

Modulation d'amplitude et modulation de fréquence

Les avantages du domaine sonore

par Daniel BEAUFILS
Institut National de Recherche Pédagogique
Département Technologies Nouvelles
91, rue Gabriel Péri - 92120 Montrouge
e-mail : beaufils@inrp.fr

INTRODUCTION

Les nouveaux programmes de physique de lycée ont introduit dès la classe de seconde des éléments d'acoustique musicale reposant sur l'analyse spectrale des sons. À ce niveau, il semble qu'une certaine difficulté réside dans l'utilisation même des outils d'analyse : d'une part les notions de base (fréquence, amplitude, etc. et leur homologues musicaux hauteur, intensité, etc.) ne sont guère maîtrisées et, d'autre part, l'idée même (et *a fortiori* le principe) de *décomposition spectrale* est difficile à expliquer tant du point de vue physico-mathématique que du point de vue de la perception (timbre, couleur)¹.

Ces mêmes nouveaux programmes ont introduit dans l'enseignement de spécialité de terminale S des éléments relatifs à la modulation du signal. Dans les compétences exigibles il est clairement indiqué que l'élève devra être capable d'expliquer le principe des modulations d'amplitude et de fréquence et savoir que cela implique une certaine largeur de bande. Une première expérience d'enseignement² de ce domaine semble indiquer la présence de quelques difficultés liées à la dimension peu concrète du phénomène et de son explication. Car, même si quelques expériences peuvent (doivent) être faites sur la modulation, la réception et la démodulation, il n'en reste pas moins que :

- l'utilisation de générateur-wobulateur, si elle facilite le montage, ne facilite pas la compréhension du phénomène,
- les signaux générés sont uniquement perçus par les traces (impondérables et fugitives) qu'ils laissent sur un écran d'oscilloscope,

1. Ce à quoi il faut bien ajouter que les analyses généralement présentées (le spectre 2D, notamment) sont de peu d'intérêt pour l'acousticien et le musicien.

2. En lycée et en préparation C.A.P.E.S.

- les expressions mathématiques ne sont ni intrinsèquement simples (cas de la modulation de fréquence) ni « parlantes » pour les élèves (cas de la multiplication d'une fonction trigonométrique par une autre fonction trigonométrique « décalée » d'une constante, pour la modulation d'amplitude),
- le spectre³ en fréquences et la largeur de bande sont particulièrement abstraits : sans doute rarement montrés, ils le sont seulement pour le cas d'une modulation sinusoïdale...

Or précisément, il existe un domaine où modulation d'amplitude et modulation de fréquence sont utilisées et qui, grâce à quelques logiciels (bien connus par ailleurs), est très facilement accessible : le domaine de la *synthèse sonore*. Cela est particulièrement intéressant, puisque cela permet une continuation avec les éléments d'analyse spectrale introduits en classe de seconde (ainsi renforcés dans leur légitimation) et, surtout, de réaliser la *concrétisation* qui sinon fait défaut en terminale S puisque :

- les signaux générés permettent d'*entendre la modulation* d'amplitude et la modulation de fréquence (en utilisant un amplificateur et un haut-parleur),
- les spectres peuvent être obtenus à partir du captage de tels sons (par un micro) et être *visibles en direct* sur un écran d'ordinateur,
- les formules mathématiques peuvent être appliquées, c'est-à-dire *utilisées comme « instrument »* de création de ces sons,
- l'application de la modulation d'amplitude au transfert d'une information complexe peut être *réalisée, entendue et visualisée !*

Nous proposons ci-dessous quelques exemples ayant été exploités dans le cadre d'une formation au C.A.P.E.S. et qui sont facilement accessibles à un lycée⁴.

1. LA MODULATION VUE ET ENTENDUE

Ainsi que nous l'avons indiqué ci-dessus, la réalisation de signaux modulés en amplitude ou en fréquence est très facile avec un générateur wobulable, mais sans que cela n'apporte quelque évidence de « l'effet de modulation » et n'établisse de lien avec la largeur spectrale. Pour répondre à cet objectif, nous avons utilisé un montage avec deux générateurs basse fréquence auquel nous avons ajouté, d'une part, une sortie amplifiée sur haut-parleur permettant d'*entendre la modulation* et, d'autre part, une

3. **N.D.L.R. :** Les analyseurs de spectre analogiques, assez coûteux sont peu fréquents dans nos laboratoires. Le prix de revient d'une analyse par voie logicielle est très raisonnable si l'on dispose déjà du système informatisé d'acquisition de donnée.

4. Moyennant l'installation sur un ordinateur (type PC) d'une « carte son ».

partie permettant la *réception et l'analyse* du son : un microphone relié à une carte son et une analyse/représentation en temps réel avec un logiciel spécifique (ANALYSE D'ONDES⁵).

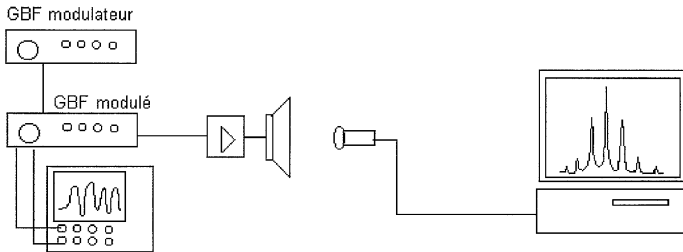


Figure 1 : Montage - deux GBF (dont un Beckmann FG3A), amplificateur et haut-parleur, ordinateur muni d'une carte son SoundBlaster ou émulation, logiciel ANALYSE D'ONDES.

Le choix d'un générateur Beckmann est lié à la possibilité d'appliquer un signal de modulation extérieur et de pouvoir choisir entre modulation d'amplitude et modulation de fréquence par le simple appui sur un bouton. L'oscilloscope est branché de façon à visualiser les signaux porteur et modulant, tandis que l'ordinateur et le logiciel permettent de voir la forme du signal en direct et le spectre 2D du son, c'est-à-dire du signal réellement créé. Le réglage de l'amplitude du signal de modulation, suivi sur l'oscilloscope, permet de jouer sur le taux de modulation et de faire entendre les effets parfois inattendus - toujours intéressants - de la modulation d'amplitude ou de fréquence, et de *voir, toujours en direct, les variations des bandes latérales, en largeur, en amplitude, en complexité* (pour la FM).

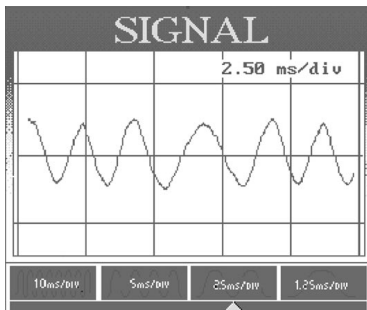
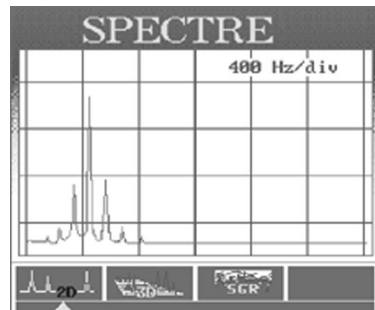


Figure 2 : a) Signal son modulé en fréquence : forme d'onde.



Le caractère dynamique et la simultanéité des différents affichages et de la perception, ne peuvent évidemment pas être représentés par ces copies d'écran, bien qu'ils soient essentiels dans la démonstration.

2. LA MODULATION CALCULÉE

L'une des difficultés réside, ainsi que nous l'avons également indiqué, dans le lien entre la réalisation expérimentale et la formulation mathématique. Les manuels scolaires donnent les expressions mathématiques qu'ils développent plus ou moins suivant le niveau (secondaire ou supérieur) pour aboutir au calcul des spectres. Un premier niveau de concrétisation consisterait évidemment à calculer et représenter ces fonctions de façon à «vérifier» qu'elles conduisent bien aux résultats attendus : effet d'enveloppe en AM, nature, origine et effet de la surmodulation, effet de variation de fréquence et du taux de modulation en FM. Un second niveau de concrétisation serait bien évidemment atteint en obtenant un signal réel. Or, ces deux niveaux sont très facilement accessibles si l'on utilise la synthèse sonore. Un logiciel tel que GOLDWAVES⁶, par exemple, permet grâce à son analyseur syntaxique, d'entrer une fonction quelconque donc celle d'un signal modulé en amplitude ou en fréquence, d'en obtenir le calcul sur une durée quelconque, d'en obtenir la représentation et... d'en écouter le résultat.

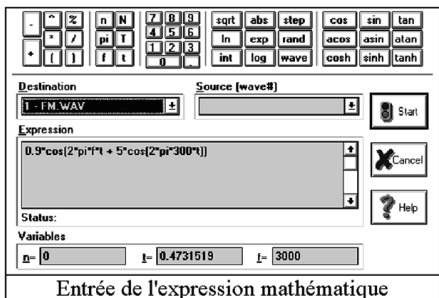


Figure 3 : a) Entrée de l'expression mathématique.

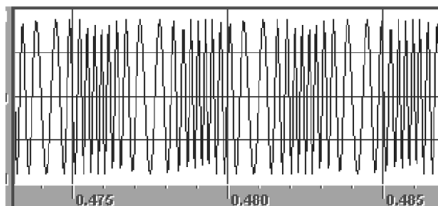


Figure 3 : b) Résultat du calcul.

Ce même logiciel permet également d'obtenir différentes représentations en direct avec la génération du son : forme d'onde, représentation sonographique et spectre 2D notamment. Avec un logiciel voisin tel que COOLEDT⁷, il est possible d'obtenir une

6. Logiciel pour PC ; shareware ; diffusé en version démonstration sur disquette ou CD d'accompagnement de revues.

représentation spectrale 2D à un instant donné (en «cliquant» en un point quelconque de l'onde) ou, mieux, la *représentation sonographique* de l'ensemble du son.

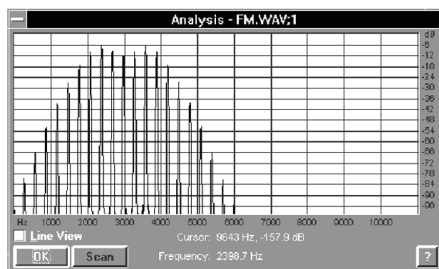


Figure 4 : a) Spectre 2D.

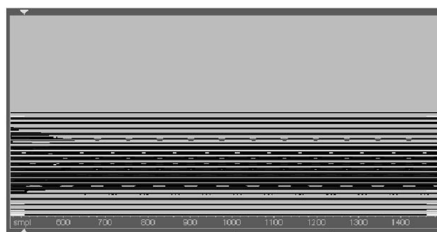


Figure 4 : b) Sonogramme.

La mise en parallèle des deux graphiques permet de faire le lien entre les représentations et, si cela n'a pas été encore fait, d'expliquer le principe du sonogramme, représentation essentielle en analyse sonore.

3. LE TRANSPORT D'INFORMATION PAR MODULATION D'AMPLITUDE

La question du transport d'information par modulation est évidemment essentielle dans l'esprit du programme de spécialité de terminale S. Toutefois, force est de constater que le passage du principe de modulation expliqué sur une formule mathématique au cas du transport d'une information complexe comme celle de la parole n'est pas immédiat, quand bien même le principe de base a été bien compris⁸.

De nouveau les outils de synthèse sonore offrent une opportunité à saisir. Ainsi les outils du logiciel VIRTUALWAVES⁹, conçu pour la création et le traitement de sons numériques, permettent toutes sortes de manipulations. Si certaines paraissent sans doute exotiques pour le physicien, les possibilités de synthèse additive (sur huit harmoniques indépendantes), de modulation (AM et FM), de synthèse croisée (application de l'enveloppe d'un son au contenu spectral d'un autre), de modulation en anneau (multiplication de deux signaux), etc., doivent attirer son attention. De plus, offrant des fonctionnalités d'analyse et de représentations spectrales avancées, ce

7. Shareware, idem GOLDWAVES.

8. Une élève de terminale s'interrogeait ainsi à juste titre : «moduler une fonction cosinus par une autre fonction cosinus... je ne comprends pas... à quoi ça sert ?».

9. Logiciel français commercialisé depuis plus d'un an.

logiciel permet de nombreuses manipulations, et en particulier la possibilité *de moduler un signal sinusoïdal* par un signal quelconque, par exemple un signal issu de la numérisation d'un *message capté par un micro...* La procédure, à l'image de l'ergonomie du logiciel, est très simple. L'enregistrement numérique d'une courte phrase ayant été mémorisé un module en permet le chargement. Un second module dit «oscillateur» permet de générer une fonction sinusoïdale de fréquence et de durée quelconque. Il suffit alors de connecter ces signaux sur les entrées d'un boîtier «modulation d'amplitude» pour obtenir le résultat cherché !

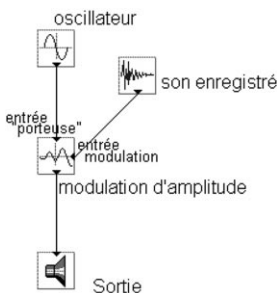


Figure 5 : a) Assemblage des modules oscillateurs, modulation, sortie.

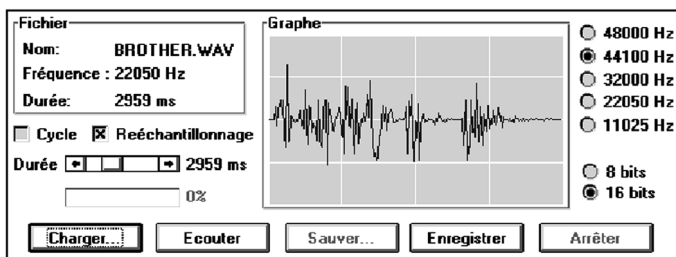


Figure 5 : b) Enregistrement, chargement d'un signal échantillonné (voix).

L'intérêt se situe alors à deux plans. Le premier est celui de la *perception auditive* : le choix d'une «porteuse» à 5000 Hz par exemple, permet de générer un signal modulé entièrement perceptible ; à l'écoute, on entend alors nettement la porteuse (long sifflement constant) et la voix, déformée dans son timbre bien évidemment, mais reproduite dans sa variation temporelle et donc reconnaissable !

Le second se situe dans la *visualisation de l'information*. Celle-ci, inscrite dans le contenu fréquentiel du signal modulant, est visible par une représentation sonographique. VIRTUALWAVES offrant la possibilité d'obtenir un sonagramme de tout signal, il est possible de visualiser d'abord celui de la phrase prononcée, puis celui du signal modulé émis.

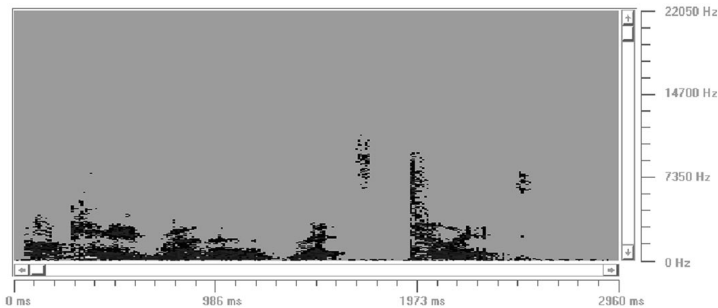


Figure 6 : Sonagramme de la phrase.

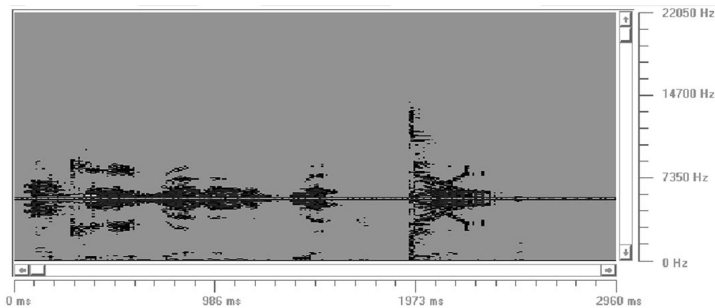


Figure 7 : Sonagramme du signal 5000 Hz modulé par la phrase précédente.

Les copies d'écrans ci-dessus permettent, à elles seules je pense, de conclure¹⁰.

5. CONCLUSION

Notre hypothèse est donc que, au-delà d'un caractère motivant et du lien avec un environnement sonore désormais courant, l'exploitation des possibles dans le domaine de la synthèse sonore constitue une concrétisation à différents niveaux, et que celle-ci peut aider à la compréhension du principe des modulations exigées dans les nouveaux programmes. Notons d'ailleurs que cette concrétisation peut dépasser celle que nous avons illustrée dans ce texte, puisque l'on peut *proposer aux élèves des activités de manipulation* de ces «principes» avec une large plage d'exploration et d'autonomie.

10. **N.D.L.R. :** Cette manipulation est une bonne introduction au multiplexage fréquentiel utilisé en téléphonie (voir B.U.P. n° 771, février 1995, p. 230, Télécommunication).

La seconde partie de notre hypothèse est bien évidemment que ces apprentissages des principes de modulation utilisés dans le domaine sonore peuvent ensuite être exploités pour expliquer *par analogie* le principe de la télécommunication, où les aspects spécifiques sur la nature des ondes, le choix des fréquences, l'intérêt telle et telle modulation, etc., deviennent alors accessibles.

Soyons clairs enfin sur un point important. D'aucuns seraient sans doute tentés de rétorquer que ces manipulations sont «virtuelles» et que cela est incompatible avec un enseignement de sciences expérimentales. Il n'en est évidemment rien de notre point de vue et il suffit, d'une part, de mesurer le caractère «concret» de certaines manipulations de circuits électroniques à l'aune de la compréhension des élèves pour relativiser le qualificatif et, d'autre part, de demander aux musiciens si la manipulation des synthétiseurs, et notamment les modules de synthèse FM¹¹, leur paraît une activité abstraite.

BIBLIOGRAPHIE

- D. BEAUFILS : «*A propos de l'utilisation des sons de "synthé" en classe de physique de seconde*», B.U.P. n° 781, février 1996, pp. 381-382.
- E. LEIPP : «*Acoustique et musique*», Dunod, deuxième édition, chapitre X, «audition des sons : la sensation de hauteur et d'intervalle», 1984.
- J. PIERCE : «*Le son musical : musique, acoustique et informatique*», Belin, Coll. L'univers des sciences, nouvelle édition, 1993, p. 242.
- R. TOURNIER : «*Modulations*», B.U.P. n° 766, juin 1994, pp. 1151-1164.
- F. BROWN : «*La musique par ordinateur*», collection Que-Sais-Je ?, n° 2011, PUF, 1982.
- N. FOURNEL : «*Le son par l'image*», Ordinateur et Musique, n° 19, pp. 10-13.

LOGICIELS CITÉS

GOLDWAVES

Logiciel en shareware, livré en démonstration sur certaines disquettes et accessible par téléchargement à <http://web.cs.mun.ca/~chris3/goldwave/>. La version de démonstration est limitée en nombre d'appel de commandes (cent cinquante par session).

11. Cette technique est essentielle en matière de synthèse sonore ; elle doit faire l'objet d'un prochain article (N.D.A.).

COOLEdit

Logiciel en shareware, livré en démonstration sur certaines disquettes et accessible par téléchargement auprès de Syntrillium Software Corporation (e-mail : Syntrill@aol.com). La version de démonstration de COOLEdit est limitée dans le nombre de commandes accessibles en parallèle par session.

VIRTUAL WAVES

Logiciel français (auteur Nicolas FOURNEL) : la version 2 est commercialisée par Synoptic (Montreuil) ; une version de démonstration est téléchargeable à <http://www.synoptic.net>

ANALYSE D'ONDES

Logiciel permettant l'analyse en direct de son en provenance d'un micro ; utilise la carte SoundBlaster ou carte pouvant émuler le mode correspondant ; commercialisé par Chrysis (Poitiers) ; licence mixte.

NOTES

- Les logiciels que nous avons cités sont ceux qui fonctionnent sur ordinateurs compatibles PC ; de nombreux logiciels très performants sont utilisés depuis très longtemps sur ordinateurs Macintosh.
- D'autres utilisations de ces logiciels sont possibles à différents niveaux du lycée : la synthèse sonore additive et l'analyse spectrale en classe de seconde bien évidemment, mais également l'étude de l'effet Doppler (variation de fréquence).
- Il n'existe pas de version de démonstration de ANALYSE D'ONDES, mais une utilisation peut être vue dans l'Encyclopédie Audiovisuelle des Sciences et Techniques, éditée par le CNDP, collection In Situ (films courts centrés sur un sujet précis ; voir «Ondes sonores» et «La guitare»¹²).

12. Réalisation Alain LARTIGUE, 1996.