



HAL
open science

Modèles de l'intensité sonore

Gérard Pelé

► **To cite this version:**

Gérard Pelé. Modèles de l'intensité sonore. Deuxièmes Journées d'Informatique Musicale JIM '95, Marcel Mesnage, Apr 1995, Paris - Université Paris 6 - Jussieu, France. hal-04406482

HAL Id: hal-04406482

<https://hal.science/hal-04406482>

Submitted on 19 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Modèles de l'intensité sonore

Gérard Pelé

C'est une longue tradition que celle qui consiste à donner de la musique des modèles, puisque 300 ans avant J.C. la théorie musicale faisait déjà apparaître l'isomorphisme entre intervalles musicaux (Aristoxénos) et longueurs des cordes (Euclide). Depuis le début des années 1950, l'utilisation de l'ordinateur a donné une nouvelle impulsion à ce type de recherche, comme en témoignent les travaux de Lejaren Hiller, créateur de la première composition automatique programmée à partir de règles musicales (jouée le 9 août 1956 à l'Université de l'Illinois), ceux de Pierre Barbaud envisageant dès 1950 la composition musicale comme une suite d'opérations mathématiques, ceux de Michel Phillipot développant à la fin des années 1950 une méthode de composition musicale analogue à un contrôle de processus cybernétique, ou encore ceux de Iannis Xenakis définissant à partir de 1955 les événements sonores en termes physiques et statistiques pour aboutir plus tard à la formalisation plus abstraite des catégories en et hors-temps et à la théorie des cribles.

Il existe en fait deux approches, difficiles à concilier dans la recherche de modèles musicaux, qui sont l'approche « microscopique », la physique du son, et l'approche « macroscopique » plus liée à la linguistique. Très souvent cependant, ces deux approches se confondent dans la recherche de l'harmonie, que ce soit celle de la structure fine du son ou celle des notes dans leur dimension polyphonique, avec la série de Fourier et la vibration des cordes comme archétypes. Seul Iannis Xenakis s'est démarqué de cette conception, en explorant toutes les échelles du sonore et en créant des modèles originaux, pour une musique « à venir », sa propre musique. Le travail que nous proposons ici tente également de s'affranchir de cette donnée d'échelle, tout de même qu'il s'applique indifféremment aux différents genres de musique qu'on peut entendre ou imaginer.

Nous considérons d'abord que la musique est, du point de vue systémique, déterministe. Ensuite, nous en étudions un aspect généralement délaissé, à savoir l'évolution de l'intensité. Le concept d'intensité sonore, défini du point de vue de la physique (l'intensité acoustique) est bien sûr différent de celui défini du point de vue

de l'auditeur (la sonie), mais celui d'évolution de l'intensité est indépendant de ces points de vue du moment qu'on a identifié le seuil de la mesure physique et celui de la perception différentielle. Schématiquement, on peut dire qu'à chaque instant, l'intensité sonore peut devenir, ou plus forte, ou plus faible, ou rester inchangée. C'est ce schéma qui peut être axiomatisé en un modèle mathématique, même partiel, c'est-à-dire comme une suite d'opérations visant à décrire notre objet au seul niveau de pertinence de la variable étudiée. Cela dit, nous nous efforcerons de le construire de telle manière que le phénomène que nous étudions ne soit qu'une des variables du modèle, dès lors susceptible de décrire un ensemble de phénomènes comparables.

Nous exposons d'abord une méthode de représentation de l'évolution de l'intensité sonore, basée sur un appareil de détection de l'intensité sonore et d'un autre paramètre assimilable à la hauteur tonale. Les grandeurs obtenues à la sortie de cet appareil sont numérisées afin d'obtenir leur visualisation sur un traceur de courbes. Une série d'expériences ont été réalisées avec cet appareil et, comme source musicale, les « Quattro pezzi per orchestra » dites aussi « Quattro pezzi su una nota sola » de Giacinto Scelsi, une musique à mi-chemin entre les musiques « aléatoires » dont les modèles sont par définition statistiques et les musiques de composition traditionnelle en occident dont les modèles sont essentiellement mécanistes.

Les analyses que nous avons effectuées sur la musique de Giacinto Scelsi ont orienté notre choix d'un modèle mathématique vers les systèmes d'équations différentielles. En effet, l'évolution de nombreux phénomènes peut être convenablement décrite par un ensemble d'équations différentielles ordinaires du premier ordre, et en jouant sur leur non-linéarité et sur leur couplage mutuel on peut obtenir l'instabilité qui imite le caractère irrégulier ou imprévisible de la musique. Nous avons étudié plus en détail le modèle de Lorentz, qui est un modèle assez général de l'intermittence, attribut important de la musique.

Nous avons enfin tenté de valider notre modèle en effectuant une restitution à partir des courbes calculées par résolution numérique des équations différentielles. La première tentative de restitution, par transposition directe, a fait apparaître que la dissociation, préalable à l'analyse, de l'espace musical et de l'espace physique était irréversible. Dans la seconde tentative de restitution nous avons usé d'un subterfuge en utilisant le traceur de courbes lui-même comme source sonore, et nous avons

également tenté une généralisation en employant un autre système d'équations que celui d'Edward Lorentz : l'attracteur de Hénon.

Cette étude se termine par l'énoncé de quelques perspectives de développement, tant pour l'analyse que pour la composition, ces deux activités nous semblant difficiles à dissocier dans la pratique de la modélisation.

Analyse expérimentale

Définition des paramètres

L'intensité efficace moyennée

On recherche une mesure qui se rapproche de la sensation d'intensité subjective, ou sonie, qui est caractérisée par des lois expérimentales concernant sa relation à la fréquence (courbes isosoniques de Fletcher et Munson), sa gradation (loi de Fechner-Weber), et son aspect temporel (temps d'intégration de l'oreille).

La relation à la fréquence : Il est utile de prévoir une fonction de filtrage de manière à refléter l'atténuation de la réponse sensorielle aux extrémités du spectre et à conditionner au mieux le signal avant la mesure de sa valeur efficace. Le filtrage des fréquences les plus basses permet de réduire les produits d'inter modulation avec les variations les plus rapides de l'intensité sonore, et du côté des fréquences les plus élevées, il a un effet positif sur la réduction du bruit de la mesure. La courbe choisie s'accorde, avec des simplifications dans son tracé, à la courbe isotonique correspondant au niveau de 70 phons (pondération B), située à peu près au milieu de l'aire d'audition. Le filtre passe-bande correspondant possède les caractéristiques suivantes : fréquence de coupure basse à 158.5 Hz et -6 dB/octave, fréquence de coupure haute à 12200 Hz et -6 dB/octave.

La gradation : Si les musiciens n'utilisent couramment que huit nuances (ppp à fff pour une dynamique d'environ 70 dB) pour coder les niveaux d'intensité sonore, cela ne veut pas dire que ce sont les seuls niveaux que nous entendons. Tous les niveaux intermédiaires sont réalisés lors du jeu instrumental, ne serait-ce que dans l'attaque ou l'extinction d'une note. La mesure du seuil différentiel de perception de l'intensité nous fournit une indication sur les performances que doit réaliser notre appareil de mesure : 1 dB constitue le seuil le plus faible, au centre de l'aire d'audition. Donc, il suffit de faire en sorte que la dynamique de mesure soit suffisante pour que ce seuil ne soit pas masqué par le bruit des appareils.

L'aspect temporel : La constante de temps de l'appareil auditif est le temps d'intégration minimum avant perturbation de la sonie. Cette constante de temps étant estimée à 100 ms, on choisit une valeur un peu supérieure (125 ms), correspondant à la position « F » (Fast) des sonomètres traditionnels. C'est sur cet aspect qu'il convient de porter le plus d'attention. En effet, puisqu'il s'agit d'apprécier la dynamique du signal, c'est-à-dire les constituants du mouvement qui décrit son évolution temporelle, il importe que l'échelle d'observation corresponde à celle qui se constitue dans la sensation d'intensité sonore.

La hauteur tonale moyennée

Nous avons cherché à mesurer une seconde variable, reflétant les variations tonales donc indépendante de celle reflétant les variations d'intensité, sans qu'elle puisse être clairement identifiée comme la première à une sensation précise. En effet, la sensation de hauteur (tonie) ne semble pas liée à un paramètre physique unique : Pour un son harmonique, la tonie est pratiquement celle du fondamental, même si celui-ci est absent. Il est possible que ce soit l'écart de fréquence entre harmoniques qui commande la sensation de hauteur. La tonie d'un son aléatoire ou inharmonique semble liée à la zone formante de son spectre, c'est à dire à la partie de celui-ci où les composantes ont une amplitude relativement grande.

Le but étant d'obtenir une mesure significative en termes de variations d'un certain paramètre audible, celui dont il est souhaitable de s'approcher est la hauteur tonale, c'est-à-dire celle qui produit la sensation de hauteur pour un son complexe. Une telle mesure peut être approchée en effectuant la moyenne des vitesses instantanées avec un temps d'intégration identique à celui qui détermine la mesure d'intensité sonore, soit 125 ms.

Réalisation de l'appareil de mesure

Il a été fait appel à une technique de traitement en électronique analogique pour le conditionnement et l'extraction des signaux correspondant aux paramètres étudiés. Après quoi ces signaux sont numérisés. Pour le conditionnement du signal, on a un filtre passe-haut du premier ordre (montage « RC »), suivi d'un étage séparateur (amplificateur opérationnel câblé en gain unité), suivi d'un filtre passe-bas du premier ordre, suivi d'un deuxième étage séparateur. La détection de l'enveloppe d'amplitude

s'effectue à l'aide d'un démodulateur d'amplitude constitué d'une diode sans seuil (diode dans la boucle de contre-réaction d'un amplificateur opérationnel), de deux filtres du premier ordre destinés à l'intégration du signal conformément à la constante de temps voulue, et d'un étage amplificateur à gain ajustable (amplificateur opérationnel monté en amplificateur de gain positif supérieur à l'unité) permettant de calibrer le signal. La détection de l'enveloppe tonale fait appel à un démodulateur de fréquence constitué d'un amplificateur logarithmique (amplificateur opérationnel monté en amplificateur de gain positif variable de gain supérieur à l'unité grâce à un réseau de diodes) permettant d'atténuer les variations d'amplitude du signal, suivi d'un étage dérivateur (à l'aide d'un filtre passe haut du premier ordre) permettant d'obtenir le signal de vitesse proprement dit, suivi de la même détection d'enveloppe que pour l'amplitude (diode sans seuil plus deux étages de filtrage), et de l'étage amplificateur à gain ajustable.

Après avoir effectué le calibrage, une série de tests ont été faits de manière à tracer les fonctions de transfert de notre montage. Pour la détection d'amplitude, la fréquence de référence étant 500 Hz en régime sinusoïdal et le signal d'entrée variant entre -50 dB et 20 dB, on obtient en sortie un signal qui varie entre -50.9 dB et 9.2 dB pour une courbe de transfert légèrement logarithmique. Ces valeurs ne sont pas modifiées si on fait varier la fréquence de référence de 100 Hz à 5000 Hz. Pour la détection de la hauteur tonale, l'amplitude de référence étant de 0 dB en régime sinusoïdal et la fréquence variant de 50 Hz à 10000 Hz, on obtient en sortie un signal qui varie entre -0.02 V et 5 V pour une courbe de transfert légèrement logarithmique. Cette courbe est corrélée à la valeur de l'amplitude en entrée dans la proportion de 4% entre -50 dB et 20 dB.

Numérisation

La numérisation des signaux obtenus à la sortie du détecteur s'effectue à la fréquence de 20 échantillons par seconde. Ces signaux, légèrement compressés ainsi que nous l'avons vu en raison de la non-linéarité des fonctions de transfert du détecteur, ont au maximum une dynamique de 45 dB si on ne dépasse pas le 0 dB en entrée, ce qui convient bien à la dynamique du numériseur qui est dans le meilleur des cas de 48 dB, avec un codage sur 8 bits, soit 256 valeurs entières. Finalement, ces valeurs sont stockées dans un fichier avec un format tel qu'elles

peuvent être lues par le programme de modélisation, qui est écrit en langage LISP, et qui sert également pour le tracé des courbes.

Résultats de l'analyse expérimentale

Différentes courbes sont tracées au moyen d'un traceur de courbes qui offre une résolution de 40 points par millimètre, ce qui permet d'observer des détails très fins puisque les courbes comportent en moyenne 5000 points. L'intensité et la hauteur tonale en fonction du temps sont des courbes qui ne permettent pas en général de décider de la dynamique d'un phénomène un tant soit peu complexe, mais qui sont néanmoins utiles car ce sont les plus proches des représentations traditionnelles de la musique, dans la notation en partitions. Ensuite, une analyse spectrale statistique permet de quantifier les rythmes, perçus ou sous-jacents, qui scandent les pièces musicales, tandis que le tracé de l'histogramme permet d'en observer la répartition des valeurs. Enfin, un tracé par points de l'une des valeurs en fonction de l'autre est utilisé pour tenter d'évaluer la dynamique du phénomène. Cette représentation particulière prend sa source dans les travaux d'Henri Poincaré. L'évolution de nombreux systèmes peut être décrite par un ensemble d'équations différentielles ordinaires du premier ordre. Or on peut représenter cette évolution dans un espace de référence, dont les axes sont les coordonnées des variables dont on peut choisir indépendamment les conditions initiales, appelé espace des phases. Comme nous ne connaissons pas a priori le nombre de degrés de liberté du système dont le phénomène que nous étudions serait l'expression, nous faisons l'hypothèse qu'il possède au moins 1 degré de liberté de plus que ceux qui correspondent aux deux variables que nous mesurons. Ce qui fait de la carte à deux dimensions, résultat du tracé conjoint des deux paramètres que nous mesurons, la section de Poincaré d'un flot de dimension trois. L'intérêt de cette hypothèse est de ne pas enfermer le phénomène de la création dans un jeu de paramètres tous connus, mais d'en laisser un caché, donc libre de s'exprimer dans le modèle de façon à laisser intact ce phénomène.

L'observation des courbes d'intensité montre une dynamique très importante. L'écart entre les niveaux les plus faibles et les niveaux les plus élevés dépasse même probablement un peu les possibilités du numériseur. De plus, les transitions entre les différents niveaux d'intensité s'effectuent parfois par paliers, mais toujours de manière assez brutale, et symétriquement autour des maxima. Des pics d'intensité

élevée et de durée variant de moins de 10 s à plus de 50 s succèdent à des plages de calme avec un rythme d'apparition irrégulier. Ces bouffées sonores, nous les qualifions d'intermittentes. La hauteur tonale, quand à elle, varie à un rythme plus élevé que l'intensité, à l'intérieur et à l'extérieur des bouffées sonores, sans doute en raison de phénomènes inter modulation entre instruments.

Sur les courbes de l'analyse spectrale statistique des courbes d'intensité, les pics de plus forte amplitude (fondamentaux) sont à des fréquences allant de 0.025 Hz à 0.12 Hz, c'est-à-dire de 1.5 événements à 7.2 événements par minute de musique, ceux-ci correspondant aux événements principaux, les grandes bouffées sonores évoquées précédemment. Les pics suivants, correspondant aux variations de plus faible amplitude et plus rapides ont des fréquences qui s'échelonnent jusqu'à 1 événement par seconde. Les histogrammes confirment le sentiment de fort contraste que faisait apparaître l'observation des courbes d'intensité, mais avec une plus forte proportion de niveaux faibles que de niveaux élevés.

Le tracé par points, avec l'intensité en abscisse et la hauteur tonale en ordonnée, montre une organisation linéaire entre deux points qui sont bien sûr les valeurs extrêmes. La dispersion que l'on peut observer est principalement le fait des variations tonales qui sont, comme nous l'avons vu, d'essence plus aléatoire que les variations d'intensité. On observe également bien sur ces tracés l'effet de tassement qui est la conséquence de la dynamique insuffisante du numériseur. Il reste que si l'on se réfère aux différents types de tracés de ce genre que l'on peut trouver dans la littérature spécialisée (par exemple, P. BERGÉ, Y. POMEAU, CH. VIDAL, L'ordre dans le chaos, Hermann, Paris, 1984, 1988), il évoque fortement un phénomène d'intermittence, c'est-à-dire un signal sujet à des variations rares et de grande amplitude. C'est dans cette direction que nous allons orienter notre recherche d'un modèle mathématique de ce phénomène.

Modélisation

Choix du modèle

Avec deux variables libres représentant les paramètres d'intensité et de hauteur tonale, plus une troisième variable de contrôle exprimant de façon arbitraire l'action de composition, le modèle doit comporter trois équations différentielles ordinaires du premier degré. De plus, pour que ce système d'équations possède une dynamique

turbulente (dont l'intermittence est l'un des aspects), il doit comporter au moins un terme non linéaire, du second ordre par exemple, ainsi que des termes de couplage. Sur cette base, il est certainement possible de construire de nombreux modèles (applications du cercle, du plan ou de dimension plus élevée), dans lesquels une intermittence temporelle apparaît à la transition entre régime périodique et régime turbulent.

Ces systèmes dynamiques ont tous, pour une valeur d'un paramètre de contrôle inférieure à une certaine valeur critique, un comportement de cycle limite, c'est-à-dire qu'ils sont le siège d'oscillations régulières et stables pour de petites perturbations. Lorsque ce paramètre de contrôle dépasse la valeur critique, on a un régime dynamique intermittent, dans lequel le signal temporel est fait d'oscillations apparemment régulières, mais interrompues de temps en temps par des fluctuations « anormales », dont l'amplitude et la durée sont à peu près les mêmes d'une fluctuation à l'autre et dépendent peu de la valeur du paramètre de contrôle. Au seuil d'intermittence, c'est seulement la fréquence moyenne de ces fluctuations qui tend vers zéro.

Il convient de faire ici une remarque importante : Ces systèmes ne disent rien des phénomènes physiques qu'ils sont censés modéliser. Ils tracent seulement des mouvements qui ressemblent à ceux qu'on peut observer expérimentalement dans les systèmes réels, et leurs constituants ne sont rien d'autre que les constituants du mouvement. Dès lors, puisqu'on ne cherche pas au travers de ces modèles à décrire une réalité d'ordre physique, on a intérêt à choisir le modèle le plus simple. Le modèle élaboré par Edward Lorentz (Edward LORENTZ, Deterministic non-periodic flow, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 20, 1963, p. 130) pour modéliser la convection de Rayleigh-Bénard possède justement ce caractère de simplicité, et de plus il offre l'avantage d'avoir déjà fait l'objet de nombreuses études, ce qui permet d'éviter les tâtonnements qu'un modèle original ne manquerait pas d'entraîner. Sans revenir sur ce que nous avons dit de la séparation des modèles avec la réalité physique, il faut tout de même noter que l'origine hydro-dynamique du phénomène que Edward Lorentz modélise institue une parenté avec le phénomène acoustique que nous étudions, car tous les deux sont décrits à l'origine au travers d'équations qui ressemblent à celles de Navier-Stokes.

Description du modèle et choix des paramètres

Le modèle de Lorentz est constitué de trois équations différentielles ordinaires :

$$dX / dT = Pr Y - Pr X$$

$$dY / dT = - X Z + r X - Y$$

$$dZ / dT = X Y - b Z$$

Le paramètre Pr (nombre de Prandtl) est le rapport de la viscosité cinématique du fluide, dans lequel a lieu le phénomène, à sa diffusivité thermique. Les mouvements seront plus lents dans un fluide plus visqueux. Le paramètre r dépend du nombre de Rayleigh ($r = q^2 Ra / (\pi^2 + q^2)^3$ avec la période égale à $2 \pi / q$ dans la direction X), qui est une mesure de l'écart de température. Le nombre de Rayleigh critique correspond à une situation où l'état de repos d'un fluide cessant d'être stable, naît la convection. Le paramètre b ($b = 4 \pi^2 / (\pi^2 + q^2)$) varie comme l'inverse de la période.

Les paramètres Pr et b sont fixés à l'origine pour un état conductif légèrement instable, c'est-à-dire Pr = 10 et b = 8/3. Des problèmes d'amortissement des courbes obtenues avec ces valeurs ont conduit à modifier Pr pour augmenter la viscosité. Avec Pr = 14 et b = 8/3, le modèle possède une seule solution stationnaire, qui correspond à la conduction pure, pour r compris entre 0 et 1, deux solutions correspondant à la convection pour r légèrement supérieur à 1, et au-delà il y a une bifurcation qui donne deux points stables à partir d'un point stable. Pour r = 24.74, ces deux solutions perdent leur stabilité linéaire pour donner une solution aperiodique et c'est autour de cette valeur que nous avons effectué notre étude.

Résultats des calculs

La résolution numérique de ce système d'équations est effectuée grâce à un programme écrit en langage LISP. Le choix de ce langage, s'il n'est pas évident pour ce qui est du calcul numérique, s'impose par contre dès qu'il s'agit de manipuler des symboles. L'écriture de l'interface utilisateur, ainsi que la gestion des périphériques qui requièrent habituellement beaucoup de mise au point s'en est trouvée grandement facilitée. Toute équation algébrique, équation récurrente ou système d'équations récurrentes, et bien entendu les équations et systèmes d'équations différentielles peuvent être entrés directement en notation algébrique normale, avec le cas échéant leurs conditions initiales. Les résultats des calculs sont placés dans des vecteurs sur lesquels on peut effectuer la plupart des opérations arithmétiques et

qui peuvent être manipulés comme n'importe quel objet LISP, ce qui facilite leur gestion et leur sauvegarde. Enfin, la sortie sur traceur de courbes s'effectue avec mise à l'échelle automatique et tracé d'un réticule, de manière que les courbes ressemblent à ce qu'on pourrait obtenir avec un équipement analogique et un oscilloscope, mais avec une résolution bien supérieure. Pour la résolution numérique des équations différentielles, nous avons retenu la méthode de RUNGE-KUTTA au quatrième ordre (Richard DOUGLAS, Numerical Analysis, troisième édition, Prindle, Weber & Schmidt, 1985).

Quatre séquences de 200 secondes ont été calculées en chaîne, c'est-à-dire qu'à part la première séquence pour laquelle les conditions initiales sont déterminées arbitrairement, chacune des trois autres séquences a pour conditions initiales les dernières valeurs de la séquence qui précède. Étant donné le mode d'apparition de l'intermittence dans ce système, c'est-à-dire la destruction d'un régime régulier d'oscillations, le phénomène qui nous intéresse est en quelque sorte parasité par ces oscillations régulières. Elles sont nécessaires à la dynamique du système mais n'expriment rien du phénomène musical que nous voulons simuler. Par conséquent, nous avons éliminé ce mode d'oscillations par un échantillonnage des valeurs calculées à une période de 0.6826 s correspondant à cette fréquence de résonance (1.4648 Hz), préalablement évaluée par une analyse spectrale. La courbe correspondant à l'intensité est obtenue en rajoutant au vecteur Z résultant de la résolution numérique du système une petite variable aléatoire gaussienne pour plus de réalisme, et en dilatant légèrement ce vecteur avant de le normaliser en valeurs entières sur 8 bits. La courbe correspondant à la hauteur tonale est obtenue par une combinaison linéaire des vecteurs X et Y résultant de la résolution numérique du système, ce qui ne modifie pas sa dynamique. Il est ensuite traité de la même manière que le vecteur d'intensité.

Les courbes d'intensité montrent une moins grande variabilité que celles de la musique de Giacinto Scelsi. Les bouffées sonores ont des durées qui vont de 10 à 20 secondes (au lieu de 10 à 50 secondes), et la densité moyenne de ces bouffées est un peu plus élevée, ce qui est démontré par l'analyse spectrale statistique de ces courbes qui donne une première fréquence de 0.025 Hz en accord avec celle des originaux, mais avec en plus des partiels de niveau important jusqu'à des fréquences de 0.15 Hz. Le premier partial et même parfois le second ont des amplitudes plus fortes que le premier pic, ce qui se traduit, comme nous l'avons déjà constaté à l'observation des courbes d'intensité, par un brouillage des rythmes rapides avec les

rythmes plus lents. Les courbes semblent moins « définies », c'est peut-être là que s'exprime le défaut d'une action volontaire irréductible qui serait celle du compositeur.

Dans les tracés des sections de Poincaré, la dispersion est forte selon les deux axes, et paradoxalement, ces tracés nous apparaissent moins déterministes que les originaux, dont la bipolarisation très nette fait place à une polarisation plus diffuse. D'abord, il faut y voir l'action des petites variables aléatoires que nous avons ajouté pour « plus de réalisme ». Ce « plus de réalisme » est obtenu en effet sur les courbes temporelles, mais d'une façon non cohérente et c'est ce qui est révélé dans les sections de Poincaré. La puissance de l'inter modulation, dénotée par l'inversion du dégradé des partiels déjà mentionnée, est une seconde cause de désordre. Au total, on a bien l'image d'une dynamique intermittente, elle l'est d'ailleurs par construction, mais brouillée.

Analyse et utilisation des résultats

Dès le début de cette étude, nous avons clairement exclu qu'elle puisse être la modélisation d'un acte compositionnel. Nous avons choisi une musique, certes, et pas au hasard, mais dès lors que ce choix a été effectué, on n'a plus considéré que le phénomène physique indépendamment de son origine. Peut-être pourrait-on objecter que cela ne change rien, en faisant l'hypothèse que tout phénomène est en quelque sorte « signé » par son origine. Mais, outre que ce n'est pas certain, il faut considérer que nous travaillons sur une version « dégradée » du phénomène, un signal électrique réduit à une dimension et sur lequel on pratique deux mesures : l'intensité et la hauteur tonale. Il n'y a aucune raison pour qu'il reste quelque chose de l'origine du phénomène dans ces formes. Lorsque l'intensité augmente brusquement, c'est le résultat de la volonté du compositeur et rien que cela. Nous observons la conséquence d'un acte qui s'élabore dans un espace autre. La conception de cette brusque variation d'intensité sonore s'effectue dans un espace qui déborde l'espace de représentation de l'intensité sonore. Avec les courbes calculées, une augmentation brusque de l'intensité est la conséquence inévitable de la résolution numérique du système d'équations que nous avons choisi. Ce système d'équations ne peut manquer de produire ces brusques variations d'intensité, et en ce sens, on peut dire que c'est lui qui en est l'origine. Il ne peut être comparé à un compositeur, et en particulier il ne traduit en rien une volonté consciente ; il ne traduit

pas plus une impulsion irraisonnée. Au contraire des courbes obtenues par la mesure, celles-ci appartiennent à un espace qui n'est pas débordé par un supposé espace de conception, mais qui lui est au contraire étroitement connecté.

Notre étude ne serait pas complète, cependant, si nous n'avions pas procédé à des tentatives de restitution. En effet, tout modèle doit se conformer à une double exigence : celle de l'adéquation au phénomène, et celle de la généralisation qui fait que le modèle ne décrit pas seulement une singularité, mais une classe de phénomènes analogues. Dans ce sens, nous parlons bien de restitution, comme les archéologues, pour marquer que nous ne refaisons pas la musique de Giacinto Scelsi, mais que nous voulons seulement vérifier dans le sonore la cohérence de notre modèle. Nous ne prétendons pas pour autant lever l'ambiguïté par cette seule déclaration ; elle ne pourrait l'être que par une autre déclaration, du type : « ceci est de la musique », en admettant qu'elle ne lui soit pas contradictoire.

Première tentative de restitution

La première tentative de transcription du graphique au sonore s'effectue au moyen d'un petit programme qui commande un générateur Basse-Fréquence wobulable. On obtient par conséquent une « mélodie » qui reflète l'évolution d'une courbe de tonalité. La « musique » obtenue par ce moyen a tout à fait l'allure d'une musique sérielle, ce qui n'est pas du tout conforme à nos hypothèses puisque nous attendions l'expression sonore d'une dynamique intermittente. Comment expliquer ce résultat ? L'analyse est nécessairement réductrice, et un modèle analytique n'est lui même efficace que dans la mesure où il schématise suffisamment un phénomène complexe pour le rendre intelligible. Dès lors, espérer remonter à partir de ce modèle jusqu'au phénomène est illusoire si on ne prend pas la précaution d'injecter « quelque part » dans ce processus du « phénoménal ».

Notre modèle, par conséquent, est peut-être conforme à la théorie, mais nous ne pouvons le vérifier du fait de son inadéquation au phénomène, du moins dans le mode de transposition utilisé ici. Cette observation, nous pouvons d'ailleurs la faire à propos de la musique sérielle, qui montre des schémas de composition (séries et opérateurs) parfaitement rigoureux, des partitions parfaitement lisibles que l'audition laisse rarement deviner.

Deuxième tentative de restitution

Pour injecter du phénoménal dans notre procédé de transposition, il semble qu'une fois encore nous pouvons nous inspirer de la méthode de travail de Iannis Xenakis. Il construit des systèmes de production de sons et chacun de ces systèmes représente en même temps une théorie sur la musique. Notre système, si l'on veut, représente une théorie des événements sonores dans la musique semi-improvisée. Iannis Xenakis fait des calculs conformément à sa théorie, ces calculs lui permettent de bâtir un schéma de la partition, mais ce n'est qu'un schéma et le plus souvent il effectue des modifications, il adapte les propositions du calcul pour aboutir à la partition définitive en se servant pour cela de son expérience de compositeur, de son intuition... A chacun sa stratégie, mais il subsiste qu'il est possible de transposer une courbe comme celles que nous produisons dans quantité de systèmes de représentation autres, et qui correspondent à des espaces de travail spécifiques à chaque compositeur. Le calcul acquiert ainsi un double rôle : Il inspire la composition en tant qu'il est une théorie sur le monde sonore à produire, et il sert pratiquement comme une aide, un squelette de composition dans l'espace propre du musicien. C'est ainsi que nous envisageons l'utilisation de ces courbes.

Pour illustrer cette dernière proposition, et en même temps pour montrer la généralité de notre démarche, nous avons choisi un nouveau système d'équations. Une simplification peut-être apportée au modèle de Lorentz en transformant les équations à temps continu en itérations à temps discret, ce qui permet de remplacer un système de trois équations différentielles par une application à deux dimensions. Dans ce cas, les points successifs obtenus dans le plan doivent être considérés comme appartenant à la section de Poincaré du flot engendré par le système des trois équations différentielles. Partant de cette idée, Michel Hénon (Michel HÉNON, A two-dimensional mapping with a strange attractor, Communications in Mathematical Physics, Vol. 50, 1976, p. 69) a proposé l'application suivante du plan sur lui-même :

$$X_{k+1} = Y_k + 1 - aX_k^2$$

$$Y_{k+1} = bX_k$$

La valeur de la constante a contrôle la non-linéarité de l'itération, et celle de b traduit le rôle de la dissipation. Cette application est homéomorphe au modèle de Lorentz, en particulier on observe le phénomène d'intermittence qui le caractérise. Les valeurs habituellement utilisées pour a et b sont $a = 1.4$ et $b = 0.3$, mais pour notre part nous avons choisi une valeur de la non-linéarité légèrement supérieure, soit $a =$

1.42. Le calcul montre que les itérés successifs convergent très rapidement vers l'attracteur (section de Poincaré obtenue en traçant la courbe $Y = f(X)$). La façon dont apparaissent les points successifs est irrégulière, imprévisible et aléatoire. A cet égard, la dynamique sur l'attracteur de Hénon se présente bien sous un aspect chaotique, ainsi qu'en témoigne également la courbe temporelle $X = f(T)$. Nous avons calculé X , Y et deux combinaisons linéaires de X et Y , soit $Y+X$ et $Y-X$; ce qui donne quatre courbes et trois sections de Poincaré, sur lesquelles on peut en outre remarquer une propriété qui n'apparaissait pas sur celles calculées à partir du modèle de Lorentz, une structure feuilletée, se répétant identiquement à elle-même à différentes échelles, caractéristique d'un objet fractal.

Nous avons remarqué lors du tracé des sections de Poincaré, qui s'effectue par points, le bruit que faisait l'appareil : un claquement bref à chaque point tracé, plus le bruit des moteurs se déplaçant sur les deux axes x et y . Il nous semblait bien que ce bruit reflétait la dynamique de l'application aussi bien qu'un autre qu'on aurait pu obtenir avec une méthode de transposition plus rigoureuse, mais il restait encore trop brut, et surtout il convenait de rendre plus évident ce qu'il avait de régulier dans son apparence de désordre. Comme ce sont les relations entre les différentes variables qui manifestent la régularité, nous avons combiné plusieurs enregistrements.

Perspectives de développement

L'analyse pourrait être une possibilité de développement et d'approfondissement de cette recherche. Sans vouloir préjuger de l'utilité ni de la généralité des courbes que nous avons tracées à partir de la musique de Giacinto Scelsi, nous pouvons tout de même les caractériser. La courbe la plus synthétique est celle que nous avons appelé « section de Poincaré ». En faisant abstraction de l'ordre dans lequel ces points sont tracés, il reste une figure caractéristique de la dynamique du signal qui l'a engendré. Nous avons donc la possibilité de classer ces formes selon leur ressemblance pour un grand nombre de pièces différentes, et s'il s'avère que le nombre de classes n'est pas trop grand, à l'issue de cette première phase toute nouvelle pièce analysée par ce moyen appartiendra nécessairement à l'une de ces classes et sera ainsi apparentée à l'ensemble des pièces qui la composent déjà. Comme le critère de classification, « la dynamique du signal », sort des critères habituellement utilisés pour classer la musique, il se pourrait que des

rapprochements inattendus se produisent, apportant ainsi une conception renouvelée de la classification musicale.

Il conviendrait pour cela de disposer d'un système classificateur automatique sur les images des sections de Poincaré. De tels systèmes existent et sont basés sur la simulation de réseaux de neurones formels, dont plusieurs modèles conviennent pour la tâche de classification envisagée, à savoir le modèle de réseau à couches et rétro-propagation dont l'ancêtre est le Perceptron de Rosenblatt, le modèle de Hopfield qui est une mémoire associative et le modèle de Kohonen qui est un filtre adaptatif. Quel que soit le modèle choisi, ces réseaux distribuent les images fournies en entrée en un certain nombre de classes préalablement choisies en sortie. Une première phase d'apprentissage (apprentissage supervisé) permet de définir ces classes, à la suite de quoi le réseau est capable de classer correctement toute nouvelle entrée.

Pour ce qui est de la modélisation ou d'une utilisation créative, il serait possible d'étendre notre étude à celle de nouveaux modèles. Pour notre part, des recherches préliminaires nous conduisent à proposer le modèle de Lotka-Volterra (ce modèle est présenté dans P. GLANSDORFF, I. PRIGOGINE, Structure stabilité et fluctuations, Masson, Paris, 1971) qui nous semble être un bon candidat : Ce modèle est déjà utilisé pour simuler certains phénomènes biologiques fondamentaux comme les horloges biologiques (BURNING 1960) ou les propriétés non stationnaires de réseaux nerveux (COWAN, 1969).

$$dX/dT = k_1 A X - k_2 X Y$$

$$dY/dT = k_2 X Y - k_3 Y \quad \text{avec } k_i = 1 \text{ et } A = 1$$

Ou

$$dX/dT = A + X^2 Y - B X - X$$

$$dY/dT = B X - X^2 Y \quad \text{avec } B_c = 1+A^2 \text{ et } B > B_c$$

Il existe bien d'autres possibilités, mais nous croyons surtout qu'il serait bon de renoncer à toute identification de paramètres musicaux réels dans les variables qui composent ces courbes : C'est avant tout en termes d'événements qu'il convient de parler, et que ces événements correspondent à tel ou tel paramètre musical nous paraît relever de la spéculation.

Nous l'avons montré dans notre exemple de transposition musicale, toute méthode de transposition est a priori licite, du moment qu'elle respecte la dynamique du système qui est à l'origine. Le travail consiste alors surtout à la rendre bien perceptible, par tous les moyens qu'on peut imaginer. Il place le réalisateur dans cette catégorie « d'artistes » que Claude Lévi-Strauss situe entre le savant et le bricoleur : « ... l'artiste tient à la fois du savant et du bricoleur... » (Claude LÉVI-STRAUSS, *La pensée sauvage*, PLON, Paris, 1962, p. 33). Le savant Edward Lorentz élabore un objet de connaissance (la convection) tandis que le bricoleur Takis construit le mythe d'une force (magnétique : invisible, impalpable, inodore...) douée d'une vie propre. Nous pouvons tempérer cette vision un peu trop tranchée en remarquant que Takis avec ses « lutins » musicaux aussi bien que Edward Lorentz avec sa « météorologie miniature » (en trois équations !) construisent tous deux le type même de l'oeuvre d'art : le modèle réduit. Tout modèle réduit a vocation esthétique, et en même temps, comme il est artificiel, il devient possible de comprendre comment il est fait, comment il fonctionne. L'émotion esthétique provient de cette union instituée au sein d'une chose créée par un individu, donc aussi virtuellement par un autre qui en découvre la possibilité au travers de sa réalisation, entre l'ordre de la structure et l'ordre de l'événement.