

PHYSIQUE, INFORMATIQUE ET MUSIQUE

Gérard SERRA

Professeur de sciences physiques, Lycée Saint-Charles, 13232 MARSEILLE CEDEX 1

Daniel BEAUFILS

INRP-TECNE, 91 rue Gabriel Péri, 92120 MONTROUGE

Paul CAUBISENS

Professeur d'éducation musicale, IUFM, 31078 TOULOUSE

Nous présentons ici les éléments d'une recherche sur le thème "des outils informatiques comme objet d'une interdisciplinarité physique-musique" menée au département Technologies nouvelles de l'INRP. Après une présentation rapide du contexte et des différents aspects de notre travail, nous attirons l'attention sur quelques points délicats à propos du "son musical" tel qu'il apparaît dans le programme des classes de Seconde.

1. Une recherche sur l'interdisciplinarité physique–musique ?

1.1 L'origine

Un travail aurait pu être uniquement mené sur la question de l'enseignement de l'acoustique dans le cadre du cours de physique¹ mais, lors de la sortie des nouveaux programmes de Seconde, une relation explicite était établie entre l'enseignement de physique et celui d'éducation musicale. En effet, on pouvait lire dans les textes parus en 1992 :

Dans les programmes de physique de seconde :

« Élément d'acoustique musicale. Hauteur et timbre d'un son : son fondamental et harmoniques. On attend que l'élève sache : associer la hauteur d'un son à la fréquence de celui-ci ; qu'un son émis par un instrument est périodique, rarement sinusoïdal ; montrer que deux sons différents de même hauteur ont même fréquence fondamentale : soit en utilisant l'oscilloscope, soit l'ordinateur ou mieux les deux ».

Dans les programmes d'éducation musicale de lycée :

« Le travail sur le matériau sonore peut être mené sur du son concret, au moyen de l'échantillonneur ou d'une carte de numérisation, ou sur du son de synthèse. Des travaux scientifiques créatifs seront menés en liaison avec le cours de physique (acoustique). Ces travaux donneront accès à des langages de notre temps que les élèves ressentiront, exploreront, vivront et pratiqueront. Ainsi les œuvres de John Chowning, de Jean-Claude Risset, des compositeurs "spectraux" par exemple, pourront donner lieu à des activités nombreuses et variées. [...] Le travail de perception et d'analyse des bruits et des sons sera conçu, pour une part, en liaison avec l'enseignement de la physique. »

Une telle relation entre ces disciplines, pour ne pas rester qu'au niveau des mots, nécessitait à l'évidence un travail d'investigation, ne serait-ce que pour en évaluer la faisabilité. De plus la possibilité d'une telle interdisciplinarité était renouvelée, non seulement par l'approche

¹ Des travaux de didactique de la physique ont d'ailleurs été menés sur différents points de ce chapitre (notamment la "mécanique du son", [Maurines 93]).

spectrale commune, mais aussi par *la mise en oeuvre d'outils/instruments informatisés communs* : ceux utilisés par le "musicien" (carte son et logiciels audionumériques permettant l'analyse et la synthèse sonore) sont en effet de même nature que ceux intéressant le "physicien" (convertisseur analogique-numérique et logiciel d'analyse spectrale).

1.2 Quelques uns des travaux réalisés

D'emblée, le travail s'est engagé avec une triple entrée : scientifique, informatique et pédagogique. Sans qu'il soit possible de les détailler ici, voici quelques unes des actions complémentaires touchant le domaine pédagogique :

- Étude de logiciels audionumériques pour "musiciens" (analyse et représentation spectrale, synthèse additive) : expérimentation d'utilisations en classe de physique de seconde² ;
- Analyse de manuels scolaires au niveau des chapitres concernant l'acoustique musicale : relevé des difficultés et ambiguïtés dans la définition de termes tels que "son musical", "hauteur", "timbre" ;
- Enquête auprès des enseignants dans les deux disciplines : étude des accords/désaccords sur le vocabulaire, de la complémentarité des apprentissages, du panel des moyens informatisés communs ;
- Test auprès d'élèves de troisième et seconde : étude des compétences en matière de perception/reconnaissance/distinction de la hauteur, de l'intensité, du timbre.

2. À propos du "son musical"

Ces différents travaux nous ont amenés à constater la présence, dans le chapitre d'acoustique musicale des manuels scolaires (et du programme officiel lui-même), de nombreuses formulations et de nombreuses représentations graphiques qui, parce qu'ambiguës ou trop précautionneuses, peuvent laisser s'installer des connaissances que d'aucuns, les musiciens en particulier, qualifieraient d'erronées. Dans cette partie nous voulons détailler quelques uns de ces points et montrer comment l'usage de logiciels d'analyse, synthèse et représentation du son, peut précisément aider à concrétiser certaines notions.

2.1 À propos de la forme de l'onde et de sa richesse spectrale

On peut, ainsi, souligner l'ambiguïté qu'il y a à associer directement la forme de l'onde et la "complexité" spectrale du son. Il est facile de montrer qu'au sens strict, il n'en est rien. Il est en effet possible à l'aide de logiciels audionumériques de créer, par synthèse additive, trois sons comportant les mêmes fréquences harmoniques (avec les mêmes amplitudes) mais des déphasages différents, et voir sur les "fenêtres oscillo" que les formes d'onde sont bien contrastées (figure 1). Pour autant, aucune différence n'est perceptible à l'audition !

En effet, bien que notre oreille soit un merveilleux récepteur capable de percevoir la richesse spectrale, elle ne nous permet pas de distinguer les phases respectives des différentes harmoniques. C'est sans doute l'évolution qui a inhibé cette faculté, en particulier pour rendre possible la communication par le langage : sans cela en effet, après l'émission, le son de la voix verrait des déphasages spécifiques à chaque harmonique introduits par les multiples et inévitables réflexions, et deviendrait alors inintelligible.

² Voir également la présentation du serveur « physique-musique et informatique », lors de ces mêmes journées [Le Touzé & Beaufiles 98].

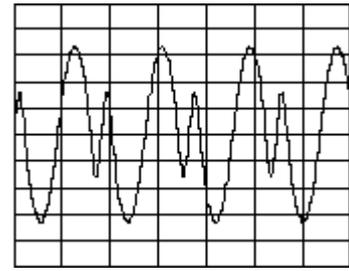
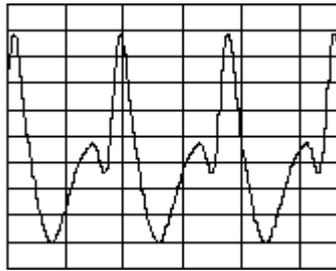
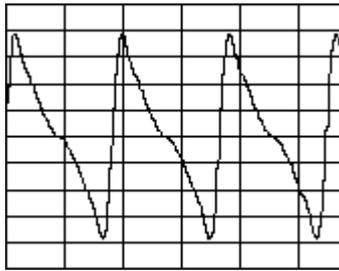


Figure 1. Les trois "formes d'onde" ci-dessus ont été obtenues par l'addition suivante : $0,5\sin(\omega t + \phi) + 0,3\sin(2\omega t) + 0,2\sin(3\omega t) + 0,1\sin(4\omega t) + 0,05\sin(5\omega t) + 0,02\sin(6\omega t)$ seule la valeur du déphasage ϕ change ; les valeurs respectives pour ϕ sont 0 , $\pi/2$, et π .

2.2 À propos du timbre : spectre, évolution et sonagramme

De même, l'identification du timbre à une simple répartition spectrale (fixe) n'est-elle pas en accord avec la définition perceptive des musiciens. Car, bien évidemment, l'évolution dans le temps est essentielle dans la reconnaissance d'un instrument³. Là encore, les logiciels audionumériques facilitent la manipulation : ainsi des sons privés de leur attaque, bien que présentant le même spectre dans leur partie soutenue, ne sont plus reconnaissables⁴ ; de même des notes de piano lues à l'envers évoquent un accordéon poussif ! Historiquement⁵ d'ailleurs, l'échec des premiers synthétiseurs cherchant à imiter des instruments traditionnels était dû à une synthèse additive d'harmoniques figée dans le temps, donc sans vie, et de ce fait, inassimilables à des sons musicaux.

On comprend aisément alors que la simple représentation spectrale bidimensionnelle où figure en abscisse l'axe des fréquences et en ordonnée l'amplitude des composantes ne soit pas suffisante. La représentation la plus adaptée, utilisée par les acousticiens (aussi bien en musique qu'en analyse de bruits de machines), et disponible sur de nombreux logiciels audionumériques, est le sonagramme⁶ : représentation spatio-temporelle d'un son qui porte le temps horizontalement et l'étagement des fréquences verticalement, l'intensité de chaque composante étant représentée par la densité du trait.

Nous avons remarqué que cette représentation est souvent évitée dans l'enseignement parce que perçue comme "difficile". Pourtant, outre le fait que les logiciels actuels disposent de curseurs pour explorer ces représentations et que nos essais auprès d'élèves ne nous ont pas permis d'observer une incompréhension particulière, il nous paraît étonnant que cette image proche finalement de celle des notes sur une partition de musique, ne soit pas plus utilisée. Ainsi, par exemple, sur ces sonagrammes (figures 2 et 3), on peut constater facilement que le nombre d'harmoniques est beaucoup plus important à l'attaque du son et que la note à la guitare a une hauteur bien mieux définie que celle de la cymbale.

³ Ce qui est encore plus évident avec le son de la voix qui repose sur la structure en formants [Sicard & Menin 95]

⁴ Voir par exemple [Favre-Nicolin 94]

⁵ Voir [Rochebois & Beaufils].

⁶ Voir [Caillaud 95].



Figure 2. Coup de cymbale.

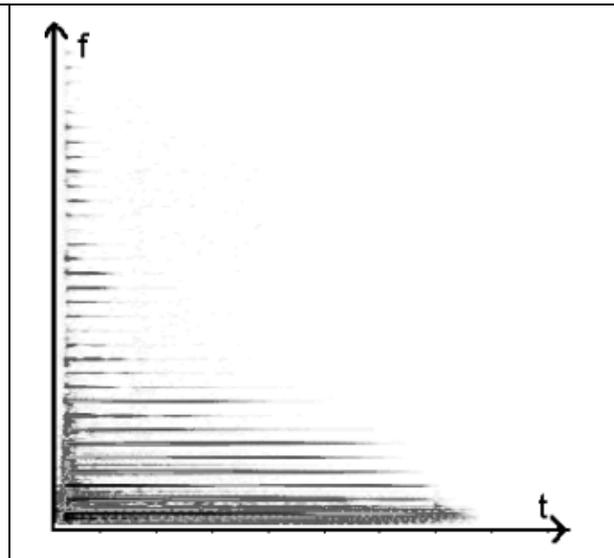


Figure 3. Note jouée à la guitare.

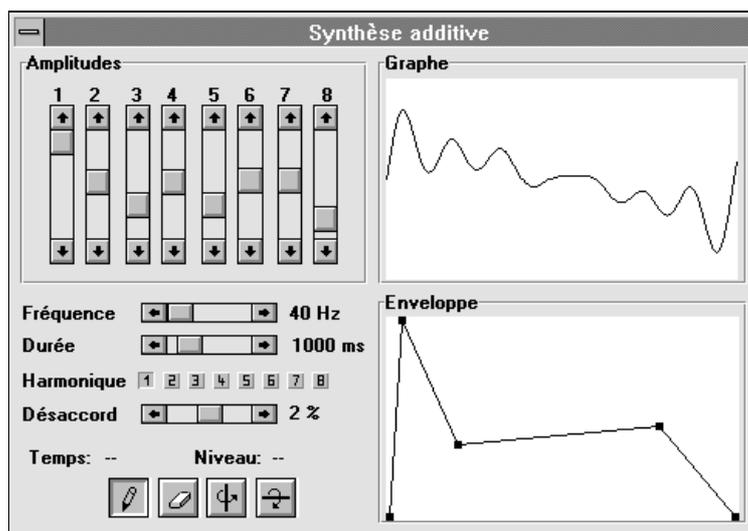
2.3 À propos du "son musical" : intérêt de la synthèse additive

Nous voulons enfin insister sur ce que nous considérons comme le "désaccord majeur" (!) entre ce qui est donné dans les classes de physique et ce qui est raisonnablement considéré comme musical par chacun, et en particulier par... les musiciens. En effet, si l'instruction officielle «un son émis par un instrument est périodique, rarement sinusoïdal» est déjà problématique, le "résumé" «un son musical est un son périodique» est inacceptable... On retrouve évidemment le problème précédent : un son périodique a une durée infinie et, qu'à l'inverse, un son réel "naît", "vit" et "meurt", avec une évolution interne dans le temps de son existence même brève. Et il est sans doute tout aussi évident, qu'un son périodique peut être tout à fait insupportable (cas du son sinusoïdal "GBF" pour un musicien !) et, qu'à l'inverse, le son d'un instrument à corde pincée ou à percussion est tout à fait musical ! Notre proposition n'est pas pour autant de complexifier les définitions, ou de supprimer cette partie du programme, mais bien d'abandonner une approche livresque pour passer à des activités de "manipulation d'objets sonores". Ainsi, l'utilisation de la synthèse additive permet-elle de passer d'un son périodique parfois sinusoïdal et rarement musical, à un son proche d'un son instrumental.

Ci-contre (figure 4) le mixage de quatre oscillateurs dont on peut choisir les fréquences, avec une sortie dont l'amplitude est modulée par une enveloppe ADSR (attaque, décroissance, partie soutenue et partie résolutive) tracée par l'utilisateur (ci-dessus, figure 5). (Logiciel VirtualWaves II).

Au Lycée Saint-Charles, nous avons expérimenté une telle activité avec des élèves de seconde (musiciens ou non). Le logiciel utilisé⁷ permet de créer des sons par différentes méthodes, et en particulier par synthèse additive de signaux sinusoïdaux. Dans l'activité proposée, les élèves devaient créer un son s'approchant de celui d'une corde de guitare (joué devant eux) en utilisant les modules "générateur", "mixage", "enveloppe", etc. Le contrôle auditif leur a permis de prendre conscience des différents paramètres (hauteur et richesse spectrale) mais aussi de l'importance de l'aspect temporel dans le caractère (le timbre) du son. En particulier le caractère "musical" (ou du moins "naturel") n'apparaît qu'après l'utilisation de l'enveloppe temporelle qui module l'amplitude globale.

Le travail de synthèse peut ensuite être affiné au niveau du timbre en utilisant 8 harmoniques et en modulant séparément l'enveloppe de chacune (utilisation du module de synthèse additive ci-contre).



3. Conclusion

Il est clair qu'une relation avec l'éducation musicale serait sans aucun doute profitable à l'organisation d'activités concrètes qui ne peuvent être remplacées par du discours ou de simples définitions. Mais, indépendamment du fait que les programmes de musique de 1992 n'ont jamais été mis en application (!), il faut bien reconnaître l'absence d'éducation musicale dans nos lycées et constater que cette partie du programme de physique est quelquefois traitée superficiellement. L'hypothèse suivant laquelle cette partie du programme devrait motiver nos élèves (qu'ils soient musiciens ou non, ils écoutent tous de la musique) ne semble en effet guère vérifiée et la petite enquête que nous avons réalisée auprès des enseignants laisse également transparaître un certain désintérêt. Certes, on peut arguer du manque de temps et du fait qu'il n'y a pas de suite dans les classes ultérieures. Mais il nous semble qu'il serait prématuré d'alléger officiellement le programme à ce niveau, car la modification est profonde et tous les aspects n'ont pas été abordés de façon significative. On peut en effet noter que la carte son et ses logiciels, vus comme un CAN-CNA et ses analyseurs, entrent très bien dans le cadre de l'option IESP⁸ et que, par ailleurs, le programme obligatoire de Terminale S sur les oscillateurs et celui de Spécialité sur la modulation d'amplitude et la modulation de fréquence, permettraient justement d'exploiter ce qui a été dit en classe de seconde⁹.

Enfin, notre hypothèse selon laquelle les difficultés rencontrées peuvent être résolues par une approche plus concrète repose sur une réalité non hypothétique : la disponibilité d'ordinateurs

⁷ VirtualWaves II , Synoptic, France.

⁸ C'est à ce niveau que nous poursuivons l'expérimentation cette année encore.

⁹ Voir des exemples de telles utilisations dans [Beaufils 97].

"multimédia"¹⁰ et l'utilisation de logiciels audionumériques. Outre ceux utilisés par les "musiciens" que nous avons évoqués, il existe d'autres logiciels, plus destinés au "physicien" et qui offrent des modes de représentation spectrale variés, en particulier des spectres en trois dimensions (amplitude, fréquence et temps) représentés en perspective¹¹ qui rendent compte également des évolutions temporelles.

Voilà donc un thème où la connaissance ne serait plus seulement un savoir livresque à apprendre et où l'enseignement pourrait être véritablement « *séduisant et ancré sur l'environnement quotidien et les technologies modernes* »¹².

4. Bibliographie

- [Arfib 91] Arfib D., Kronlad-Martinet R., Jouer sur le temps, jouer sur la fréquence, *Le Courrier du CNRS*, n°77, 1991, 31-32.
- [Beaufils & Grente 95] Beaufils D., Grente M., À propos d'acoustique musicale : la question des gammes", *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°775, 1995, 1107-1122.
- [Beaufils 97] Beaufils D., Modulation d'amplitude et modulation de fréquence ; les avantages du domaine sonore, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°793, 1997, 741-749.
- [Caillaud 94] Caillaud B., L'analyse sonographique numérique dans l'enseignement de l'acoustique, Actes des 6e *Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, UdP-INRP, 1994, 103-108.
- [Caillaud 95] Caillaud B., *Analyse sonographique et enseignement*, Caen : CRDP Basse-Normandie, 1995, 200p + cédérom.
- [Favre-Nicolin 94] Favre-Nicolin R., Étude expérimentale des sons, de l'analyse à la synthèse, Actes des 6e *Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, UdP-INRP, 1994, 103-108.
- [Gayé 96] Gayé F., Un son pur est-il sinusoïdal ?, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°783, 1996, 645-662.
- [Leipp 84] Leipp E., *Acoustique et musique*, Dunod, 1984, 2ème édition.
- [Le Touzé & Beaufils 98] Le Touzé J.C., Beaufils D., Un serveur physique-musique et informatique, *infra*.
- [Maurines 93] Maurines L., Mécanique spontanée du son. *Trema*. IUFM de Montpellier, 1993, 77-91.
- [MEN 96] MEN, *Physique-Chimie, Classes de seconde, première et terminale S*, Coll. Horaires, objectifs, programmes, instructions, Paris : CNDP, 1996, 136 p.
- [BUP 94] Bulletin de l'Union des Physiciens "spécial son" n°761, 1994.
- [Sicard & Menin 95] Sicard E., Menin A., Analyse spectrale des sons musicaux et de la parole, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°778, 1995, 1781-1785.
- [Pierce 93] Pierce J., *Le son musical : musique, acoustique et informatique*, Belin, Coll. L'univers des sciences, nouvelle édition, 1993, 242p + cédérom.
- [Rochebois & Beaufils] Rochebois T., Beaufils D., L'histoire des synthétiseurs de musique : plus d'un siècle d'évolutions technologiques, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, à paraître.

¹⁰ Sinon, l'achat d'une carte son pour environ 600F permet généralement de disposer de logiciels performants et d'une reproduction donnant entière satisfaction.

¹¹ C'est le cas de Audio, diffusé par la société Langage et Informatique, et d'Analyse d'Ondes de chez Chrysis.

¹² Point n°4 des principes directeurs de l'enseignement de la physique au collège et au lycée (programmes de 1992) [MEN 96].