

A propos des sons périodiques sans fondamental

par J.-P. LECARDONNEL
Lycée Louis le Grand - 75000 Paris

Dans un intéressant article publié dans ce bulletin [1], relatif au décodage d'un clavier téléphonique, C. CANCE et G. LEFÈVRE, du groupe Evariste, mettent en cause, comme archétype d'une erreur relative aux séries de Fourier, un exercice que nous avons proposé dans notre manuel destiné aux classes de Seconde [2]. Dans cet exercice, nous présentons un spectrogramme où apparaissent des composantes spectrales de fréquences 100 Hz, 150 Hz et 250 Hz. Le fondamental du son est présenté comme «trop faible pour figurer sur le spectrogramme». Nous demandons alors de calculer sa fréquence.

Les auteurs de l'article cité présentent l'objection suivante :

«que l'on trouve une fréquence audible ne change pas le fait que la fréquence trouvée n'est pas celle du son». Je me propose de répondre à cette objection.

DES SONS ABSENTS... MAIS PERÇUS !

Dès 1754, le violoniste et compositeur italien Tartini [3] attirait l'attention sur la perception par l'oreille de sons non effectivement émis par son instrument : dans certains cas, la fréquence perçue était égale à la différence des fréquences des sons émis par deux cordes du violon.

L'existence de sons périodiques sans fondamental, et perçus comme de même hauteur que celle du fondamental manquant, est un phénomène du même type. Elle est décrite dans de nombreux traités de physioacoustique. Ainsi, E. LEIPP indique-t-il, dans «Acoustique et musique» [4] :

– «Considérons un son harmonique ayant une fréquence de 100 Hz : il produit sur nous une sensation de hauteur très précise et bien définie... L'expérience montre que si l'on coupe le fondamental et les harmoniques 2 et 3, on continue à entendre 100 Hz... Seul le timbre est altéré :

le son est plus grêle, plus maigre. Cette observation infirme la théorie classique qui soutient que la sensation de hauteur est donnée par la fréquence du fondamental».

Pour en avoir le cœur net, j'ai réalisé une série d'expériences simples que je vais décrire maintenant.

LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Ces expériences utilisent le sympathique logiciel «Syntheor» de la société Micrelec, associé à l'interface ORPHY. Cette association permet, à peu de frais, de réaliser la synthèse informatique de signaux périodiques variés, en particulier par sommation de termes (jusqu'à 24) d'une série de Fourier. L'usage du logiciel est d'une très grande simplicité. De plus, une fois la forme de signal téléchargée sur l'interface, celle-ci se comporte comme un générateur basses fréquences autonome. On peut alors éteindre l'ordinateur, ou l'utiliser à une autre tâche comme je l'expliquerai plus loin.

Le montage «de base» comporte, outre ce dispositif, un amplificateur de qualité convenable, un haut-parleur (HP1) et un oscilloscope. Celui-ci permet de contrôler la forme du signal appliqué au haut-parleur, afin d'éviter les artefacts. Un générateur basses fréquences, monté sur un second haut-parleur (HP2), permet de générer un signal témoin sinusoïdal, de fréquence égale à celle du fondamental absent dans le signal synthétisé.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

1 - Monter la sortie analogique de l'interface Orphy sur l'entrée de l'amplificateur, et la sortie de celui-ci sur le haut-parleur (HP1).

2 - Produire, en suivant les indications fournies à l'écran, un signal sinusoïdal de fréquence égale à 261 Hz, et l'appliquer au haut-parleur (HP1) par l'intermédiaire de la chaîne déjà décrite. La fréquence 261 Hz est la plus proche de celle du do3 susceptible d'être produite par le logiciel (celui-ci procédant à des arrondis, il faut en fait taper 260 Hz). Accorder alors l'émission du montage témoin (haut-parleur HP2) sur le son produit par Orphy, puis éteindre le B.F. en prenant garde à ne pas modifier la fréquence affichée.

3 - Produire un signal par synthèse de Fourier, en affectant une amplitude nulle au fondamental. Le logiciel demande les amplitudes des différents harmoniques sous la forme $A(i)$, i désignant leur ordre ($i = 1$ pour le fondamental). On peut par exemple taper :

$$A(1) = 0 \quad ; \quad A(2) = 10 \quad ; \quad A(3) = 8, \text{ etc.}$$

Les valeurs tapées donnent les importances relatives des harmoniques ; la tension globale du signal est choisie ultérieurement. Une fois les amplitudes affectées aux différents harmoniques tapées, le logiciel demande la fréquence du fondamental (absent en tant que tel).

4 - Comparer à l'oreille la hauteur du son produit à celle du son pur émis par le montage témoin, après avoir remis celui-ci en service.

OBSERVATIONS

Tout d'abord, une simple mesure à l'oscilloscope suffit à se convaincre que la fréquence du signal synthétisé est bien celle du fondamental absent, contrairement à la malencontreuse formulation des collègues cités ci-dessus. Cette observation est d'ailleurs parfaitement conforme à l'idée même de synthèse de Fourier.

Mais, la hauteur du son **perçu** est-elle bien la même que celle du fondamental absent ?

- La réponse est **oui** si la puissance fournie au haut-parleur n'est pas trop grande, et sous réserve de quelques conditions sur le choix des harmoniques. Notamment si on utilise :

- un grand nombre d'harmoniques, quelques-uns étant d'ordres consécutifs,

- quelques harmoniques seulement, mais d'ordres bas (par exemple seulement l'octave du fondamental manquant et l'harmonique 3, d'amplitudes voisines),

- des harmoniques d'ordres non consécutifs, mais en nombre important. Ainsi, suivant une suggestion de deux collègues américains [5], j'ai supprimé tous les harmoniques pairs, afin d'éliminer l'objection selon laquelle l'auditeur serait victime d'un pernicieux effet «d'octaves». J'ai ainsi fait le choix suivant :

$$A(1) = 0 \quad ; \quad A(2) = 0 \quad ; \quad A(3) = 10 \quad ; \quad A(4) = 0 \quad ; \quad A(5) = 8 \\ A(6) = 0 \quad ; \quad A(7) = 6 \quad ; \quad A(8) = 0 \quad ; \quad A(9) = 4.$$

- La réponse semble être non si les harmoniques sont choisis de façon trop singulière. Ainsi, contrairement à ce qu'écrivent les collègues américains cités ci-dessus, je n'ai pas perçu (ou si peu...) la même hauteur de son que celle du fondamental en utilisant exclusivement les harmoniques 3 et 5.

QUELQUES REMARQUES

Après avoir réalisé ces expériences, j'ai eu un scrupule : le haut-parleur ne produirait-il pas lui-même le fondamental à partir des tensions qui lui sont appliquées, par un effet non linéaire ? La production de «sous-harmoniques» est courante dans ce type de phénomènes. J'ai donc soumis le son de synthèse, produit par le haut-parleur (HP1) et recueilli par un microphone de bonne qualité, à l'analyse spectrale (par Cassy). Cette opération est rendue possible, sans ordinateur supplémentaire, par le fait que l'interface Orphy une fois programmée se comporte comme un générateur autonome (voir plus haut). Point de fondamental...

A cette occasion, j'ai comparé qualitativement, à l'oscilloscope, l'allure de la tension aux bornes du microphone et celle de la tension de synthèse, visible sur l'écran de l'ordinateur, ou sur celui de l'oscilloscope. A quelques atténuations de «bosses» secondaires près, l'analogie est frappante pour un petit nombre d'harmoniques (jusqu'à 5 ou 6). Cette observation paraîtra banale et évidente. Pourtant, elle permet d'illustrer de façon convaincante la notion de signal analogique. L'utilisation d'un signal en créneaux (trop riche en harmoniques d'ordre élevé), pourtant préconisée par les commentaires du programme de Seconde, ne permet en aucun cas d'y parvenir.

L'OREILLE

Ces quelques observations posent des questions complexes sur le mécanisme de l'audition. E. LEIPP propose l'interprétation suivante :

«Nous suggérons alors que la sensation de hauteur est déterminée par l'équidistance entre raies voisines du spectre... Le phénomène est analogue si l'on considère une échelle : à n'importe quel point nous pouvons apprécier le degré de serrage des barreaux. Percevoir la hauteur c'est, de même, jauger l'écartement entre harmoniques voisins».

Remarquons cependant que cette explication ne rend pas compte des situations où il n'y a pas «équidistance des barreaux», comme dans l'expérience mettant en œuvre les harmoniques 2, 3 et 5 seulement.

Les phénomènes décrits sont aujourd'hui largement élucidés [6]. Des mesures fines, effectuées par interférométrie laser, ont montré que les sons «absents» mais néanmoins perçus correspondent à des oscillations effectives d'une membrane de la cochlée, la membrane basilaire. Ces oscillations s'expliquent par le caractère non linéaire d'un des organes essentiels de l'oreille, la cochlée. Ainsi, lorsque l'oreille entend simultanément deux sons de fréquence f_1 et f_2 , il arrive qu'elle perçoive également, par effet non linéaire, les fréquences :

$$f_1 + f_2 \quad ; \quad f_2 - f_1 \quad ; \quad 2f_1 - f_2 \quad ; \quad 2f_2 - f_1, \text{ etc.}$$

En conclusion, le son, dans l'acceptation courante de ce terme [7], n'est pas un simple phénomène physique puisqu'il met en cause les propriétés physiologiques de l'organe de la perception, l'oreille. En aucun cas il ne saurait se réduire au «signal acoustique analogique» qui le véhicule.

REMERCIEMENTS

Je tiens enfin à remercier René MICHALET pour ses indications et son aide lors de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Décodage d'un clavier téléphonique à numérotation à fréquences vocales par analyse spectrale numérique, par C. CANCE et G. LEFÈVRE, B.U.P. n° 761, février 1994, page 245.
- [2] Physique et chimie seconde, collection Galileo, Éditions Bordas.
- [3] Trattato di musica seconda la vera scienza dell'armonia.
- [4] Acoustique et musique, E. LEIPP, Masson.
- [5] Fun with missing fundamentals, T.M. LEE et A.R. KALOTAS, Am. J. Phys. 55, page 184, 1987.
- [6] The ears gears..., A.J. HUDSPETH et V.S. MARKIN, Physics today, février 1994, page 22.
- [7] Petit Larousse ; Petit Robert ; Dictionnaire de physique, J.-P. SARMANT, Hachette.