

Analyse et synthèse spectrale pour l'étude des sons naturels et musicaux

par Daniel BEAUFILS
Institut National de Recherche Pédagogique,
91, rue Gabriel Péri, 92120 Montrouge
et Bernard CAILLAUD
Lycée Malherbe, 14000 Caen

RÉSUMÉ

L'utilisation de la transformée de FOURIER pour l'analyse spectrale des sons a été souvent présentée mais sans que son application à l'étude des sons musicaux ait été traitée. Parce qu'un son musical est à la fois riche en fréquences et évolutif dans le temps il faut en effet recourir à une méthode et une représentation spécifiques. Bien que mal connu (ou mal perçu), le sonagramme est la seule représentation temps-fréquence qui répond aux exigences du musicien, du phonologue et du scientifique. Mais le calcul résulte d'un incontournable compromis entre précision dans le temps et résolution en fréquence. Les explications données dans cet article à propos du choix de la taille de la fenêtre d'analyse sont illustrées par des exemples obtenus avec des logiciels pour «musiciens». En complément - l'analyse ne prenant parfois tout son sens que dans la synthèse rendue possible - il nous est apparu utile de faire le lien avec la synthèse sonore additive.

1. L'ANALYSE SONORE : OÙ PHYSICIENS ET MUSICIENS ONT PARFOIS DU MAL À S'ENTENDRE...

1.1. La durée

La rencontre des «physiciens» et des «musiciens»¹ sur le domaine de l'acoustique musicale est parfois difficile². L'un des aspects du son qui apparaît d'emblée comme

1 Les guillemets utilisés ici indiquent qu'il s'agit d'un raccourci pratique, qui désigne ici essentiellement, étant donné notre propos, les enseignants de sciences physiques et d'éducation musicale.

2 Cette constatation est issue, en particulier, d'un travail de recherche mené à l'INRP sur le thème «des outils informatiques comme objets d'une interdisciplinarité physique/musique dans l'enseignement de lycée».

problématique est la durée. Pour le «physicien», celle-ci n'est pas un paramètre du son³ : d'une part il fait souvent l'hypothèse de sons périodiques (donc de «durée infinie») et d'autre part, tout enregistrement et toute analyse peuvent être effectués sur une durée quelconque (du moment qu'elle comporte au moins une période). Il en va tout autrement pour le musicien : un son qui durerait indéfiniment égal à lui-même serait un bruit, un parasite. *Bien au contraire, pour lui la «qualité» d'un son dépend de sa durée (finie) et de son évolution au cours de celle-ci* : la décomposition de l'enveloppe en attaque, décroissance, maintien et extinction⁴ est la base même de tout son, non seulement musical, mais plus généralement «naturel». Cela est une évidence pour une percussion, cela l'est aussi pour tout instrument et pour tout son ; l'expérience classique du «son à l'envers» est convaincante : on ne reconnaît plus aucune note jouée, au piano par exemple⁵.

1.2. La richesse spectrale

L'autre sujet de discussion entre «physicien» et «musicien» porte sur la richesse spectrale. Les réponses à la question «qu'est-ce qu'un son pur ?» divergent notablement. Pour le musicien, rien n'est pire qu'un signal sinusoïdal : non seulement aucune musicalité n'y est attachée, mais l'impression même d'octave disparaît !⁶. À l'inverse, ce que le physicien recherche, c'est la composante la plus simple, l'élément simple dans le complexe ; pour lui, c'est la fonction sinus et donc la composante sinusoïdale. *«L'atome sonore» n'est donc pas le même pour le musicien et le physicien.*

Si la richesse spectrale est liée à la complexité du signal, les deux graphiques ci-dessous montrent à l'évidence *que cette information n'est pas dans la forme «d'onde»* : on voit d'abord que c'est l'enveloppe globale qui peut être indicatrice et non le signal lui-même. De plus, et ceci est essentiel, on sait bien que les phases des différentes composantes n'interviennent pas dans la perception sonore, alors que la forme d'onde peut prendre une forme extrêmement différente par le simple changement d'une phase⁷ !

Enfin, et en cohérence avec la remarque précédente, la couleur d'un son⁸ n'est pas non plus seulement l'enveloppe et le spectre fréquentiel global, mais la variation de ce

³ Durée que l'on distingue de la variable «temps» qui est essentielle au point de vue de la propagation.

⁴ Enveloppe dite ADSR (attack, decay, sustain, release).

⁵ Voir la communication de R. FAVRE-NICOLIN au 5e Journées Informatique et Pédagogie des sciences physiques.

⁶ Car la perception de consonance repose, suivant HELMHOLTZ, sur le recouvrement partiel des harmoniques ; Voir PIERCE, 1993 (chapitre V) et LEIPP, 1984 (chapitre X), par exemple.

⁷ Voir SERRA, 1998.

⁸ Le terme de «couleur» semble plus adapté au son lui-même, tandis que le terme de timbre qui lui correspond s'applique plus aux instruments.

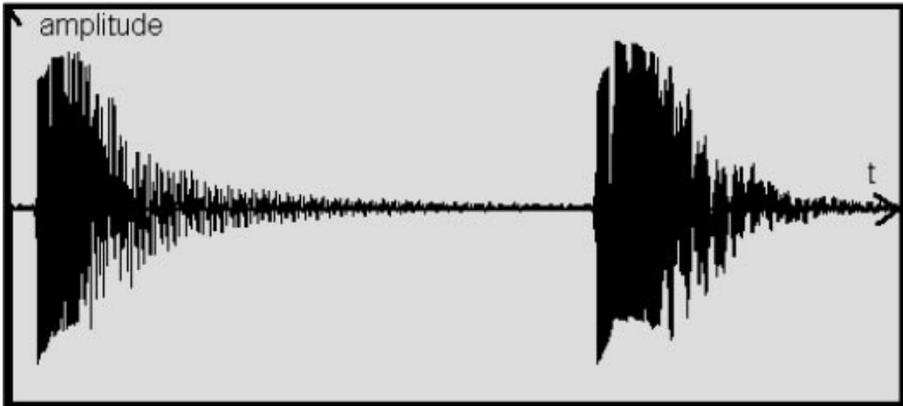


Figure 1 : Percussions : forme d'onde.

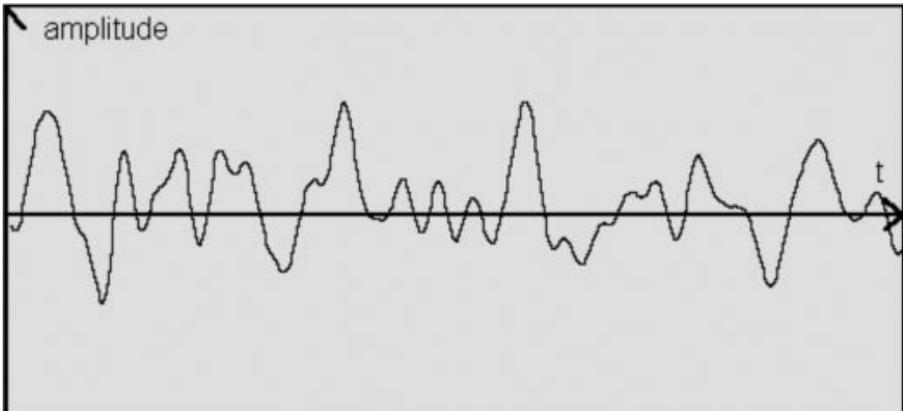


Figure 2 : Zoom sur une partie du signal.

dernier dans la durée : l'extinction rapide de certaines fréquences et la modulation de telle ou telle composante sont faciles à repérer dans un son issu, par exemple, d'une percussion sur un corps résonant.

1.3. Les outils d'analyse spectrale : le choix du sonagramme

L'analyse d'un son repose donc nécessairement sur l'étude de son spectre. Mais les divergences de point de vue entre «physicien» et «musicien» entraînent des choix d'outils différents. Le premier recherchera l'outil de représentation bidimensionnelle des harmoniques (décomposition d'un signal périodique) tandis que le second recherchera une représentation permettant de suivre l'évolution temporelle des *harmoniques* ou *partiels*⁹, et si possible des *notes* elles-mêmes. D'un côté la série de Fourier, de l'autre la transformée en ondelettes¹⁰... Entre les deux, fort heureusement existent des outils d'analyse et de représentation utiles aux deux... : la représentation 3D et surtout le *sonagramme*¹¹.

Ces deux outils permettent en effet d'étudier l'évolution spectrale dans le temps. Ils reposent d'une part sur le calcul d'une *transformée de Fourier* (et non plus seulement celui d'une *série* reposant sur une fréquence fondamentale) et sur le *glissement de la fenêtre de calcul sur la durée du signal*. La représentation 3D (parfois nommée type «vocodeur» en référence aux travaux sur l'analyse et la synthèse de la voix) propose une représentation tridimensionnelle amplitude-fréquence-temps en perspective, tandis que le sonagramme donne les mêmes informations sous la forme d'une représentation plane, les variations d'amplitude de chaque partiel étant représentées par différentes couleurs ou niveaux de gris.

C'est essentiellement le sonagramme qui est utilisé, d'autant plus lorsqu'il est représenté sur un écran d'ordinateur. Les analyses qualitatives et quantitatives sont en effet facilitées par la représentation : d'un seul coup d'œil on perçoit l'ensemble des variations et un pointeur sur le graphique renvoie les trois informations : date, fréquence, amplitude. Les exemples d'utilisation sont nombreux : l'étude de la voix parlée (pour la synthèse des phonèmes) et chantée (étude du chant diphonique par exemple),

9 Les fréquences des sons réels ne sont pas nécessairement harmoniques (cas des sons de cloche, mais aussi de piano) ; de façon générale, on désigne par «partiel» (ou «partielles») les fréquences qui accompagnent le fondamental. Certains auteurs réservent le terme de partiels aux cas de non harmonicité ; d'autres considèrent les harmoniques comme des partiels particuliers (dont les fréquences sont multiples du fondamental). C'est cette dernière acception que nous utiliserons dans la suite.

10 Pour les ondelettes, voir HUBBARD, 1995 ; Arfib, 1995 ; par ailleurs les travaux sur l'analyse et la synthèse des sons sont toujours d'actualité : voir par exemple ROCHEBOIS, 1997.

11 Voir par exemple CAILLAUD, 1994 et CAILLAUD, 1995.

l'étude de chants d'oiseaux, celle des bruits (suivi de fonctionnement d'une machine ou détection de perturbation), et toute étude de sons instrumentaux (étude pour l'interfaçage ou la modélisation des instruments de musique)¹².

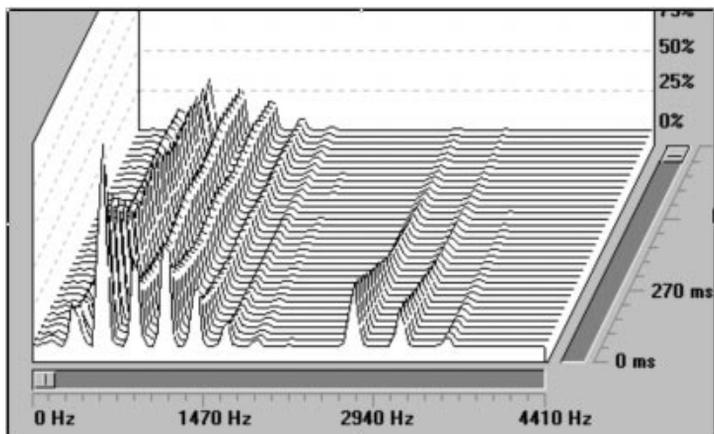


Figure 3 : «Vocodeur de phase» (VirtualWavesII) : résonance d'une plaque métallique frappée.

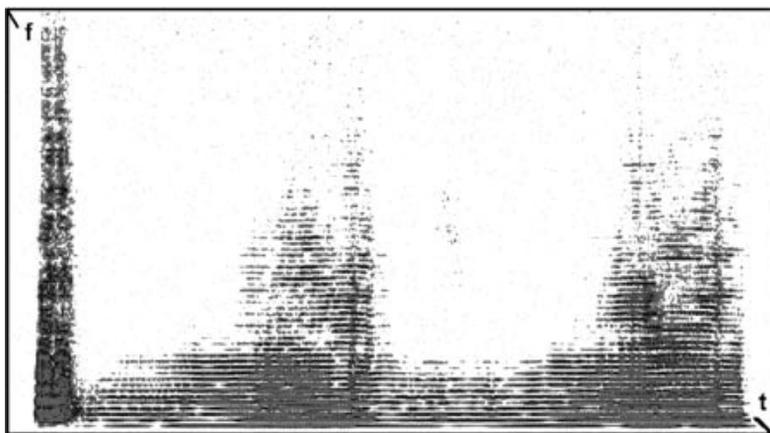


Figure 4 : Sonogramme (logiciel Soundscope) : Trompe tibétaine

¹² Nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage de B. CAILLAUD (CAILLAUD, 1995) pour l'étude de quelques «situations sonographiques» ; l'ouvrage est vendu avec un cédérom qui permet d'accéder aux représentations graphiques en couleurs et aux sons eux-mêmes !

2. QUELQUES PRÉCISIONS SUR L'ANALYSE SONAGRAPHIQUE

L'utilisation de la transformée de FOURIER pour l'analyse spectrale a fait l'objet de nombreux articles¹³ dans lesquels les calculs (définitions générales, théorème de SHANNON, types de fenêtres, algorithmes, etc.) sont présentés en détail ; nous voulons ici insister sur deux éléments importants : la limite de résolution en fréquence et l'évolution spectrale dans le temps. Parce qu'il répond aux exigences d'une analyse temps-fréquence, le calcul du sonagramme rencontre en effet d'emblée ces deux problèmes. *Il en résulte un incontournable compromis entre précision dans le temps et résolution en fréquence.*

2.1. Quelques remarques préalables sur la transformée de FOURIER discrète

La discrétisation

Le principe de la transformée de FOURIER discrète¹⁴ (TFD) repose sur un *double échantillonnage* : celui du signal (dans le temps) et celui de la transformée elle-même calculée sur une série de valeurs de la fréquence. L'échantillonnage en fréquence n'est pas arbitraire mais choisi en fonction du pas d'échantillonnage temporel pour assurer, en particulier, l'inversion de la transformation. L'intervalle de fréquences qui en résulte est évidemment central dans l'analyse spectrale.

Plus précisément, si $s(t)$ représente un signal évoluant dans le temps, le signal échantillonné avec une période T_e , sera une suite de valeurs $s(n T_e)$. Si N est le nombre de points considérés pour le calcul, la transformée de FOURIER portant sur les N valeurs $s(n T_e)$ (n de 0 à $N-1$) s'écrira :

$$\tilde{A}(f) = \sum_n s(n T_e) \cdot \exp(-2\pi j \cdot n \cdot f \cdot T_e) \quad (1)$$

Cette expression est bien une fonction continue de la fréquence f . La transformée de Fourier discrète résulte de la *discrétisation de cette fonction de la fréquence* avec un pas :

$$f_0 = 1 / N T_e \quad (2)$$

Par TFD, on calcule donc, les N valeurs complexes :

$$\tilde{A}(k f_0) = \sum_n s(n T_e) \cdot \exp(-2\pi j \cdot n \cdot k / N) \quad (3)$$

¹³ Nous renvoyons aux nombreux articles et ouvrages (dont l'ouvrage de B. CAILLAUD cité ci-dessus, pages 103 à 114) mentionnés en bibliographie.

¹⁴ Dite rapide (ou F.F.T., Fast Fourier Transform) lorsqu'on utilise un algorithme limitant le nombre de calculs, mais qui impose que le nombre d'échantillons soit une puissance de 2 ($N = 2^n$).

Cette expression est généralement écrite sous la forme :

$$\tilde{A}(k_0) = \sum_n s(n) \cdot \exp(-2\pi j \cdot n \cdot k / N) \quad (4)$$

ou encore :

$$\tilde{A}_k = \sum_n s_n \cdot \exp(-2\pi j \cdot n \cdot k / N) \quad (5)$$

On voit que la forme (4) correspond dans la pratique à l'utilisation d'un tableau $s(N)$ pour les valeurs du signal échantillonné, et d'un tableau $A(2, N)$ pour les valeurs échantillonnées de la transformée de FOURIER. Chaque composante fréquentielle a en effet deux valeurs (partie réelle et partie imaginaire dans l'expression ci-dessus) ou, de façon équivalente, l'amplitude (module du nombre complexe) et la phase (argument). Notons enfin que, compte tenu de (3), la transformée de FOURIER inverse est :

$$s(nT_e) = (1/N) \sum_k \tilde{A}(kf_0) \cdot \exp(-2\pi j \cdot n \cdot k / N) \quad (5)$$

Ce qui peut s'écrire également, compte tenu de (4) :

$$s(n) = (1/N) \sum_k \tilde{A}(k) \cdot \exp(-2\pi j \cdot n \cdot k / N) \quad (6)$$

Le fenêtrage

Le nombre N utilisé dans les expressions ci-dessus est *a priori* quelconque. Cependant, dans la pratique il faut travailler avec un nombre fini. On aura compris que ce nombre de points est alors le nombre d'échantillons de fréquence pour lesquels on calcule l'amplitude et la phase. Pour les signaux sonores, l'inconvénient ne vient pas de cette limitation mais du fait que l'on calcule alors la transformée de FOURIER non plus du signal périodique qui nous intéresse, mais de celui d'un signal de durée finie. Il faut alors utiliser une astuce de calcul pour minimiser les effets «indésirables» que cette troncature entraîne (apparition de lobes secondaires). En d'autres termes, ni la transformée de Fourier, ni son algorithme discret ne sont en cause ; *c'est l'utilisation que l'on en fait qui pose problème : c'est parce que l'on n'analyse pas le bon signal qu'il faut faire des corrections permettant de retrouver ce que l'on cherche !*

Généralement, la correction adoptée est celle dite de la fenêtre de HAMMING visant à atténuer le signal sur les bords : le signal est multiplié par la fonction $f(t) = 0.54 + 0.46 \cdot \cos(2\pi t/T)^{15}$. L'utilisation d'autres fenêtres conduit évidemment à des spectres légèrement différents.

¹⁵ Voir, pour les différentes fenêtres, l'ouvrage de P.-M. BEAUFILS et M. RAMI, par exemple.

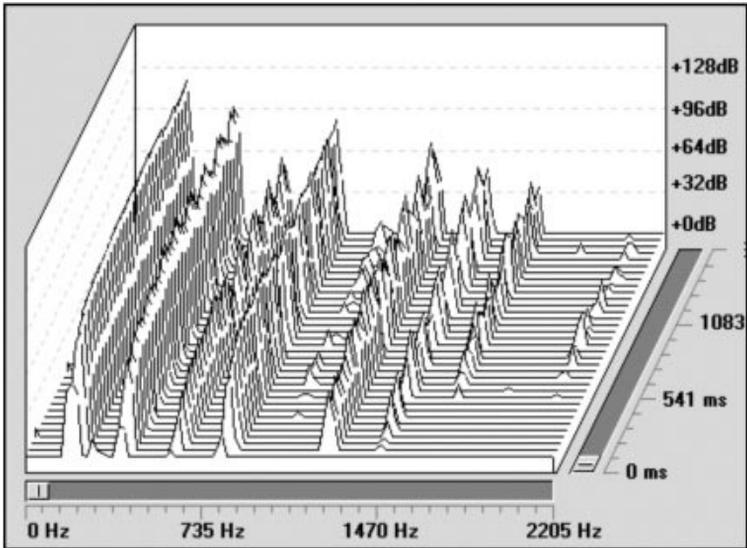


Figure 5 : Son de violoncelle : spectre calculé avec une fenêtre de HAMMING (1024 points).

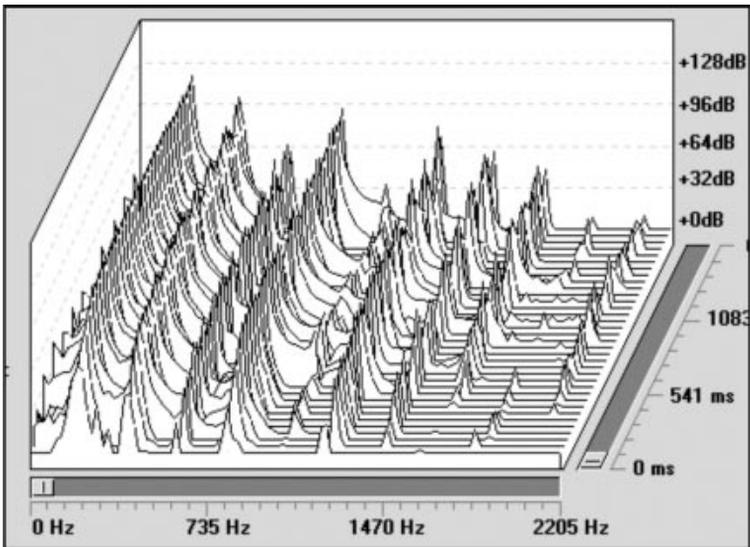


Figure 6 : Même son : spectre calculé avec une fenêtre rectangulaire (1024 points).

2.2. Le compromis temps-fréquence : le pavé sonographique

La limite de SHANNON ou critère de NYQUIST (la fréquence maximale affichable est la moitié de la fréquence d'échantillonnage) est bien connue. Mais, dans la pratique de l'analyse sonore, cette limite n'est ni la seule ni la plus importante. Les instruments ont des tessitures limitées, et les fortes énergies sont généralement à des fréquences inférieures à 5000 Hz (le do7 du piano a sa fondamentale à 4186 Hz)¹⁶. *Pour l'analyse sonographique, bien souvent, c'est la limite de résolution et la fréquence la plus basse qui sont importantes !*

Nous avons vu en effet ci-dessus que la méthode fixe une valeur minimale à la fréquence calculée (qui est celle du pas de la discrétisation) : $f_o = 1/NT_e$. Cette dernière relation est essentielle dans l'analyse sonographique : la grille d'analyse d'une image sonographique est donc fixée par la donnée de T_e et N . Ceci est important puisque cela fixe la finesse de l'analyse et la valeur de la fréquence la plus basse repérable.

Pour l'analyse d'un son évoluant dans le temps, on comprend alors bien le compromis nécessaire : la fenêtre que l'on va faire «glisser» le long du son doit être suffisamment étroite pour analyser finement l'évolution temporelle mais suffisamment large pour avoir une bonne résolution temporelle. Ce compromis temps-fréquence n'a rien de nouveau, il a simplement une valeur très concrète dans l'analyse sonographique : diminuer la largeur du pavé c'est augmenter d'autant son épaisseur. Le bon choix est fonction de la nature du son étudié¹⁷.

Donnons un exemple : si un sonogramme a une fréquence maximale de 11025 Hz cela sous-entend que la fréquence d'échantillonnage est $F_e = 22050$ Hz, soit une période $T_e = 1/22050$ s ; par ailleurs, si l'on souhaite avoir une fréquence minimale (c'est-à-dire une résolution) de 20 Hz, alors il faut choisir la taille de la fenêtre temporelle en conséquence ; par exemple $N = 1024$ points ($f_o = 22050/1024 \approx 21.5$ Hz). En conséquence, le son d'origine est décomposé en tranches de durée $1024 \times T_e \approx 46$ ms. Un son de 1 seconde est donc ramené à environ 20 tranches.

¹⁶ L'échantillonnage à 44,1 kHz est en fait requis pour la restitution des attaques qui exige la présence de tous les partiels.

¹⁷ Un autre moyen est d'effectuer des analyses sur des fenêtres qui se recouvrent partiellement (voir en annexe) : cela évite les effets de pavé graphique, mais ne change rien au problème.

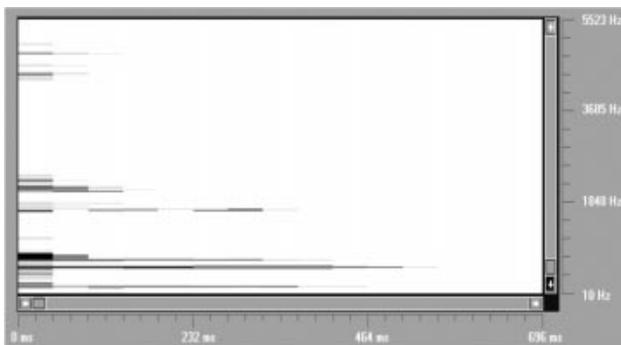


Figure 7 : Percussion : fenêtre de 2048 points.

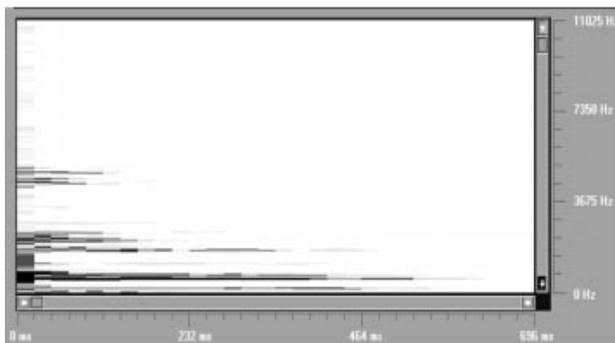


Figure 8 : Même son : fenêtre de 1024 points.

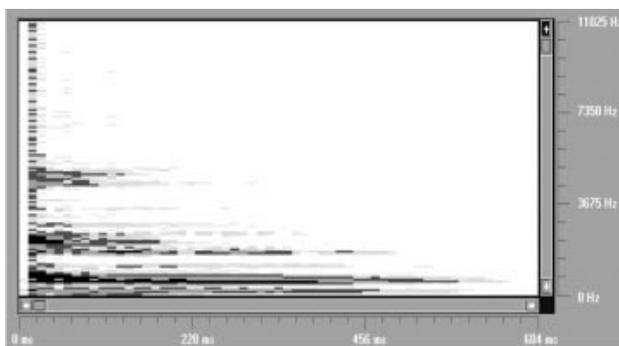


Figure 9 : Même son : fenêtre de 256 points.

3. EN CONCLUSION : LA SYNTHÈSE POUR BIEN FAIRE COMPRENDRE L'ANALYSE (OÙ PHYSICIENS ET MUSICIENS PEUVENT SE RETROUVER...)

Pourquoi cette représentation sonographique particulièrement adaptée à l'étude spectrale des sons n'est-elle pas utilisée, même explicitement évitée dans l'enseignement ? L'argument est généralement qu'elle constitue une difficulté pour l'élève. Outre le fait que cette représentation est voisine de celle employée en musique pour représenter les notes sur une échelle de hauteur, nos essais auprès d'élèves de seconde ne nous ont pas conduits à noter de difficultés particulières liées à cette représentation. Il semblerait même que la présence de la dimension temporelle facilite la lecture.

De plus, il nous semble que la question de la «difficulté» ne doit pas se poser *ex abrupto*, mais en liaison avec le mode d'introduction des notions d'acoustique musicale. Il nous paraît en particulier qu'en classe de seconde une difficulté réside dans *l'introduction de l'analyse spectrale* et ce, non pas du point de vue technique, mais du point de vue de *l'idée même de décomposition spectrale*. Notre proposition, dans laquelle le sonagramme trouve sa place, est d'amener la méthode d'analyse par la démonstration des possibilités de *synthèse*.

3.1. La synthèse comme argument en faveur de l'analyse

L'idée est de ne pas introduire l'analyse spectrale en premier pour ensuite montrer la synthèse additive, mais précisément de procéder à l'inverse. Avoir montré que, par synthèse additive, on peut obtenir des sons «naturels» (à l'oreille), peut en effet justifier que l'on recherche ensuite de telles composantes dans les sons «naturels». Outre le fait qu'elle est *a priori* possible, cette démarche semble plus pertinente sur le plan didactique : l'idée d'une analyse par décomposition de «raies» n'est ainsi pas parachutée et on montre que les connaissances de physique et de mathématiques sont opérationnelles. Par ailleurs, ceci est conforme au programme de la classe de seconde qui indique en commentaire de la partie «acoustique musicale» : «un logiciel de synthèse de sons peut également être utilisé avec profit».¹⁸

Enfin, compte tenu de ce que nous avons évoqué précédemment, elle est évidemment *plus sûre sur le plan scientifique* puisqu'on évite les traquenards liés aux calculs numériques de la transformée de Fourier rapide et à l'application d'une méthode sur des signaux qui ne sont précisément pas périodiques.

¹⁸ Voir [MEN-CNDP 1996], page 29.

3.2. La synthèse additive sonore en classe de Seconde

Montrer que l'on peut, en ajoutant des composantes sinusoïdales et en modulant l'enveloppe, reconstituer un son naturel (au sens introduit au début de l'article) est facilement réalisable avec des logiciels audionumériques de synthèse sonore «pour musiciens» largement diffusés¹⁹. Nous proposons ici à titre d'exemple, l'utilisation du logiciel VirtualWaves II qui comporte des modules «oscillateur», «mixage», «synthèse additive», «sonagramme» (et sortie sur haut-parleur) dans le schéma d'une progression expérimentée dans une classe de seconde²⁰.

Première séance : initiation à l'addition d'oscillateurs

Deux objectifs sont en fait visés lors de la première séance :

- Montrer qu'il est possible d'additionner des composantes «pures» pour obtenir des sons «complexes», et introduire les notions de «fonctions sinus», fréquence/hauteur, addition, timbre, durée et enveloppe ;
- présenter, à travers cette activité, les fonctionnalités de base du logiciel : utilisation de quelques modules (lecteur d'échantillons, oscillateur, module de mixage).

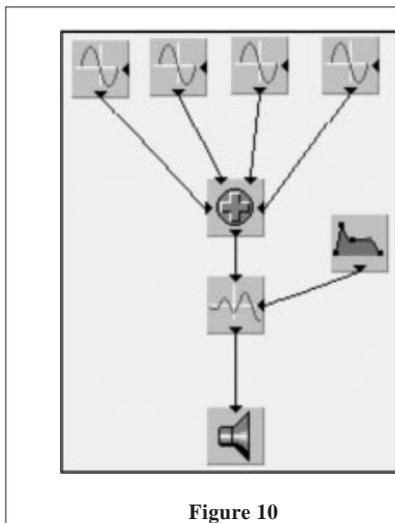


Figure 10

Ci-contre l'ensemble de 4 oscillateurs, des modules de mixage et de modulation d'enveloppe.
Ci-dessous, la forme d'onde obtenue par addition.

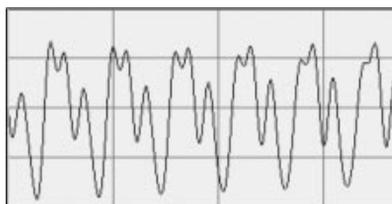


Figure 11

¹⁹ Voir aussi [BEAUFILS, 1997 a et b], [SERRA et al., 1998].

²⁰ Dans le cadre de la recherche INRP-TECNE «outils informatique et interdisciplinarité physique/musique» ; expérimentation menée en physique au lycée Saint-Charles de Marseille ; voir [G. SERRA et al., 1998].

Seconde séance : la synthèse contrôlée par la perception

Il s'agit alors de réaliser la synthèse du son d'un instrument en exploitant les différents paramètres : fréquence, nombre d'harmonique et *évolution dans le temps*. Pour faciliter l'activité, on peut alors utiliser le module de synthèse additive qui permet de mixer facilement jusqu'à 8 oscillateurs, et de choisir l'enveloppe de chacun d'eux.

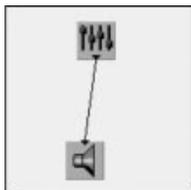


Figure 12

Ci-dessus le module de synthèse additive relié à la sortie audio.

Ci-contre, le détail du paramétrage du module : amplitude relative et enveloppe de chaque harmonique.

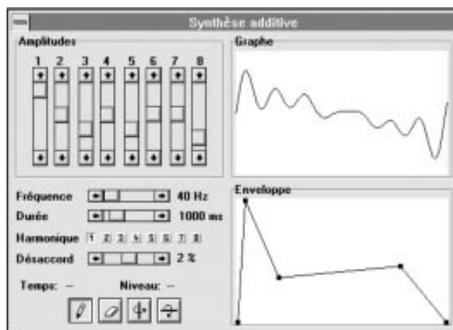


Figure 13

Le son de référence - corde pincée à la guitare, par exemple - est réalisé concrètement devant les élèves et l'activité de synthèse sonore repose alors sur une capacité de perception, en particulier de différenciation entre intensité, enveloppe, hauteur et timbre. Clairement, l'objectif n'est pas de réaliser exactement le même son que celui produit par la guitare, mais bien de créer un son voisin, de même *caractère*.

Troisième séance : l'analyse spectrale étendue aux sons réels

L'idée est ensuite d'introduire un moyen de « vérifier » que l'on a bien ces composantes dans le signal réalisé. On présente alors de façon uniquement fonctionnelle l'outil d'analyse et de représentation « sonagramme » que l'on applique à l'étude du son précédemment réalisé : on retrouve alors bien les composantes qui ont été ajoutées. L'outil étant ainsi validé, il est alors logique de chercher à l'utiliser pour analyser d'autres sons en des composantes « pures ».

3.3. En ouverture : physique, musique et... arts plastiques

Enfin, outre les aspects scientifiques présentés ci-dessus, le sonagramme peut être source de motivation esthétique. La simple représentation d'un chant d'oiseau tel que le merle bleu peut déjà agir, mais il est possible d'en faire le vecteur d'une création artistique... (Voir annexe 3).

BIBLIOGRAPHIE

D. ARFIB, R. KRONLAD-MARTINET : «*Jouer sur le temps, jouer sur la fréquence*» - Le Courrier du CNRS n° 77 - 1991 - p. 31-32.

D. BEAUFILS, M. GREUTE : «*À propos d'acoustique musicale : la question des gammes*» BUP n° 775 - 1995 - p. 1107-1122.

P.-M. BEAUFILS, M. RAMI : «*Filtrage numérique*» - SYBEX.

M. BELLANGER : «*Traitement numérique du signal, théorie et pratique*» - 1990 - Masson.

F. BROWN : «*La musique par ordinateur*» - 1982 - collection Que-Sais-Je ? n° 2011, PUF.

P. BRUNET : «*Utilisation d'un analyseur de spectre associé à un système d'acquisition de données*» - BUP n° 768 - 1994 - p. 1527-1549.

B. CAILLAUD : «*L'analyse sonographique numérique dans l'enseignement de l'acoustique*» - in actes 6^e Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques - Udp-INRP - 1995 - p. 103-108.

B. CAILLAUD : «*Analyse sonographique et enseignement*» - Caen : CRDP Basse-Normandie - 1995 - p. 200.

B. CAILLAUD : «*Images numériques des sons*» -Le Micro Bulletin du CNRS - n° 60 - 1995 - p. 120-129.

C. CANCE : «*Analyse spectrale par transformée de FOURIER*» - in actes de l'Université d'été - Udp-INRP - «*Outils informatiques d'investigation scientifique pour l'enseignement des sciences physiques*» - Paris - Udp - 1995 - p. 117-127.

J. CHOWNING, D. BRISTOW : «*F.M. : théorie et applications*» (par les musiciens et pour les musiciens) - Ed Yamaha.

J.-F. COBLENTZ : «*Introduction à l'analyse de FOURIER*» - 1988 - Eyrolles.

R. DAUTRAY, J.-L. LIONS : «*Analyse mathématique et calcul numérique*» - Volume 3 - Masson - 1987 - p. 313.

J. ESQUIEU : «*Traitement numérique du signal*» - BUP n° 754 - 1993 - p. 707-729.

J. ESQUIEU : «*Analyse spectrale numérique*» - BUP n° 754 - 1993 - p. 775-797.

J. ESQUIEU : «*Analyse spectrale numérique et transformée de FOURIER rapide*» - brochure d'exposé thématique - 7^e Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques - UdP-INRP- 1996 - p. 18.

R. FAVRE-NICOLIN : «*Étude expérimentale des sons, de l'analyse à la synthèse*» - in actes des 6^e Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, - UdP-INRP - p. 103-108.

P. FLANDRIN, Y. MEYER : «*Signaux non stationnaires, temps-fréquence et ondelettes*» - Le courrier du CNRS n° 77 - 1991 - p. 29-30.

N. FOURNEL : «*Le son par l'image*» - Ordinateur et Musique n° 19 - 1996 - p. 10-13.

B. HUBBARD : «*Ondes et ondelettes*» - Paris : Belin - Collection Pour la Science - 1995 - p. 236.

M. KUNT : «*Traitement numérique des signaux*» - Dunod - 3^e édition - 1990 - p. 402.

E. LEIPP : «*Acoustique et musique*» - Dunod - 2^e édition - chapitre X - «*audition des sons : la sensation de hauteur et d'intervalle*» - 1984.

J.-L. LIFERMANN : «*Les méthodes rapides de transformation du signal : FOURIER, WALSH, HADAMARD, HAAR*» - Masson - 1979 - p. 200.

J.-L. LIFERMANN : «*Théorie et applications de la transformée de FOURIER rapide*» - Masson - 1977 - p. 150.

J. MAX : «*Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*» - 1987- Masson.

MEN : «*Physique-Chimie, Classes de seconde, première et terminale S*» - Collection Horaires, objectifs, programmes, instructions, Paris CNDP - 1996 - p. 136.

E. ORAN-BRIGHAM : «*The Fast Fourier Transform*» - New-Jersey - Prentice-Hall - 1974 p. 252.

J. PIERCE : «*Le son musical : musique, acoustique et informatique*» - Belin - Collection L'univers des sciences - nouvelle édition - 1993 - p. 242.

J.-C. RISSET : «*La musique et les sons ont-ils une forme ?*» - La Recherche n° 305 - janvier - 1998 - p. 98-102.

T. ROCHEBOIS : «*Méthodes d'analyse/synthèse et représentations optimales des sons musicaux basées sur la réduction de données spectrales*» - Thèse d'électronique - Université Paris XI - 1997 - p. 214.

G. SERRA, D. BEAUFILS, P. CAUBISENS : «*Physique, informatique et musique*» - in actes des 8e Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques - UdP-INRP - 1998 - p. 163-168.

R. TOURNIER : «*Modulations*» - BUP n° 766 - 1994 - p. 1151-1164.

Logiciels cités

SoundScope : Soundscope pour ordinateur Macintosh. Distribué, en France, par Dipsi-Industrie / Vecteur Sud, 92325 Chatillon Cedex. Il est proposé dans 3 versions de qualité croissante dans la quantification (8, 12 et 16 bits) et d'une version «ouverte» permettant d'intégrer des objets d'analyse supplémentaires développés en Think C Objet.

VirtualWaves II : logiciel français pour Windows ; la version de démonstration est accessible par téléchargement auprès de Synoptic (<http://www.synoptic.net>).

CoolEdit : logiciel Windows en shareware, livré en démonstration sur certaines disquettes et accessible par téléchargement auprès de Syntrillium Software Corporation. La version de démonstration de CoolEdit est limitée dans le nombre de commandes accessibles en parallèle par session.

Spectrogramme : SPECTROGRAM 2.3 (gram23.zip, gram.exe) ; Analyseur sonographique de sons waves ; © R.S. Horne, 1995. *Freeware* pour Windows 3.1 ou Windows95. Téléchargeable par http ou ftp sur différents sites.

Voir aussi

Serveur «Physique-musique-informatique» à <http://www.inrp.fr> (Rubrique «Qu'est-ce que l'INRP, les départements, Nouvelles Technologies, Sites Web»). Accès direct (provisoire) par : <http://www.inrp.fr/Access/JIPSP/phyamus/accueil.htm>.

Annexe 1

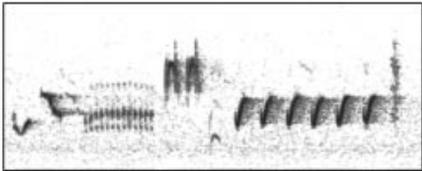
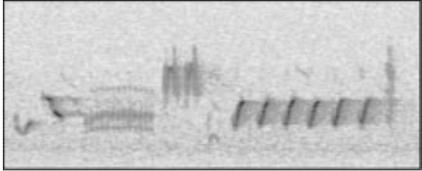
compléments sur le calcul et la représentation d'un sonagramme

À propos de la représentation

Le calcul par F.F.T. repose d'abord sur le choix d'un nombre N de points prélevés sur le signal échantillonné, tel que N soit une puissance de 2 permettant l'application d'un algorithme récursif. On a vu que le choix du nombre N était essentiel dans la résolution en fréquence souhaitée. Le calcul donne alors les parties réelle et imaginaire (R, I) de la transformée qui permettent de calculer les $N/2$ valeurs d'amplitude par $\sqrt{(R^2 + I^2)}$. Mais la représentation graphique nécessite un nouveau traitement.

D'une part, qu'il s'agisse de niveaux de gris ou de couleurs, leur nombre est limité par la résolution graphique : la représentation est donc elle-même *quantifiée*. D'autre part, le codage des niveaux graphiques en fonction des valeurs n'est pas imposé. Les valeurs peuvent donc être représentées de façon relative et ce sur une échelle linéaire ou logarithmique : dans le premier cas la représentation est celle du signal lui-même, pourrait-on dire, c'est-à-dire du rapport des amplitudes des composantes ; dans le second la représentation est en quelque sorte celle de la perception, c'est-à-dire des niveaux relatifs en décibel (suivant la loi de WEBER-FECHNER).

Enfin, dans certains logiciels, un seuil est utilisé (ou proposé à l'utilisateur) de façon à éliminer les niveaux faibles. Ceci est particulièrement utile lorsque l'on désire faire disparaître un bruit de fond, qu'il soit à l'origine dans le son où qu'il provienne du calcul numérique lui-même.

	
<p>Figure 14 : Sonagramme (chant de Rossignol ; logiciel Spectrogramme²¹).</p>	<p>Figure 14 bis : Sonagramme en représentation logarithmique des niveaux sonores (chant de Rossignol ; logiciel CoolEdit).</p>
	
<p>Figure 16 : Effet d'un seuillage à -6dB .</p>	<p>Figure 15 : Même analyse mais en représentation linéaire des niveaux (logiciel CoolEdit).</p>

Il ne faut donc pas s'étonner que pour un même son, l'allure d'un sonagramme, d'un paramétrage à un autre, et donc d'un logiciel à un autre, puisse être très différente. Une interprétation un peu fine nécessite donc de connaître les choix sous-jacents aux calculs et aux représentations.

À propos de la fenêtre de calcul

On a vu que le fait d'effectuer le calcul sur un signal tronqué et échantillonné a des conséquences normales mais indésirables sur le spectre. Les logiciels gèrent en général automatiquement l'affichage de la partie du spectre signifiante et proposent le choix de la correction sur la fenêtre : carrée, triangulaire, HAMMING, HANNING, notamment.

²¹ Logiciel SPECTROGRAM 2.3 : Analyseur sonographique de sons waves ; freeware ; © R.S. Horne, 1995.

Mais dans de nombreux cas, un paramétrage supplémentaire est offert : celui du taux de recouvrement au cours du glissement de la fenêtre. En effet la nécessité d'obtenir une bonne résolution fréquentielle peut conduire au choix d'un nombre N grand. Pour éviter l'apparition des longs pavés le calcul est effectué non pas en passant d'un bloc de N points au suivant, mais en faisant glisser la fenêtre avec un pas plus petit. Alors chaque portion du signal est utilisée dans 2, 3,... calculs successifs de la transformée de Fourier : c'est le taux de recouvrement. Un taux de recouvrement de 5 est souvent utilisé ; mais s'il permet d'obtenir un effet de continuité, on comprend qu'il lisse tous les événements brefs : on peut ainsi risquer de masquer des transitoires intéressants.

Certains logiciels offrent aussi la possibilité d'effectuer le calcul en avançant la fenêtre d'un pas supérieur à la largeur de la fenêtre. Dans ce cas, pour éviter une rupture dans la représentation graphique, le spectre calculé est attribué à la «plage d'avancement» et donc représenté par un pavé étendu. Ci-dessous, nous présentons différents sonagrammes obtenus avec le logiciel SoundScope pour un son de clarinette triple de Sardaigne²². L'enregistrement est numérisé à 44 kHz, 16 bits ; l'étendue spectrale est donc de 0-22 kHz. Les différents sonagrammes correspondent à un même extrait (durée de 0.30 s autour de la date 1.2 s) mais à des choix différents de la largeur de la fenêtre et du pas d'avance temporelle (*frame advance*).

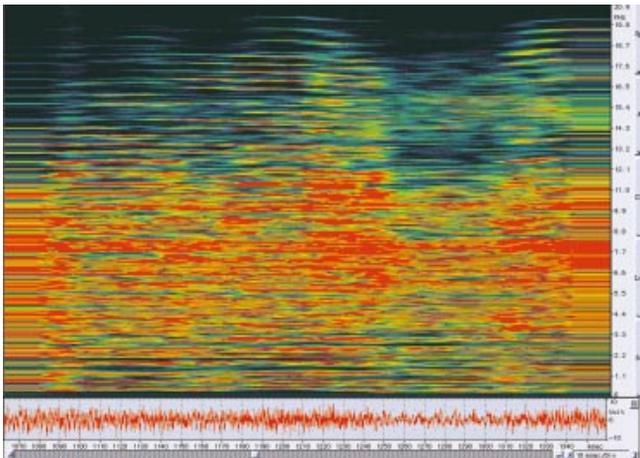


Figure 17 : Intervalle d'avance : 1 ms ; fenêtre de 23 ms (résolution 43 Hz).

²² Constituée de trois tubes de roseau à anche battante dont l'un est consacré au bourdon, les deux autres à la mélodie. L'extrait est tiré d'un enregistrement de B. LORTAT-JACOB, «*Le chant du Monde*», LDX 274 675.

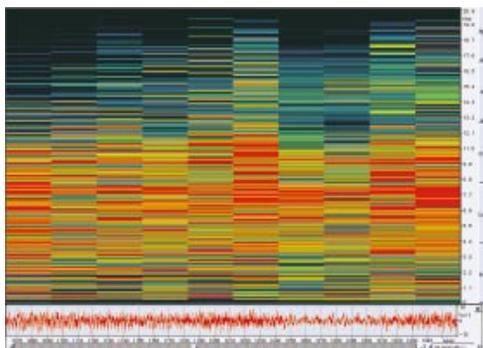


Figure 18 : Intervalle d'avance : 30 ms ; fenêtre de 23 ms (résolution 43 Hz).

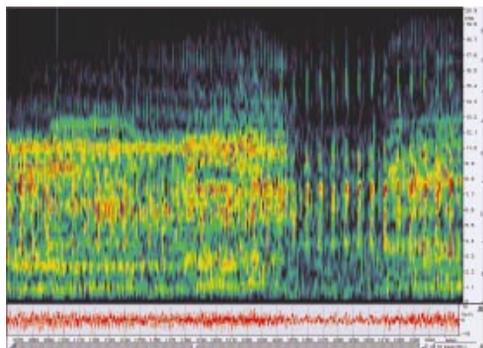


Figure 19 : Intervalle d'avance : 1 ms ; fenêtre de 2.9 ms (résolution 344 Hz).

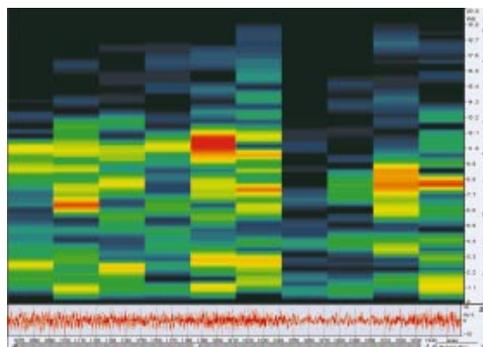


Figure 20 : Intervalle d'avance : 30 ms ; fenêtre de 2.9 ms (résolution 344 Hz).

Remarque : le logiciel SoundScope présente quelques particularités : 1 - les largeurs temporelles effectives sont environ 1.47 fois plus larges (33 ms au lieu de 23 ms) pour compenser un filtrage à 3 dB à l'issue du fenêtrage ; 2 - il offre à l'utilisateur la possibilité d'augmenter sa résolution fréquentielle indépendamment de la taille de fenêtre prélevée sur le son. En fait, le logiciel effectue le calcul de la transformée de FOURIER du même signal mais sur un plus grand nombre de points : les points supplémentaires sont évidemment des valeurs nulles.

Annexe 2

du sonagramme au son...

La procédure inverse de l'analyse sonographique peut être utilisée : partant d'un sonagramme il est possible, par transformée de FOURIER inverse ou par synthèse additive, de reconstituer un son²³. Différents logiciels permettent ce type d'utilisation : AudioSculpt, par exemple, (IRCAM, Groupe Forum Analyse-Synthèse) offre la possibilité de travailler un sonagramme au niveau purement graphique (déplacement de zones graphiques, modification du contraste, ajout d'objets graphiques, etc.) puis de jouer le son ainsi modifié. Citons ici un logiciel réalisé pour ce type de «synthèse sonographique» : Phonogram ; réalisé par Vincent LESBROS du GAIV, il est disponible en shareware²⁴.

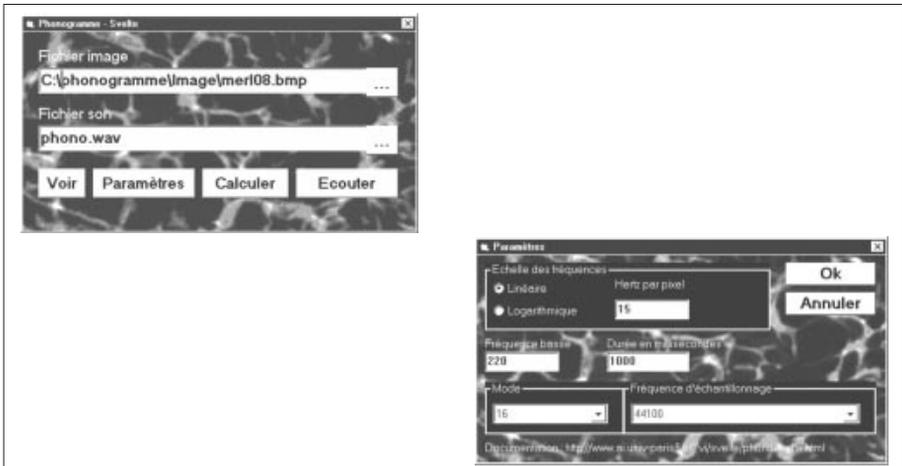
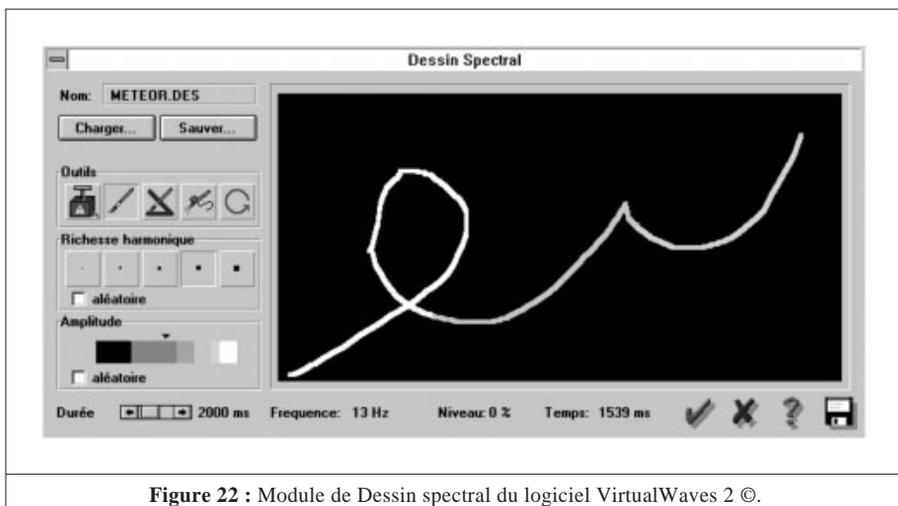


Figure 21 : Phonogramme © : après chargement d'une image (couleur ou noir et blanc) il suffit de préciser les paramètres d'interprétation "sonographique" (l'échelle de fréquence, notamment) pour obtenir le calcul du signal. Et on peut écouter le son créé...

²³ Le sonagramme ne présentant que les amplitudes, il y a un choix arbitraire à faire au niveau des phases.

²⁴ GAIV : Groupe Art et Informatique de Vincennes, Saint-Denis ; Phonogramme est téléchargeable à l'adresse : <http://www.ai.univ-paris/~gaiv>.

Le logiciel VirtualWaves 2, que nous avons cité, offre une possibilité voisine : celle de constituer un son à partir d'un graphique temps-fréquence. La différence essentielle réside dans l'interprétation du graphique : l'échelle verticale des fréquences est attribuée à la fréquence fondamentale du son, tandis que la richesse spectrale est liée à l'épaisseur du trait.



Annexe 3

compléments plastiques

Au-delà des aspects scientifiques, le sonagramme peut être source de motivation esthétique. La simple représentation d'un chant d'oiseau tel que le merle bleu peut déjà agir, mais il est possible d'en faire le vecteur d'une création artistique...

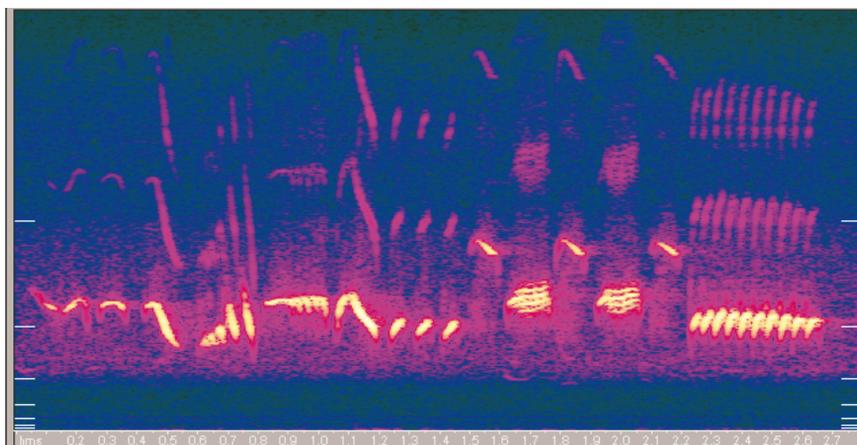


Figure 23 : Sonagramme d'un chant de merle bleu²⁵.

²⁵ Le sonagramme avec le son est accessible sur le site INRP «*physique-musique et informatique*» ; le chant est extrait du CD «*Les oiseaux d'Europe*» chez Sitalle.

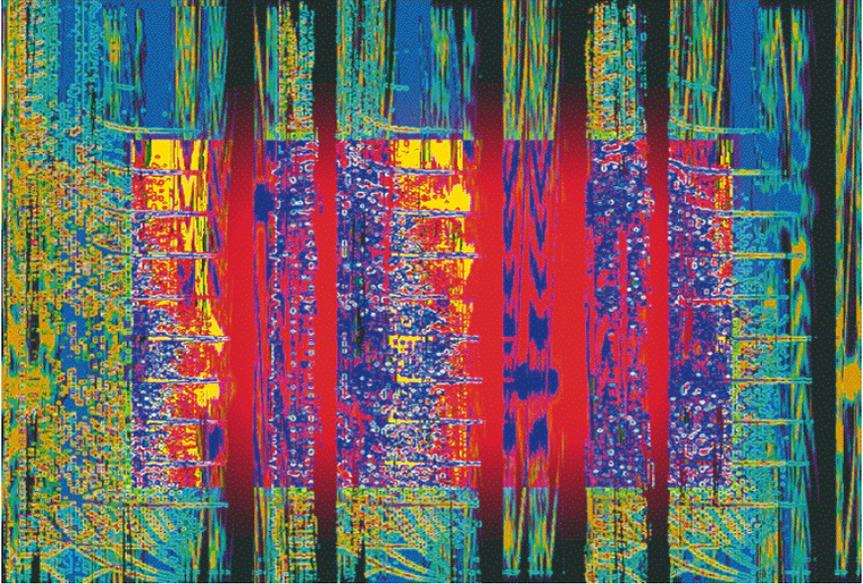


Figure 24 : Sonographic Art © Bernard CAILLAUD²⁶.

²⁶ L'exemple fourni ici est tiré du cédérom «Création numérique Image» de B. CAILLAUD [CAILLAUD 1995].