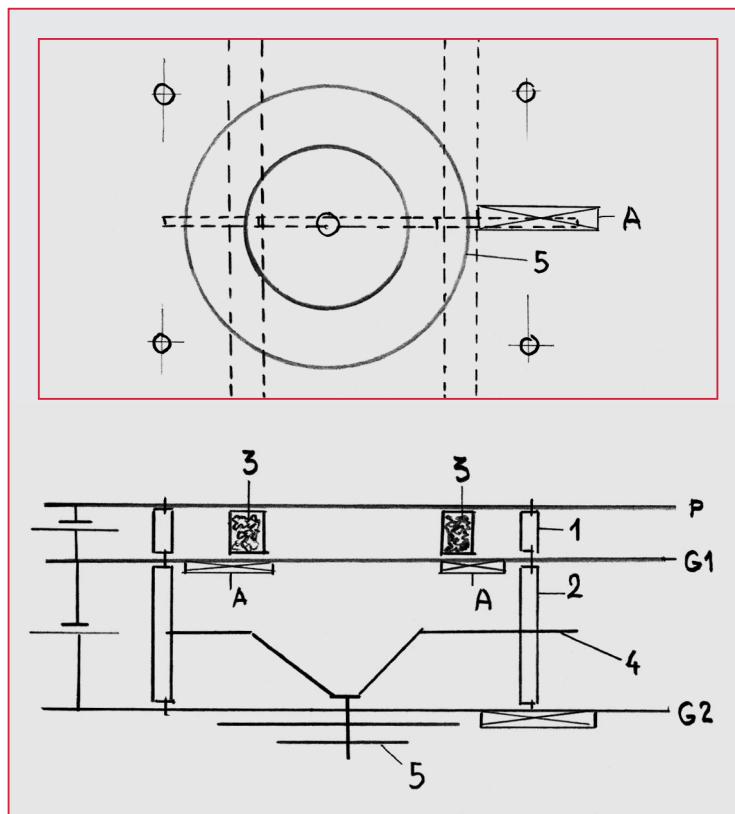


Figure 1. Schéma général de l'Ionostat.

satisfaisant, les progrès allant au rythme lent de notre compréhension des phénomènes en cause, accompagnés de nombreuses écoutes, toutes les tentatives de mesure s'étant soldées par des échecs...

Ajoutons que nous ne prétendons pas du tout « comprendre » ce qui se passe, mais simplement proposer un « modèle » satisfaisant au vu des phénomènes observés. Il s'agit donc là d'une démarche d'ingénieur et non de chercheur scientifique attaché à représenter rigoureusement la réalité du phénomène.

l'appareil et Nord vers l'avant. Il s'agit d'aimants NdFeBo⁽³⁾ de 60x13x6 mm de marque Calamit®. L'ensemble actif est constitué par les antennes (4) de 2x33 mm, 2x50 mm et 2x80 mm et les antennes (5) qui sont des disques de rayons 33 mm, 50 mm et 2x80 mm avec en option un disque de 25 mm à l'avant.

(3) Aimants à haute énergie en matériaux fritté Néodyme/Fer/Bore; ils sont utilisés notamment dans les petits moteurs industriels à hautes performances (machine-outils, avionique), ainsi que dans certaines applications grand public (hauts-parleurs, casques, moteurs de disques durs...).

L'espace P-G1 sert essentiellement à la création des gros ions facilitée par la présence des tasseaux bois (3) non résineux adsorbant une certaine humidité.

A noter que la consommation de l'appareil est nulle et que la durée de vie des piles est d'au moins 10 ans dans ces conditions.

L'espace G1-G2 est l'espace actif. Les gros ions Langevin sont excités par le champ magnétoélectrique qui facilite leur dissociation. L'onde émise lors de la rupture est captée par les antennes (4) qui travaillent en deux demi-ondes et transfèrent la HF sur les antennes-disque (5) en demi-onde via une traversée isolante à rondelles Téflon®.

Un point important du fonctionnement de l'appareil est qu'il se produit une véritable synchronisation dans l'espace G1-G2 entre la dissociation des ions d'une part et les ondes stationnaires existant dans l'antenne (4) d'autre part, ce processus restant à élucider.

Le réseau ionostatique

Pour comprendre plus facilement ce qui se passe dans l'appareil et dans le volume où il agit, il est utile

vais-je observer ? ». Un des modèles favorisés des premiers physiciens de l'électromagnétisme était l'« éther » dont les vibrations permettaient la transmission des ondes électromagnétiques, comme l'air permet la transmission sonore. Ce concept, dont Maxwell était à l'origine (ce qu'on s'est empressé d'oublier, ça faisait tache...), a été englobé dans la théorie de la Relativité Générale qui, de fait, l'a fait disparaître. Mais auparavant, il avait bien fait avancer les choses...

Ce concept de Champ Ionostatique permet de comprendre comment agissent et se propagent les MDI, et également comment agit l'Ionostat. Dans ce concept, on considère que l'environnement est constitué de conducteurs et d'isolants, solides ou gazeux, l'air atmosphérique en l'occurrence, le vide étant à part (tubes électroniques).

Le réseau ionostatique proprement dit est constitué par les charges + et - existant dans les isolants et dans l'air (figure 2).

On admettra que la densité de charges est en gros proportionnelle à la densité du milieu.

Ce réseau va se trouver excité par toutes les perturbations d'origine :

- électrostatique : charges électriques diverses développées par frottement (triboélectricité), par radioactivité naturelle et rayons cosmiques,
- mécanique et acoustique : surfaces vibrantes des HP et autres instruments de musiques et toutes surfaces vibrantes entraînant des charges liées,
- électrique : parasites de fonctionnement des réseaux industriels,
- électromagnétique : rayonnements radio de toutes natures, portables,
- MDI : oscillations de charges liées des isolants, charges adsorbées et charges internes.

Les perturbations à partir d'une zone limitée de ce réseau peuvent se propager :

- mécaniquement par variation de la force de Coulomb. On démontre que la vitesse de propagation dépend de la densité des charges, mais reste voisine de la vitesse du son dans le matériau pour des densités raisonnables ;
- par ondes électromagnétiques de molécule à molécule, entre une molécule émettrice et une molécule réceptrice. La vitesse est alors voisine de la vitesse de la lumière, divisée par la racine de la constante diélectrique ou permittivité, proche de 2,3 pour les isolants usuels.

L'essentiel dans ce modèle est de comprendre que toute perturbation d'origine mécanique, acoustique, électrique ou électromagnétique va s'étendre automatiquement à l'ensemble du réseau.

Ce mécanisme explique la plupart des faits constatés :

- l'influence des changements de composants dans une électronique,
- l'influence de la disposition des composants, ceux-ci restant identiques,
- le problème du CD en rotation qui entraîne une distorsion globale du réseau,
- l'intérêt des tubes qui présentent un volume vide sans charges exempt de propagation,
- l'influence des traitements de surface par des produits antistatiques ou certaines cires naturelles,
- la grande sensibilité des électroniques aux vibrations et donc à la qualité du support,
- la rapidité d'action et l'efficacité de l'Ionostat qui agit « en volume » et non « en surface ».

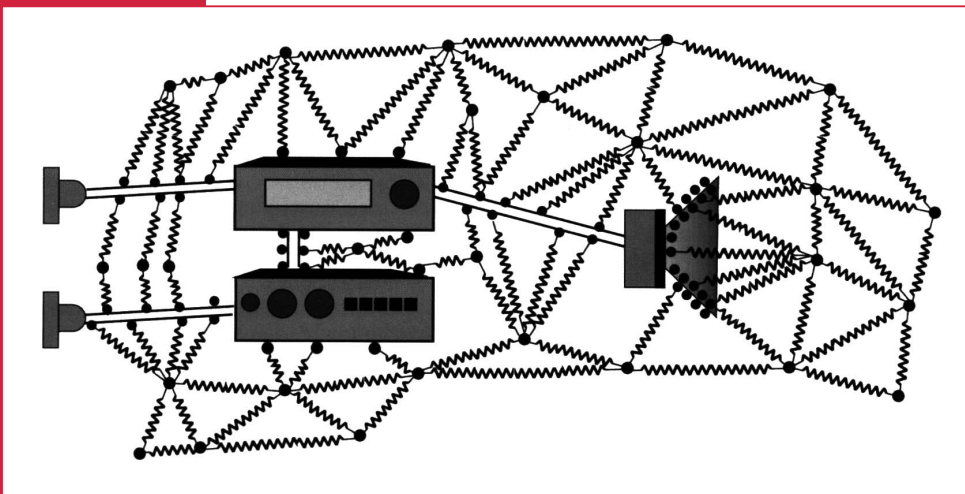


Figure 2.
Représentation
du réseau
ionostatique.

d'avoir recours à un modèle de milieu de propagation permettant de matérialiser la perturbation : le Réseau Ionostatique. Ce modèle permet de saisir intuitivement comment le milieu acoustique se trouve pollué par les MDI.

Rappelons qu'il s'agit ici d'un « modèle » relevant des techniques de l'ingénieur et non d'une description physique des phénomènes au sens du chercheur scientifique.

Un modèle peut ne pas refléter la réalité, mais il doit répondre, au moins qualitativement, à des questions du genre : « Si je fais ceci, que

Elle reste très faible, de l'ordre de 10^{-15} par rapport aux molécules neutres.

Dans un petit volume, les charges s'équilibrent en moyenne, sinon les contraintes internes des matériaux seraient prohibitives, les forces de Coulomb entre charges proches étant très élevées.

Ces charges sont attirées ou repoussées par leurs voisins suivant leur signe et la loi de Coulomb. Elles sont également soumises aux chocs des molécules voisines ou chocs thermiques du mouvement brownien.

Dans un tel réseau, le rôle de l'ionostat est clair: capture et isolation des trois fréquences propres des ions du réseau dans son entourage, et ré-émission à l'avant par ses antennes circulaires. De proche en proche, très rapidement, l'ensemble du réseau va osciller sur ces trois fréquences préférentielles, provoquant une cassure des gros ions.

Ce concept de champ ionostatique est donc fondamental car il explique pourquoi les mesures n'ont en pratique aucun rapport avec l'écoute au-dessus d'un seuil minimal de qualité. Tout se passe dans l'air, le signal électrique n'est en pratique pas concerné!

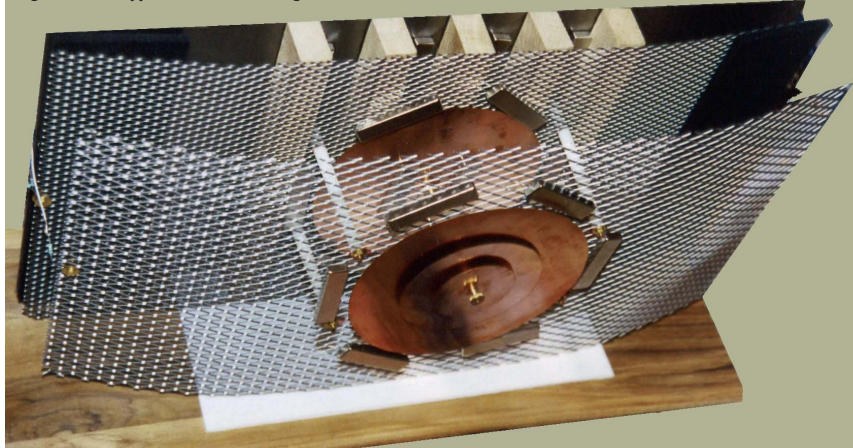
Concrètement, prenons l'exemple d'un amplificateur dans lequel on va changer un composant, ampli opérationnel ou condensateur par exemple. La distorsion peut être réduite de 20 à 30 % ou mieux, c'est ce qu'on cherche, mais si le réseau ionostatique interne de l'ampli ou du condensateur est modifié ou excité de manière défavorable, il communiquera ce défaut au réseau général et le gain subjectif escompté sera nul ou carrément négatif.

Ce concept permet d'éclairer des constatations inexplicables: M. Hiraga avait remarqué, par exemple, que les transistors de sortie équivalents existant en deux versions: TO3 métallique et TO220 surmoulé plastique présentaient des différences sensibles côté musicalité, l'avantage revenant au TO3; il est évident que le champ ionostatique d'un TO220 tout plastique est plus influent que le champ interne d'un TO3 très difficilement couplé au réseau général par suite de son boîtier métallique.

Il est certain que ce modèle donne une image correcte des phénomènes observés, mais il nécessite de nombreuses recherches complémentaires pour que l'on puisse parler de vraie théorie avec des résultats quantitatifs incontestables.

Par exemple, il reste à faire le lien entre ce que l'on connaît des ions, ions légers, ions lourds Langevin, molécules polaires et ce modèle de réseau qui suppose en plus l'existence de charges liées internes aux composants, mais capables d'interactions.

Figure 3. Prototype en cours de montage.



Par ailleurs, il devient indispensable d'étayer cette théorie par des mesures significatives.

Le fait de savoir que le signal électrique reste intact restreint le problème à des mesures acoustiques qui n'ont pu être faites pour le moment.

Ce concept de champ ionostatique est donc fondamental car il explique pourquoi les mesures n'ont, en pratique, aucun rapport avec l'écoute au-dessus d'un seuil minimal de qualité. Tout se passe dans l'air, le signal électrique n'est en pratique pas concerné!

Mais nul doute qu'elles ne soient significatives, compte-tenu de l'incontestable efficacité de l'ionostat, reconnue par des professionnels de la Haute-Fidélité, éditorialistes et revendeurs.

Evolution et aspect de l'ionostat

A ce jour, plus d'une douzaine de prototypes ont été construits, correspondant à des phases successives de perfectionnement portant sur la disposition des grilles, des aimants et du système de rayonnement (lignes quart d'onde et antennes). Les figures 3, 4 et 5 montrent différentes réalisations dont l'une logée dans une ébénisterie en noyer ciré susceptible de s'harmoniser avec un mobilier classique.

La fabrication pourrait en être industrialisée relativement facilement eu égard au nombre de pièce et au temps de montage réduit.

Son prix de vente peut être estimé entre 500 et 1000 euros selon les quantités, ce qui pourra paraître élevé devant celui de certaines « micro-chaines » en plastique aluminisé, mais beaucoup moins si l'on considère qu'il peut non seulement procurer une amélioration significative à des chaînes Hi-Fi coûtant plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros, mais aussi amener la qualité perçue des premières au voisinage de ces dernières.

En fait, lors de certains essais à l'aveugle, des chaînes très modes-

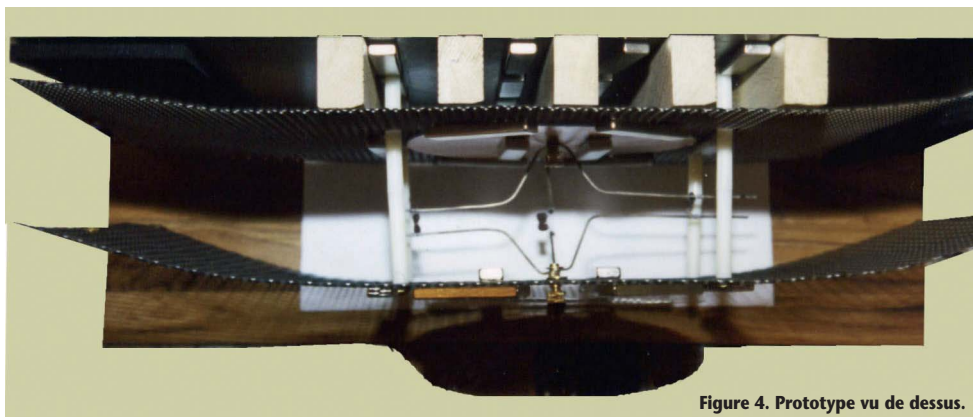


Figure 4. Prototype vu de dessus.

tes équipées des hauts parleurs de bas de gamme à un euro ont été confondues, écoutées de part et d'autre d'un lonostat, avec d'autres beaucoup plus luxueuses et valant cent fois plus cher...

Conclusion

Cette étude a demandé une dizaine d'années, dont cinq avec l'appui et le soutien d'EDF. Mais étant donné la complexité du problème, un résultat tangible sous la forme de

l'lonostat n'a pu être obtenu qu'après mon départ en inactivité. Il était de toute façon impensable de proposer au départ comme thème de recherche « La non-linéarité acoustique de l'air » sans avoir éliminé au préalable tous les suspects. Et Dieu sait s'ils sont nombreux dans tous les maillons d'une chaîne de reproduction, acoustique de la salle comprise!

Quoi qu'il en soit, on peut considérer comme atteints les buts pro-

posés au départ: comprendre pourquoi les mesures électriques n'étaient pas significatives en matière de qualité sonore, (puisqu'elles portaient sur un signal qui demeure intact), et permettre de contribuer ainsi à une amélioration significative et reconnue de la musicalité des chaînes haute-fidélité.

En attendant mieux?

Bonnes écoutes!

Pierre JOHANNET (66)

Figure 5. Prototype terminé.



Bibliographie

- [1] Pierre JOHANNET :
« Dix ans de recherche
sur la musicalité en
haute-fidélité ». *Diapason* hors-série.
Novembre 2004 n° 34H.

Figure 6. Autre version à ébénisterie travaillée.



Le codage numérique du signal sonore

Le codage numérique de signaux sonores exploite différentes connaissances *a priori* sur leurs caractéristiques afin de permettre une réduction du débit numérique associé pour une qualité d'écoute donnée. Nous décrivons ici trois approches fondamentales pour encoder numériquement un signal sonore : la représentation du signal dans l'espace des amplitudes, la mise en œuvre d'un modèle de production et l'utilisation d'un modèle de perception.

Représentation dans l'espace des amplitudes

La numérisation consiste en une discrétisation temporelle (échantillonnage) et des amplitudes (quantification) du signal analogique en sortie du capteur (microphone).

Pour mettre en œuvre l'échantillonnage, une solution simple et qui n'occasionne aucune dégradation de qualité consiste à discrétiser le signal en respectant le théorème de Shannon, c'est-à-dire en utilisant une fréquence d'échantillonnage au moins égale au double de la bande occupée.

La quantification peut s'effectuer en utilisant une loi uniforme sur la dynamique du signal (niveaux équi-répartis), un codage binaire étant associé à chaque plage. Lors de la quantification, la valeur des échantillons est arrondie au plus proche niveau, ce qui induit une perte de qualité par l'apparition d'un bruit de quantification. On décrit généralement la qualité résultante, à l'aide du rapport signal sur bruit de quantification, exprimé en décibels (Figure 1).

L'ensemble de ce procédé couramment utilisé, est dénommé PCM

(Pulse Code Modulation) ou MIC (Modulation par Impulsions Codées). Pour un signal téléphonique dont la fréquence maximale est de 3 400 Hz, en échantillonnant à 8 kHz pour 4 096 niveaux (12 bits), on engendrerait un débit numérique de 96 kbits/s. Un signal musical requiert l'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage plus grande (par exemple 44,1 kHz) et un nombre de niveaux plus importants (65 536, codés sur 16 bits) pour garantir une qualité satisfaisante (soit un rapport signal sur bruit d'au moins 96 dB).

Des connaissances supplémentaires sur le signal permettent d'améliorer cette technique :

- Pour un signal de parole, la répartition des amplitudes n'est pas uniforme : les amplitudes modérées sont plus probables que les amplitudes extrêmes. Une amélioration consiste alors à définir une répartition des niveaux d'autant plus fine que les amplitudes sont faibles. On peut ainsi garantir un rapport signal sur bruit pratiquement constant (38 dB) pour une large dynamique du signal avec seulement 256 niveaux (correspondant à un débit de 64 kb/s); alors qu'une loi uniforme en requiert 16 fois plus.

- Il advient également que les échantillons à quantifier ne soient pas indépendants. En exploitant la corrélation entre les échantillons, on peut obtenir un meilleur compromis débit/qualité. La quantification de la différence entre deux échantillons (on parle alors de quantification différentielle) peut être effectuée en utilisant moins de bits. Une application à l'extrême, appelée modulation Delta, consiste à faire une conversion sur un seul bit, décrivant la croissance ou décroissance du signal. Pour permettre d'atteindre de très bonnes qualités d'encodage, ce procédé requiert l'utilisation d'un pas de variation D très faible et d'une fréquence d'échantillonnage très importante. C'est ce qui a été proposé par Sony et Philips pour le format SACD (Super Audio CD), qui a recours à une fréquence de 2,8 MHz et offre un rapport signal sur bruit supérieur à 120 dB (Figure 2).

Mise en œuvre d'un modèle de production

Ces techniques sont apparues principalement dans les réseaux



Lionel Husson (93) Diplômé de Supélec et docteur es sciences de l'Université Paris XI (1998). Lionel Husson est depuis 1997 enseignant-chercheur à Supélec où il dispense notamment le cours magistral « Signal et Communication ». Il est également responsable de la session de formation continue « Le signal sonore à l'ère de l'Internet ». Ses travaux de recherche se situent dans les domaines des communications numériques et du traitement du signal.

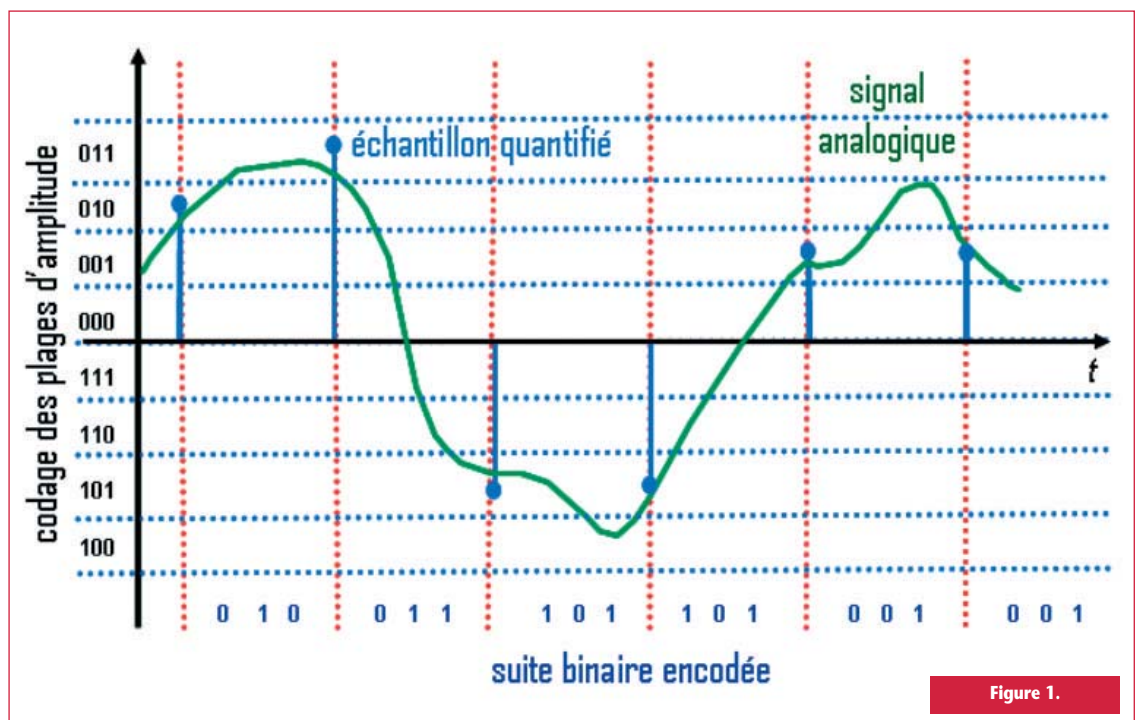


Figure 1.

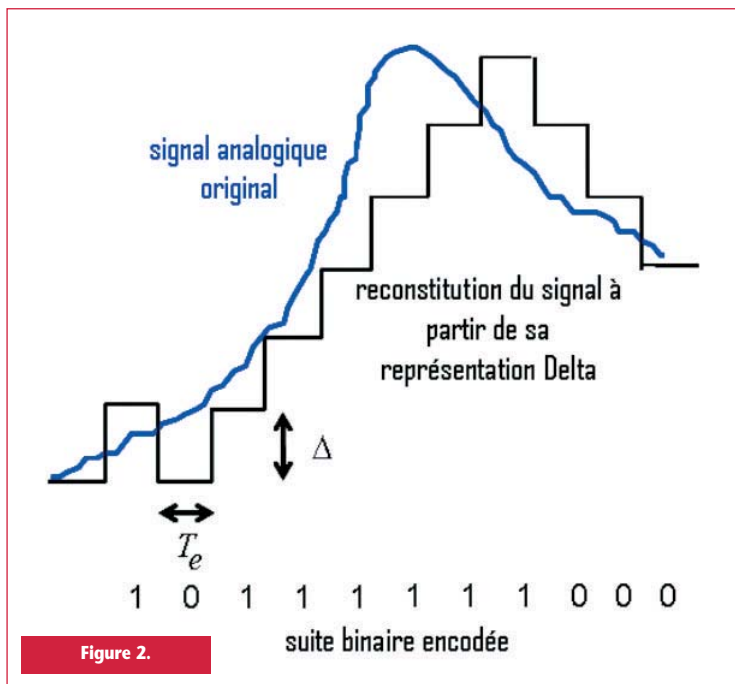


Figure 2.

téléphoniques, pour lesquels la diminution du débit associé au signal audio s'est révélée être un facteur majeur permettant d'augmenter la capacité (c'est-à-dire le nombre d'utilisateurs dans une zone donnée).

Elles reposent sur une connaissance des mécanismes de production du signal vocal.

L'appareil de phonation humain peut être décomposé en une source, le flux d'air en provenance des poumons, modulée par les cordes vocales et créant des ondes de pression se propageant à travers le conduit vocal qui s'étend du pharynx aux lèvres (incluant aussi la cavité nasale pour certains sons, dits nasalisés) (Figure 3).

Deux types de sons peuvent être produits lors de la phonation : les phonèmes voisés (« a », « un » par exemple) pour lesquels les cordes vocales créent des impulsions de pression en s'ouvrant et se refermant périodiquement, et les phonèmes non voisés (« ch », « f » par ex.) pour lesquels les cordes vocales sont au repos.

Cette connaissance de l'appareil vocal permet d'effectuer un encodage utilisant le modèle de production suivant : le signal est le résultat du filtrage d'une source (peigne d'impulsions périodiques ou signal aléatoire) par un filtre numérique caractérisant le conduit. En effectuant une analyse à l'aide de ce modèle, on obtient un jeu de paramètres que l'on encode, au lieu de transmettre le signal lui-même.

Une réduction substantielle du débit peut ainsi être atteinte (Figure 4).

Ce procédé fut développé pour des transmissions militaires sous l'appellation LPC-10 (Linear Predictive Coding, 10 coefficients).

La qualité faible qui en découle est la contrepartie de la compression importante (débit de 2,4 kb/s pour une conversation téléphonique).

Les vocodeurs (codeurs de la parole), employés dans les systèmes de radiocommunications mobiles, utilisent ce même principe en le complétant par une prédiction à long terme des paramètres du modèle.

Le codeur RPE-LTP (Regular Pulse Excitation with Long Term Prediction) du GSM offre une qualité satisfaisante pour un débit de 13 kb/s.

Utilisation d'un modèle de perception

D'autres pistes ont été envisagées plus récemment pour obtenir un codage de source plus efficace. En se re-situant dans le contexte plus global d'une communication, il apparaît que les aptitudes du récepteur, représentées par un modèle de perception, sont à intégrer dans le codage source. Ainsi, il est inutile de chercher à transmettre un signal sonore qui ne sera pas perçu.

La modélisation de l'appareil auditif humain est l'objet de la théorie de la psychoacoustique. Les travaux de cette discipline révèlent que la perception auditive est essentiellement liée à la constitution spectrale du signal.

De plus, le mécanisme de l'audition fait intervenir des « capteurs » : les cellules ciliées qui réagissent à la présence d'ondes à des fréquences spécifiques. Il a été mis en évidence qu'un stimulus de fréquence proche de celui d'une cellule ciliée donnée peut diminuer, voire inhiber sa réaction. C'est ce que l'on appelle le masquage fréquentiel.

Les codeurs psychoacoustiques (AAC, ATRAC, mp3...) utilisent ce

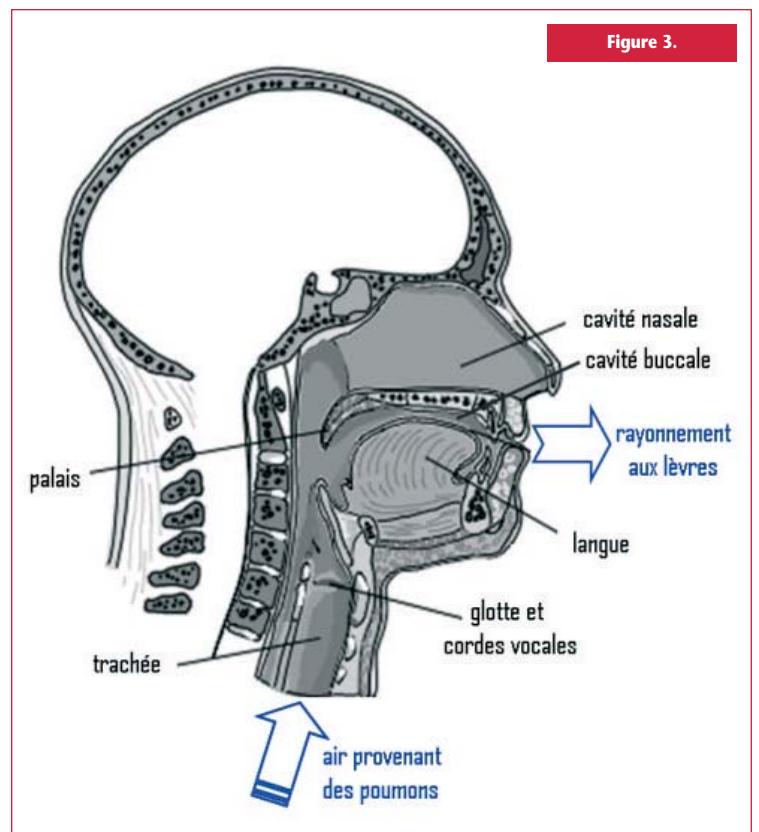
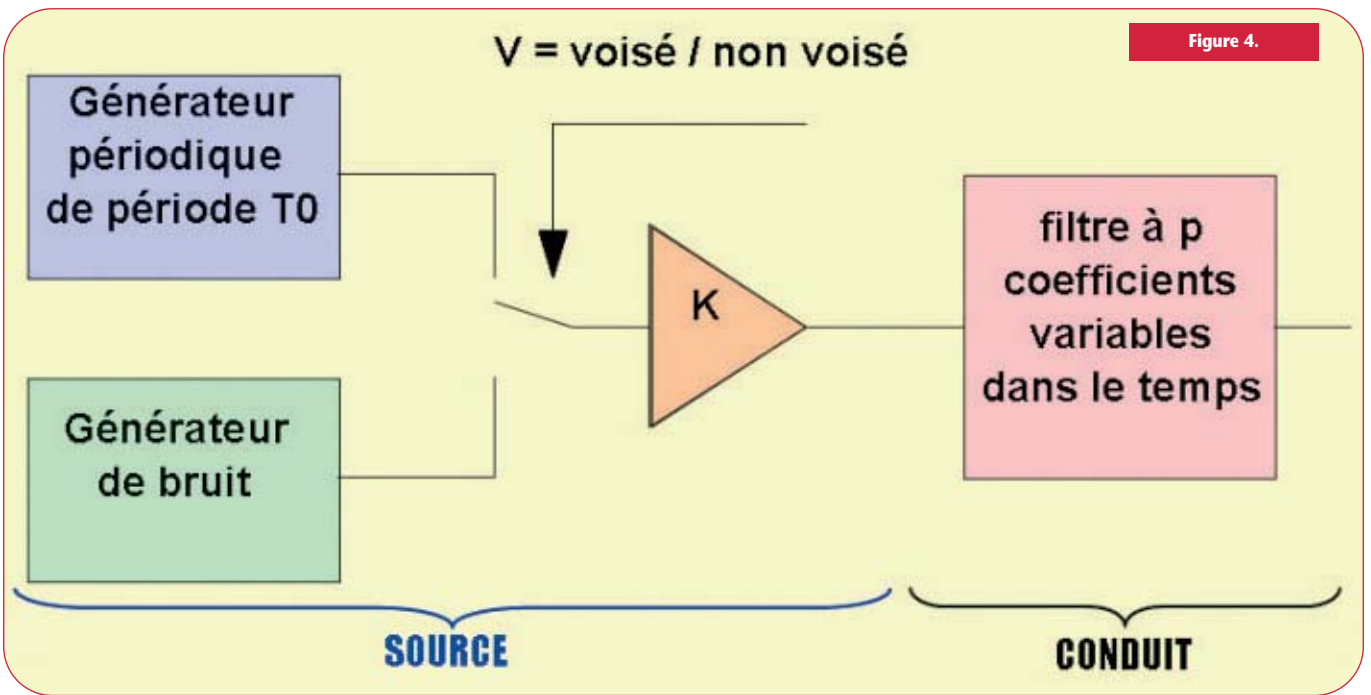


Figure 3.

Figure 4.



principe: les signaux sonores sont décomposés en composantes significatives dans le plan perceptuel (Figure 5).

On évalue une courbe de masquage et chaque composante est encodée avec un nombre de bits dépendant de sa position par rapport au masque.

L'adjonction d'une technique de compression sans pertes (algorithme de Huffman) permet d'obtenir des débits modérés (autour de 100 kbits/s pour un signal stéréo) avec une qualité satisfaisante.

Quel avenir pour le codage numérique des signaux sonores ?

Les orientations actuelles du codage numérique audio s'établissent vers deux segments très différents. D'une part, la compression à l'aide de modèles psychoacoustiques, permet la diffusion rapide d'œuvres musicales et donc leur stockage en très grande quantité sur des baladeurs. Face à cet engouement du grand public, la gestion des droits des œuvres numériques et les techniques anti-

piratage sont des sujets de préoccupation croissants. D'autre part, l'apparition de supports à très grande capacité de stockage ouvre la voie à des formats procurant une fidélité à la hauteur des espérances des mélomanes.

Cependant, comme ces évolutions de formats nécessitent des équipements (lecteur, ampli, enceintes) appropriés pour profiter de la finesse acoustique du signal enregistré, le marché reste actuellement très limité.

Lionel HUSSON (93)

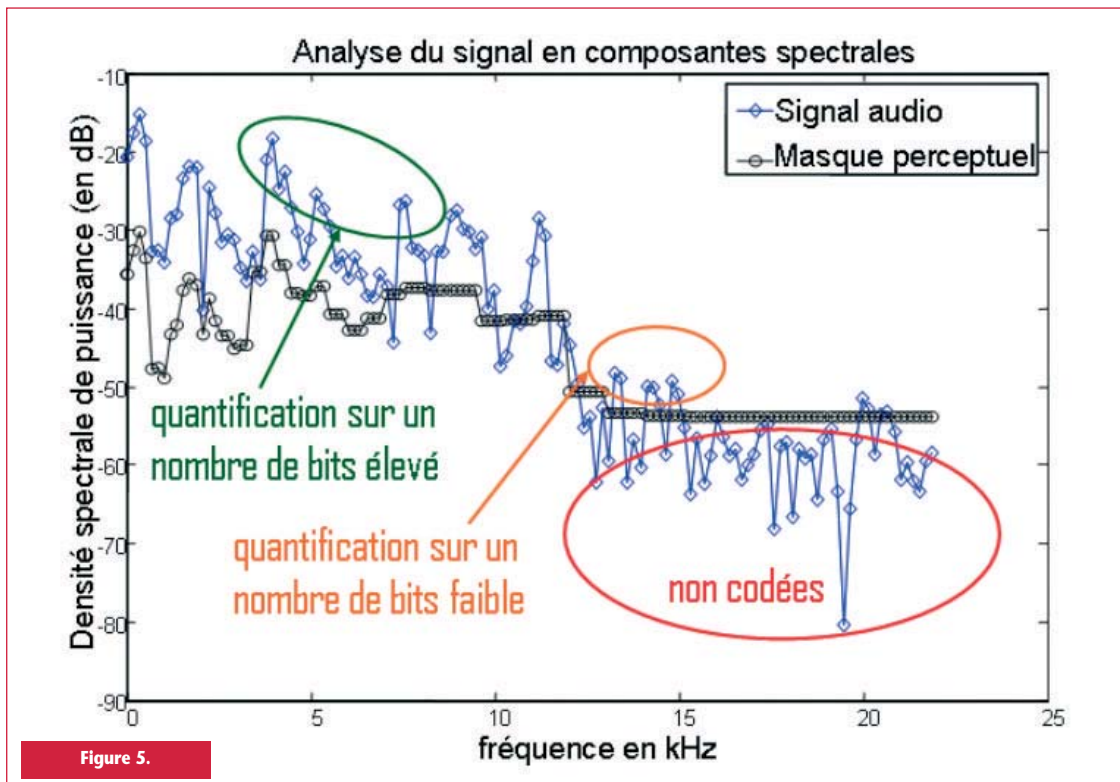


Figure 5.

La qualité numérique : le point de vue de l'ingénieur audiophile



Yves Berré (66)

Un rappel (rapide) sur les signaux analogiques et numériques

Remarquons tout d'abord, qu'en ce qui concerne le son, le capteur, c'est-à-dire le microphone, est toujours analogique; il fournit une tension – en général très faible – (quelques mV) qui est l'image des variations de pression de l'air. Comme il s'agit là du niveau 0 dB, et que la dynamique d'un bon micro est d'au moins 80 dB, c'est-à-dire 1 à 10 000, on voit que les tensions les plus faibles délivrées seront d'une fraction de micro-volts.

Un tel signal est bien sûr très sensible aux interférences et parasites de toutes sortes; on s'empresse donc de l'amplifier au plus près du micro (parfois même dedans) puis de le convertir aussitôt que possible en numérique: les premières prises de son dites « numériques » datent du temps du microsillon, bien avant la sortie du CD.

On peut alors le transporter, le travailler et l'enregistrer sans rien lui faire perdre de sa qualité d'origine, du moins en principe, s'il n'y a pas d'erreurs de lecture ou de copie. A ce stade, deux cas se présentent :

- ou le support est analogique (disque microsillon, magnétophone analogique, mini K7, radio AM ou FM, télé mono) et la conversion s'opère avant gravure ou modulation,

- ou le support est numérique (CD, DVD, SACD, DAT, mini-Disc, MP3, TNT, DAB, télé « NICAM ») et la conversion s'opère après lecture ou réception.

(Se reporter au glossaire pour l'explication des sigles).

A l'autre bout de la chaîne, chez l'auditeur, le haut-parleur est bien sûr analogique, et il est nécessairement précédé au moins d'un étage d'amplification de puissance lui aussi analogique destiné à lui fournir les watts nécessaires, et d'un étage d'amplification en tension avec réglage de volume. En cas de transmission numérique, la conversion s'opère donc au plus tard avant l'amplification de puissance⁽¹⁾.

Penchons-nous maintenant sur ces deux opérations.

La conversion analogique/numérique ou numérisation (figure 1)

Tout d'abord, on échantillonne le signal analogique au moyen d'un échantillonneur-bloqueur (figure 2), puis on convertit cet échantillon en numérique en comptant les impulsions d'une horloge pendant une durée proportionnelle à l'amplitude de l'échantillon⁽²⁾. Les questions qui se posent alors sont :

- à quelle fréquence faut-il échantillonner ?
- sur combien de bits faut-il convertir ?

La réponse à la première question conditionne la bande passante et détermine la fréquence d'échantillonnage à travers le célèbre théorème de Shannon : pour pouvoir reconstituer le signal d'origine au moyen d'une conversion numérique/analogique, il faut impérativement que son échantillonnage ait été effectué à une fréquence f' au moins double de la plus élevée des fréquences qu'il contient.

Par exemple, si l'on considère que les harmoniques les plus élevées d'un signal musical ne dépassent pas $f = 20$ kHz, il faut échantillonner au moins à $2f = 40$ kHz. Il s'agit là d'une condition nécessaire, mais pas suffisante. C'est-à-dire que le respect de cette condition assure que le signal d'origine pourra être reconstitué, mais elle ne dit rien sur la précision de cette reconstitution. Car, il est évident que reconstituer une sinusoïde au moyen de quelques échantillons seulement ne permet pas une grande précision.

La réponse à la deuxième, conditionne la dynamique, c'est-à-dire l'écart entre les signaux les plus forts et les plus faibles, et détermine le nombre de bits sur lesquels on va numériser l'échantillon. Mais en réalité, plus le signal est faible, moins bien il est traité: par exemple en numérisant sur 16 bits, des extinctions de note se situant au voisinage de -60 dB ou 1/1 000 du signal d'origine, ce qui est encore audible, ne disposent plus que de quelques bits pour être décrites et le seront donc avec une précision médiocre.

Lorsque les standards du CD ont été définis par Philips et Sony dans les années 80, on a choisi d'échantillonner à 44,1 kHz sur 16 bits en

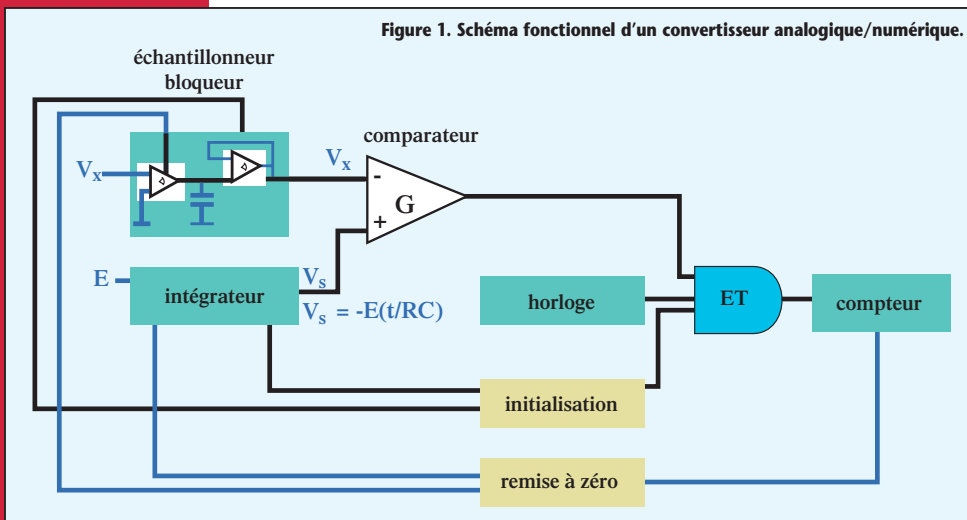
(1) On commence à voir apparaître des amplificateurs capables d'attaquer les haut-parleurs directement en numérique via une conversion en modulation de largeur d'impulsion : MLI en français ou PWM (pulse wave modulation) en anglais, à l'image de ce que l'on fait pour les moteurs industriels à vitesse variable.

(2) Rappelons que la numérisation est une invention française (brevet LMT du 3 octobre 1938); voir « Une histoire du numérique » par G. Phélizon (42) dans FLUX n° 165 de février 1995.

S'il est un argument dont on nous rebat les oreilles en ce moment, c'est bien celui-là. Que ce soit à propos de photo, de téléphone, de disque, de télévision ou de radio, on est prié de croire en la qualité du numérique – voire du digital ! (clin d'œil à Alain Paquette et sa chronique linguistique) – et du son "laser" comme à la Sainte Trinité ou au postulat d'Euclide.

(suite page 16)

Figure 1. Schéma fonctionnel d'un convertisseur analogique/numérique.



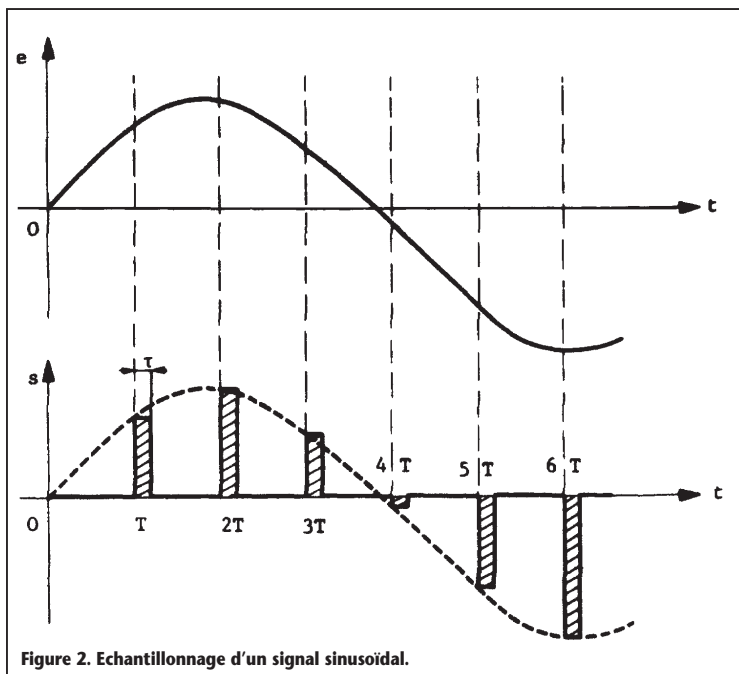


Figure 2. Echantillonnage d'un signal sinusoïdal.

stéréo simplement parce que c'était le maximum de ce que la technique de l'époque permettait de faire à un coût abordable. Mais par la suite, les critiques apportées par les musiciens et les audiophiles ont amené – les progrès de la technique aidant – à définir de nouveaux standards avec une fréquence d'échantillonnage de 96 puis 192 kHz sur 24 bits, censés amener un supplément de finesse et de délicatesse dans les aigus et sur les extinctions de notes.

Ces standards, utilisés depuis de nombreuses années déjà par les professionnels de l'enregistrement, ont débouché sur le DVD audio et le SACD (voir l'article de Thierry Balasse) qu'on commence à trouver sur les rayons des disquaires, avec discrétion toutefois car il est à craindre que la plupart des installations courantes – même équipées du lecteur *ad-hoc* – et surtout des oreilles! ne permettent pas d'apprécier la différence, et que donc leur diffusion demeure confidentielle.

La conversion numérique/analogique (figure 3)

Un amplificateur opérationnel réalise la sommation de n courants proportionnels au poids binaire des n bits via un réseau de résistances $R, 2R, \dots, nR$. La précision des résistances et le niveau de bruit de l'amplificateur sont bien sûr cruciaux. La théorie montre que cette opération génère des harmoniques qui – si la fréquence d'échantillonnage a été suffisante lors de la conversion

analogique/numérique – se situent au-delà de la bande passante du signal reconstitué; on élimine alors ces harmoniques au moyen d'un filtre analogiques à pente raide.

Dans les deux types de conversions, l'une des difficultés à vaincre consiste à obtenir une linéarité parfaite entre les signaux analogiques et numériques, principalement dans les petits signaux (figure 4).

Au fait...

Tout cela étant dit, revenons à notre propos qui est de comprendre si le slogan « la qualité numéri-

que » est fondé dans le domaine audio, et en quoi.

Remarquons tout d'abord que l'on part d'un signal analogique pour y revenir finalement. **La numérisation intermédiaire ne peut en aucun cas améliorer la qualité d'origine**, puisqu'elle correspond obligatoirement à une perte d'information entre 2 instants d'échantillonnage (en théorie du signal, on dirait à une augmentation d'entropie du système); tout au plus peut-on espérer quelle ne la dégradera pas. Par contre, le fait de transporter, travailler, enregistrer etc. le signal sous forme numérique représente incontestablement un plus dans la mesure où il reste alors égal à lui-même et insensible aux parasites et distorsions... si on ne lui en rajoute pas volontairement!

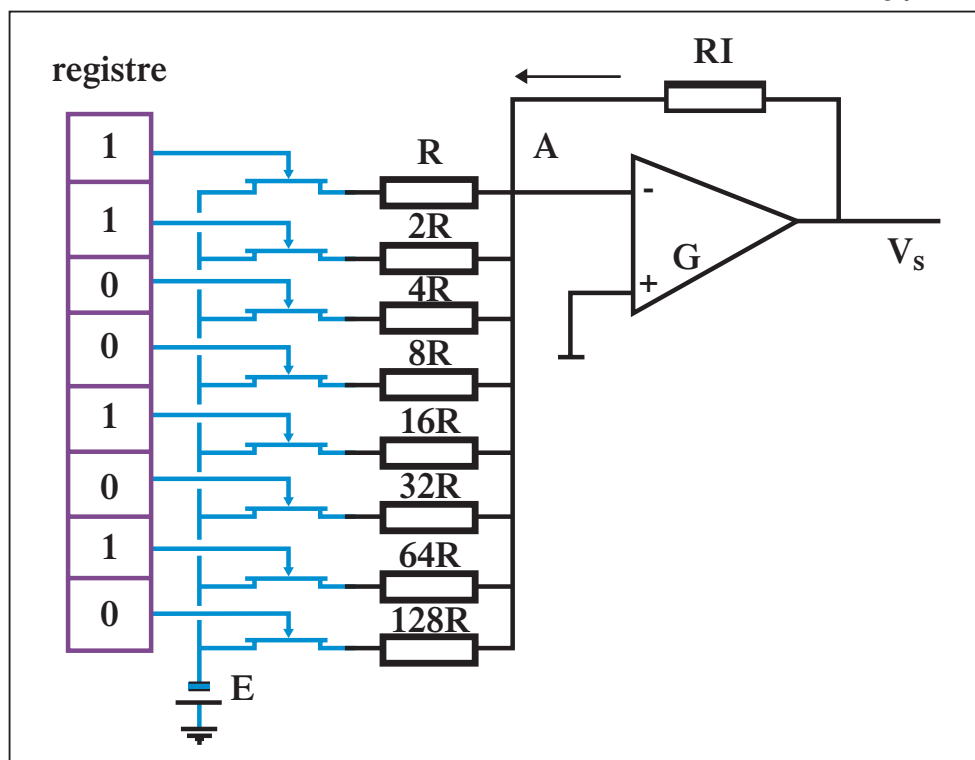
Car c'est bien là, le problème. Prenons seulement deux exemples concernant les compressions.

La compression de dynamique

En théorie, le numérique devrait permettre une dynamique très supérieure à l'analogique handicapé par un bruit de fond supérieur.

Dans la musique classique en particulier, la dynamique est considérable et doit nécessairement être un peu compressée pour passer sur les ondes ou sur les disques. Malheureusement, il est très fréquent que cette compression soit excessive, particulièrement dans les

Figure 3. Schéma fonctionnel d'un convertisseur numérique/analogique 8 bits.



(suite de la page 14)

Oser prétendre le contraire relève du même courage dont ont fait preuve en leur temps Galilée et Giordano Bruno, et fait encourir le même risque : être condamné par les médias tout puissants qui jouent dans notre société moderne le rôle de la Sainte Inquisition.

Mais un ingénieur est toujours un peu iconoclaste : il aime bien comprendre et pour cela mettre en doute ce qu'on lui assène comme une vérité révélée. Essayons donc de démêler la technique d'avec le marketing, en nous limitant, ainsi que ce numéro se le propose, aux aspects liés au son.

variétés, et que tout soit raboté au voisinage du 0 dB, ce qui donne l'illusion d'un son plus fort et permet de mieux « passer » dans les auto-radio ou dans les lieux publics. Nous avons même entendu un enregistrement d'œuvres pour piano de Mozart (d'un label jaune pourtant célèbre!) avec des « pianissimos » ramenés au voisinage d'un « mezzo-forte ». Les conditions habituelles d'exploitation ne permettent donc pas souvent d'exploiter ce potentiel, surtout à la radio, et de fait on ne constate guère de différence sur ce point entre un bon microsillon et un CD.

La compression de données

Sur un CD conventionnel de 12 cm de diamètre contenant 800 Mégaoctets, on ne peut faire tenir que 80 mn de musique.

De nombreux standards de compression ont fleuri afin de diminuer l'emplacement occupé par la numérisation. Il y en a de nombreux; les plus utilisés sont :

- l'ATRAC qui est le standard du mini-Disc; il permet de faire tenir le contenu d'un CD sur un petit disque de 6 cm de diamètre. Le taux de compression est relativement faible et le résultat excellent (figure 5);
- Le MP3 (ou plutôt les MP3, car il y a différentes valeurs de compression), abréviation de MPEG3, qui est le standard adopté par l'informatique et Internet et qui s'est rapidement diffusé dans le grand public sous forme de baladeurs. Là, le taux de compression est beaucoup plus élevé, parfois trop, et cela s'entend : lors de l'écoute de certaines radios sur Internet par exemple, l'on entend un son creux et acide, comme si l'on écoutait à l'extrémité d'un long tuyau. Les compressions MPEG sont également utilisées en radio et TV numérique (DAB et TNT).

Figure 5. Baladeur mini-Disc (pour l'échelle: pile 1,5 V type AA).

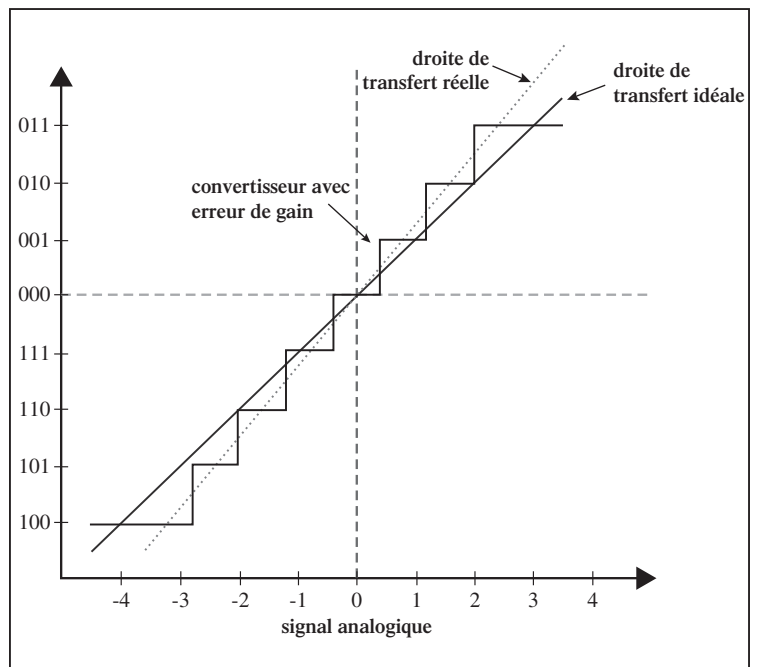


Figure 4. Non linéarités de conversion.

Tous ces systèmes ont en commun de supprimer des informations que l'oreille est censée ne pas entendre (effets de masque).

C'est un peu comme si l'on supprimait la moitié des violons d'un orchestre en supposant que le résultat ne sera pas perçu par 90 % des auditeurs, ou encore que l'on décide qu'il y a trop d'arômes différents dans un grand vin et que la moitié suffit à la majorité des consommateurs. C'est probablement vrai; on apprécie ou pas, tout dépend du but recherché.

Dans ce cas, la « qualité » est une dégradation consentie en contrepartie d'une plus grande commodité d'usage. On aura donc en pratique un résultat moins bon (ou presque aussi bon) qu'avec un traitement analogique de qualité.

Et la Haute-Fidélité dans tout ça ?

Le point de vue du mélomane ou « Audiophile »

Beaucoup d'arguments vantant la supériorité du numérique se basent sur le fait que cette technologie présente de meilleurs résultats sur le papier ou aux mesures. Mais on sait bien, en particulier dans l'électronique, qu'au-dessus de valeurs minimales maintenant faciles à atteindre avec la plupart des technologies actuelles, il n'y a pas de relation entre les mesures et la qualité perçue.

Nous ne pouvons que reproduire ici, ce que nous écrivions dans le n° 189 à propos de la haute fidélité :

«Ce terme s'applique à des ensembles de reproduction sonore visant à une restitution de la musique "fidèle", c'est-à-dire aussi proche que possible de l'original – quand il y en a un – avec toutes les limitations qu'impose l'écoute domestique, mais recherchant plus une certaine "présence" et une émotion liée à la perception de micro détails (respiration des instrumentistes, bruits de pages tournées, réverbération naturelle du local de prise de son) qu'un strict respect de la dynamique ou du niveau sonore, ce dernier variant d'ailleurs notablement dans une salle de concert suivant l'endroit où l'on est assis ».

Cette émotion, cette sensation de présence, ne se laissent pas enfermer aussi facilement par des valeurs de bande passante, de dynamique, et de rapport signal/bruit. En finale, seule l'oreille est juge.

Conclusion

Alors, la qualité numérique, du vent? Tout dépend de ce que l'on entend (!) par « qualité ». Si l'on fait rimer « qualité » avec « commodité », dans la mesure où les disques numériques sont bien plus faciles à lire, à manipuler et à stocker que leur homologue analogique, où la radio numérique sera peut-être plus facile à capter avec une petite antenne que la FM⁽³⁾, et où le numérique autorise plus faci-

(3) Quant à la télévision, le son actuel étant déjà numérisé en NICAM, on ne voit pas bien pourquoi celui de la TNT lui serait supérieur dans les conditions normales d'écoute, à part sur le papier (échantillonnage à 32 kHz sur 14 bits contre 44 kHz sur 16 bits) d'autant qu'il sera compressé.

lement l'obtention d'un résultat correct sur un équipement de prix et d'un volume raisonnable, cela correspond indiscutablement à une certaine « qualité » qui a permis et continuera à permettre la diffusion de masse d'équipements de reproduction sonore autrefois réservés à une petite minorité de passionnés.

disques microsillons, de marque Thorens, équipée d'un bras de lecture d'origine anglaise « SME » dont l'articulation dans le plan horizontal est montée sur couteaux, ce qui lui assure des frottements extrêmement faibles.

On remarque sur la photo, outre le contrepoids principal d'équilibrage

difficulté de mise en œuvre, en particulier de l'optimisation correcte des nombreux réglages du bras et de l'amplification du signal.

De même, on ne constatera pas de supplément de qualité du son de la DAB par rapport à celui fourni par les meilleurs tuners analogiques actuels ou passés (il y en eut autrefois de célèbres, à tubes, très recherchés par les amateurs, qui sont restés à peu près inégalés).

Yves BERRIÉ (66)



Figure 6. Platine de lecture « haute fidélité » pour disques microsillons.

Il est certain que le mini Disc se montre très supérieur à la mini K7 malgré les perfectionnements parfois très sophistiqués dont elle avait bénéficié, notamment en matière de réducteurs de bruit (il est vrai qu'au départ, elle n'avait absolument pas été conçue en vue de la Hi-Fi). Il est tout aussi certain que le son stéréo « NICAM » actuel de la télévision est infiniment supérieur à l'ancien son en modulation d'amplitude.

Mais dans l'absolu, sur du haut de gamme? Quand il s'agit de disques microsillons ou de tuner FM⁽⁴⁾? Là, le numérique n'apporte aucun supplément de qualité par rapport aux anciens équipements, parfois même au contraire puisqu'il est fréquent que la différence perçue soit en sens inverse de celui promis par le marketing.

A titre d'exemple, la figure 6 montre un exemple de matériel de lecture dont la qualité reste exemplaire malgré un quart de siècle d'ancienneté : il s'agit d'une platine de lecture haute-fidélité pour

et de réglage de la force d'appui dans le plan vertical, un petit contrepoids secondaire destiné à assurer l'équilibrage dans le plan horizontal, ainsi qu'une masselotte suspendue à un fil pour la compensation de la force centripète due au frottement de la pointe sur le disque.

L'articulation peut également être réglée en hauteur – ce qui est primordial pour donner au diamant suspendue à un fil pour la compensation de la force centripète due au frottement de la pointe sur le plateau.

La cellule phonocaptrice est du type MC (moving coil ou bobine mobile) à diamant elliptique délivrant 0,25 mV à 1 kHz au niveau 0 dB⁽⁵⁾. Il faut donc lui associer un préamplificateur-correcteur à la norme RIAA capables de traiter des signaux de quelques μ V avec un niveau de bruit inférieur à -60 dB⁽⁶⁾.

Avec un matériel de ce type, on arrive à une délicatesse et une chaleur de restitution à peu près inégalées en CD, avec un bruit de lecture le plus souvent imperceptible.

Il est certain que ce genre de matériel a été et reste de faible diffusion, à cause de son prix, certes, (c'est celui d'un téléviseur à écran plasma) mais aussi de la

Glossaire

Avec tous ces sigles et acronymes, une chatte n'y retrouverait pas ses petits. Voici de quoi retrouver les vôtres. C'est d'ailleurs ce qui fait le charme d'une des meilleures revues de vulgarisation informatique⁽¹⁾, qui rappelle systématiquement en marge la signification des nombreuses abréviations dont sont parsemés ses textes.

ATRAC : Adaptive Transform Acoustic Coding ou codage acoustique par transformation adaptative : standard de compression du mini-Disc.

CD : Compact Disc ou disque compacte.

DAB : Digital Audio Tape (recorder) : magnétophone à bande magnétique, portable, enregistrant en numérique ; n'a guère dépassé le domaine professionnel.

DAT : Digital Audio Tape (recorder) : magnétophone à bande magnétique, portable, enregistrant en numérique ; n'a guère dépassé le domaine professionnel.

DVD : Digital Versatile Disc ou disque numérique universel : peut enregistrer vidéo, audio multicanal ou pas, ainsi que tous les fichiers numériques. On peut l'acheter déjà gravé (films, concerts...) ou vierge pour le graver soi-même sur son ordinateur ; dans ce cas il existe en « R » (Read ou « inscriptible ») et en « RW » (Read/Write ou « réinscriptible »).

MPEG : Motion Picture Expert Group : norme d'encodage et de compression de fichiers vidéo. Se décline en version 1, 2, 3, 4... (voir note 2).

MP3 : abréviation de MPEG Audio Layer 3 : Standard de compression issu des besoins de l'Internet. Son taux de compression est variable, il peut monter à 12, avec une conséquence audible sur la qualité (le MPEG2 est le standard de compression actuel du DVD vidéo et de la TNT, tandis que le MPEG4 sera celui de la TV haute définition).

NICAM : Near Instantaneous Companded Audio Multiplex ou multiplexage audio à compression quasi instantanée : standard actuel de la TV en stéréo.

SACD : Super Audio Compact Disc.

TNT : Télévision Numérique Terrestre (compression en MPEG).

(1) Micro-Hebdo.

(2) Le MPEG2 est le standard de compression actuel du DVD et de la TNT, tandis que le MPEG4 sera celui de la TV haute définition.

(4) Des émissions FM numériques (DAB) sont diffusées dans un certain nombre de pays d'Europe, mais pas encore en France.

(5) Il existe bien d'autres platines, bras et cellules de qualité équivalente ou supérieure toujours fabriqués de nos jours par de nombreuses firmes européennes et japonaises.

(6) Norme d'enregistrement des disques microsillons.

A propos du SACD : L'avis d'un professionnel de la sonorisation



Thierry Balasse

Après une formation à l'École Nationale Supérieure des Arts et Techniques du Théâtre, Thierry BALASSE, également titulaire d'un B.T.S. de sonorisateur et d'un Diplôme de Hautes Études de Pratiques Sociales (Paris Censier), s'est spécialisé dans l'étude des relations entre les perceptions visuelles et auditives des spectateurs.

Il est actuellement directeur de la société Inouïe (production de phonogrammes et de spectacles musicaux) et conseiller technique pour le numérique auprès de Pierre Henry (ingénieur du son et compositeur de musique électroacoustique).

Mes premières expériences professionnelles de prise de son remontent à 1984. A cette époque, nous travaillions encore sur des systèmes magnétiques analogiques, même si le Disque Compact venait d'arriver sur le marché.

Lorsque sont arrivés les premiers systèmes D.A.T., nous permettant d'enregistrer en stéréo, en numérique, sur un support de qualité équivalente au support final, le CD, il nous a fallu repenser totalement notre travail de captation sonore.

Je fais partie des preneurs de son qui ont vu arriver le numérique avec plaisir. En tant qu'auditeur, le disque vinyle me convenait plutôt bien. Il fallait bien entendu les manipuler avec soin, et être attentif à l'état de la pointe de lecture. Mais ce n'est pas un hasard si ce support existe toujours aujourd'hui, et s'il est très prisé des audiophiles ; il offre en effet des possibilités de qualité de restitution très satisfaisante même pour des oreilles exercées.

Mais en tant que preneur de son, l'enregistrement magnétique nous causait quelques soucis de bruit de fond, de bonne gestion des niveaux d'enregistrement et de respect de la dynamique. Je précise ici, que mon activité de preneur de son s'exerce essentiellement pour la musique ancienne et le jazz acoustique, deux domaines musicaux exigeants en terme de dynamique du signal.

Le DAT et sa duplication grand public sur CD nous a apporté dans un premier temps un plus grand respect de notre travail de prise de son. En effet, la gravure sur vinyle nécessite des manipulations de filtrage (étape de la masterisation) qui conduisent à un son parfois assez différent de celui entendu sur le support de prise de son.

Avec le numérique, les informations gravées sur le CD peuvent reproduire exactement celles du D.A.T., notre support d'enregistrement.

Toutefois, nous nous sommes vite aperçus que la soi-disant dynamique exceptionnelle que nous proposait le numérique en 44,1 kHz à 16 bits (le standard du CD) avait ses limites...

En effet, les sons enregistrés à bas niveau sont moins bien traités que ceux captés à haut niveau. De ce fait, nous avons assez vite été tentés de « tasser » cette dynamique, afin de ramener les niveaux très faibles à un plus haut niveau.

Je n'étais évidemment pas très favorable à ce choix, considérant que le format du CD était déjà bien intéressant pour peu que l'on soigne la prise de son. C'est d'ailleurs pour mon approche très soucieuse de cette étape de la captation, qui lorsqu'elle est bien faite (et lorsque la musique est bien interprétée) permet d'obtenir un beau résultat final sans avoir à faire intervenir des filtres et des effets de changement de niveaux lors du



En cela, nous avons petit à petit instauré une tendance de la production phonographique à aller vers des dynamiques plus tassées. Autre élément important de cette tendance, les musiques électriques (pop, variétés, rock...) qui travaillent sur des écarts de dynamique très faible, apportant à l'auditeur de disque ou de radio une sensation de grande puissance sonore. Une plage de musique classique diffusée à la suite de ce type de musique paraît bien souvent très faible... Les producteurs de disque ont donc depuis quelques années tendance à aller vers une dynamique de plus en plus réduite, et l'écoute musicale s'en ressent.

Il y a peu, j'ai été sollicité par le musicien Benoît Delbecq et le label canadien Songlines pour un enregistrement d'un quintet de jazz sur un nouveau support d'enregistrement, le Super Audio C.D. (voir les précisions techniques).

Cette prise de son nécessitait l'utilisation d'une machine non commercialisée à l'époque, développée par Sony. Cela me demandait donc la prise en charge d'un appareil totalement nouveau, sur informatique, à l'état de prototype donc truffé de « bugs »...

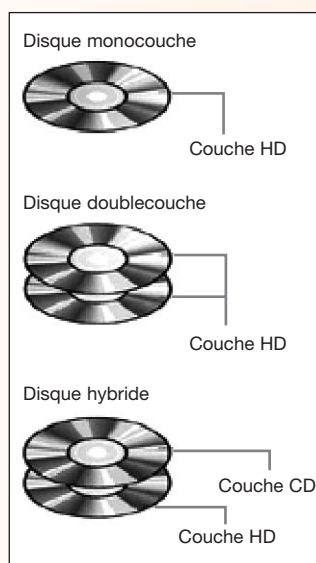
mixage final (nécessaire pour la musique jazz), que j'avais été choisi par la production. Tony Reiff, le responsable du label, m'a finalement convaincu de tester le système, qui nous fut envoyé de Hollande, avec un technicien Sony pour en expliquer le fonctionnement, à mon assistant et à moi-même. Nous avons donc branché le système dans le studio de « La muse en circuit » où j'ai l'habitude de travailler, et qui possède un très beau piano Bösendorfer qu'affectionne particulièrement Benoît Delbecq.

Le premier trouble m'est apparu lorsque pendant les réglages techniques, j'ai à un moment répondu à un musicien que j'entendais via mes enceintes de monitoring, (sans le voir, la cabine du studio ne permettant pas de voir l'espace de prise de son directement), ce qui a provoqué le fou rire de mon assistant, car je répondais à une phrase enregistrée un quart d'heure plus tôt, et que l'assistant rediffusait pour tester le système... Cette anecdote peut paraître simplette, mais en quinze ans de captation sonore, cela ne m'était jamais arrivé sans que j'en prenne conscience. J'ai en effet réalisé ce jour-là que seul le système SACD pouvait me tromper entre le son qui provenait directement des

micros et de la console, et celui capté par le système d'enregistrement. Le système SACD était totalement transparent à mes oreilles... Quand les premiers essais musicaux ont commencé, j'ai alors réalisé à quel point le système d'enregistrement modifiait totalement ma perception. Tous les défauts techniques de la captation, habituellement inaudibles, apparaissaient soudain... Il nous a fallu une journée complète pour imaginer de nouveaux placements des musiciens dans le local, expérimenter de nouveaux micros, trouver des solutions pour atténuer les bruits de transmission des ondes sonores par les pieds des micros... Au final, lorsque le son nous a paru techniquement satisfaisant, nous avons pu démarrer les prises... Les larmes sont alors très vite montées à nos yeux d'expérimentateurs chanceux (avec moi dans la cabine, mon assistant et l'accordeur de piano, non-voyant, totalement abasourdi parce qu'il entendait...) Nous avons abattu les murs du studio, nous étions avec les musiciens... Fini les problèmes de dynamique, tous les plus petits sons étaient captés avec la même qualité que les « forte ». J'avais la sensation de combiner les avantages de l'analogique et ceux du numérique... Quelques jours plus tard, nous avons pu aborder le mixage. Le SACD offre la possibilité de travailler sur cinq enceintes, deux en « stéréo classique », une au centre, et deux enceintes arrières. Ayant par ailleurs une expérience de concepteur de bandes sonores pour le théâtre, j'avais déjà une bonne expérience de la diffusion sur plusieurs enceintes, comme cela se fait depuis longtemps pour le spectacle vivant. J'ai donc abordé cette étape avec plaisir. Bien sûr, il n'est pas question de placer les musiciens tout autour de l'auditeur, mais les cinq enceintes permettent, par différentes astuces, de créer de plans sonores bien plus sensibles qu'avec la simple stéréo. Une profondeur de champ exceptionnelle, et la possibilité de ressentir des résonances venant de l'arrière, comme c'est le cas dans une salle de concert... J'ai depuis réalisé deux autres disques pour le même label sur le même système, et j'ai chaque fois eu la même sensation d'« exceptionnel ». Aujourd'hui, le SACD ne semble pas vouloir s'imposer en France, le DVD audio semble prendre le pas... dommage, car s'il offre la même diffusion en 5 points, il ne possède pas, loin s'en faut, la même qualité de restitution.

Thierry BALASSE

Le SACD en quelques mots



Le disque compact ou CD (Compact Disc) développé par Sony et Philips au début des années 80 apparut alors comme support audio révolutionnaire. Il utilise un format d'enregistrement PCM (Pulse Code Modulation) qui convertit les signaux musicaux en données numériques à intervalles définis par une fréquence d'échantillonnage, sur un certain nombre de bits définissant la précision de la quantification.

A cette époque, les valeurs de 44,1 kHz et 16 bits, procurant une bande passante et une dynamique de reproduction de respectivement 22 kHz et 90 dB, avaient été adoptées, ces valeurs étant censées fournir une qualité parfaite compte tenu des capacités de l'oreille humaine. Mais on s'est rendu compte depuis, que le niveau de sensibilité de cette dernière va bien au-delà, notamment en ce qui concerne les signaux très faibles.

Grâce aux progrès effectués depuis en matière de technologie numérique, il semblait techniquement possible de créer

des enregistrements contenant plus d'informations afin d'améliorer encore la qualité sonore. C'est dans ce but que Sony et Philips se sont associés encore une fois dans les années 90 pour créer un nouveau standard : le Super Audio CD ou SACD.

Beaucoup plus qu'une amélioration de la fréquence d'échantillonnage ou de la précision de la quantification, le SACD représente une approche nouvelle de l'enregistrement numérique puisque dans ce système, les signaux sonores sont convertis par une technologie DSD (Direct Stream Digital ou flux direct numérique).

La fréquence d'échantillonnage du format DSD est de 2,8224 MHz, ce qui permet d'enregistrer le signal sonore sur le disque sous forme de données à 1 bit. Cette augmentation de la fréquence d'échantillonnage diminue le bruit de quantification à basse fréquence, tout en augmentant ce bruit à très haute fréquence, bruit qui est ensuite éliminé lors la reproduction au moyen d'un filtre analogique passe-bas. On peut ainsi obtenir en principe une bande passante de 100 kHz ainsi qu'une dynamique dépassant les 120 dB.

Le SACD peut comporter une ou deux couches réfléchissantes (la seconde étant lue par transparence) sur lesquelles sont inscrits les « trous » et les « bosses » représentant les bits, d'une taille beaucoup plus petite que celles du CD, ce qui multiplie par 4 sa capacité de stockage. On a donc la possibilité de rendre sa lecture compatible avec les lecteurs CD conventionnels en réservant l'une des couches au codage CD stéréo tandis que l'autre couche est réservée au codage SACD en stéréo et/ou en multipiste.

Mais, malgré cette capacité supérieure, ses dimensions restent exactement les mêmes : 12 cm de diamètre et 1,2 mm d'épaisseur. Le SACD surpasse aussi le CD pour la table d'index : il peut enregistrer et indexer jusqu'à 255 pistes séparées au lieu de 99, ce qui autorise la création de compilations de plus de 200 morceaux ou des logiciels d'apprentissage des langues avec un accès très souple.

Pour protéger complètement les droits des auteurs, le SACD utilise la technologie PSP (Pit Signal Processing) qui consiste à inclure des filigranes constitués d'un ensemble contrôlé de cuvettes microscopiques sur la surface du disque. On crée deux types de filigranes : l'un, « invisible », ne peut être détecté que par le lecteur, alors que l'autre « visible » (à l'initiative du fabricant), est imprimé sur le disque sous forme de texte ou d'image.

Si un disque copié est inséré dans le lecteur, ce dernier détecte l'absence du filigrane invisible et en avertit le système de lecture. Les deux types de filigrane sont quasiment impossibles à dupliquer correctement, ce qui permet de distinguer facilement les originaux des disques piratés, en particulier pour le filigrane visible qui est détectable au premier coup d'œil. Ce système évolué permet de protéger les artistes comme les utilisateurs contre les copies illégales.

Le SACD apporte certes beaucoup d'améliorations au CD, mais cela ne signifie pas nécessairement qu'il doive le remplacer. Il existe à l'heure actuelle dans le monde, environ 600 millions de lecteurs de CD et 12 milliards de CD, et leur vente ne va pas s'arrêter pour autant. Le SACD, qui permet d'offrir aux audiophiles exigeants une fidélité supérieure, se pose d'abord en complément du format CD actuel.