



La musique en images

CHRISTOPH PÖPPE

Comment former des images à partir des sons.

Comment Transformer les sons en images ? La recherche d'une telle opération est utile : un coup d'œil suffirait pour savoir si une émission sonore est intentionnelle ou aléatoire. Gordon Monro, à l'Université de Sydney, et Jeff Pressing, à l'Institut de psychologie de Melbourne, explorent ce type de visualisations.

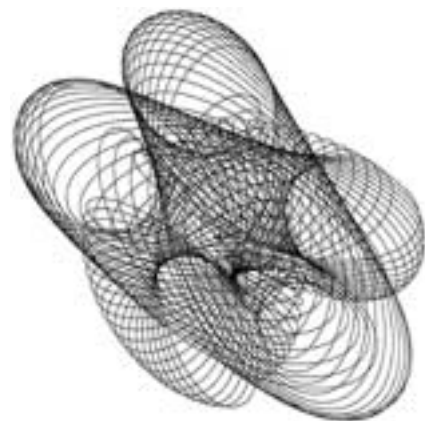
Ils ont notamment utilisé les données fournies par les systèmes d'enregistrement de disques compacts : environ 44 000 fois par seconde, la tension électrique formée à partir du son, dans le microphone, est mémorisée ; on transforme ainsi un signal continu en une suite de valeurs, qui sont stockées sous forme codée sur les disques compacts.

Désignons ces valeurs par $s_1, s_2, s_3, \dots$ et portons dans un plan muni d'un repère les points (s_i, s_{i+1}) . Normalement, on utilise les repères cartésiens pour représenter les fonctions : aux variables x de l'axe des abscisses, les fonctions associent des valeurs y repérées sur l'axe des ordonnées. Dans l'étude du son, on ne cherche pas si une fonction f associe chaque valeur à la précédente ($s_{i+1} = f(s_i)$), mais on construit un graphe en portant des points d'abscisse s_i et d'ordonnée s_{i+1} dans un plan comme si une telle fonction existait. Ce mode de représentation

fait ainsi apparaître d'éventuelles relations (des «corrélations») entre une valeur et celle qui la précède immédiatement, autrement dit entre la suite des valeurs et une version d'elle-même décalée dans le temps, d'où le nom de «diagramme d'autocorrélation» pour l'image que forment les innombrables points qui décrivent un signal sonore.

Quelle image obtient-on par ce procédé ? Sans précautions particulières, l'image semble insignifiante, car, avec une fréquence d'échantillonnage de 44 000 par seconde, deux valeurs successives sont si proches que rien n'apparaît : les valeurs s_i et s_{i+1} sont quasi identiques, et la représentation graphique correspondante est très proche de la droite $x = y$, la bissectrice du premier quadrant.

L'image devient plus intéressante quand on utilise un écart supérieur entre les valeurs représentées, tout en conservant tous les points de l'échantillonnage : on porte par exemple les points (s_i, s_{i+10}) au lieu des points (s_i, s_{i+1}) . D'ailleurs, au lieu de 10, on peut choisir n'importe quel écart de temps k afin d'obtenir une image aussi instructive que possible. Avec un pas k égal à 10 et un son de fréquence égale à 1 000 hertz (ce qui correspond à une note aiguë de soprano), les deux valeurs à représenter



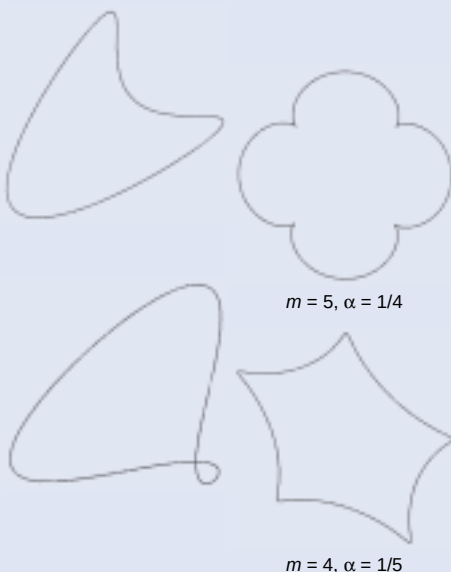
1. Image d'un accord de trois sons purs : do, sol et mi.

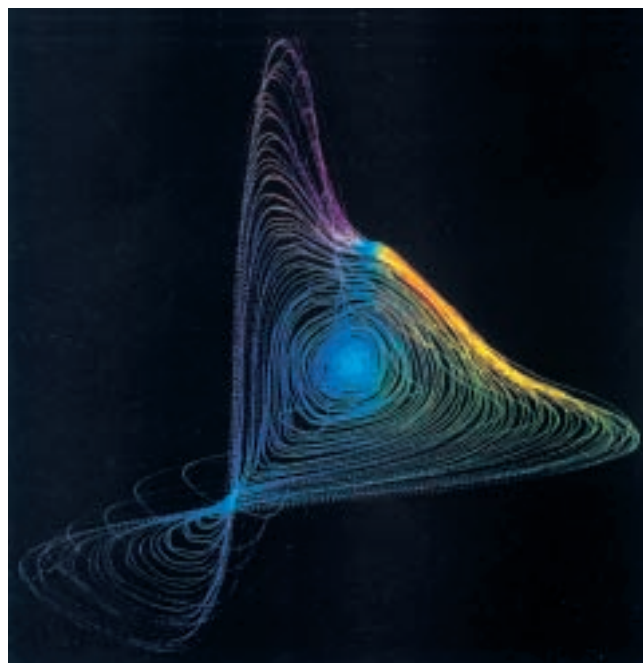
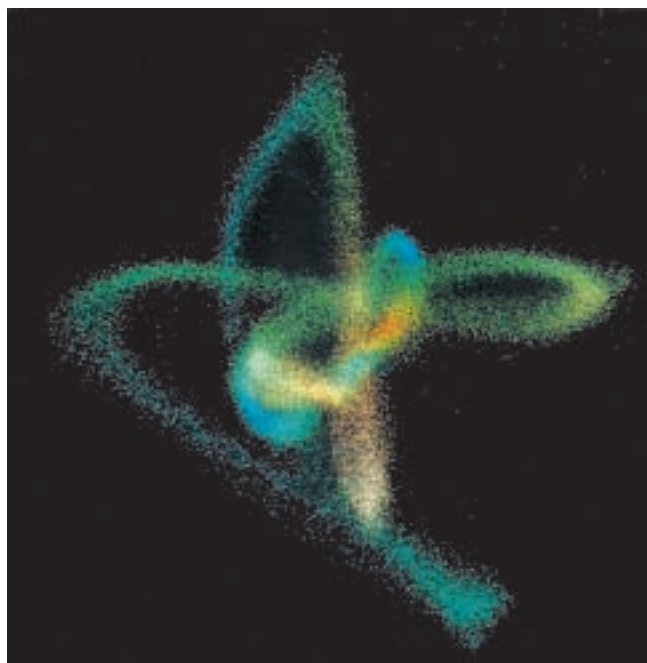
sont espacées d'un quart de période environ, ce qui est optimal.

Pour une oscillation sinusoïdale, l'image ainsi obtenue est une ellipse (lorsque l'écart de temps est exactement d'un quart de période, c'est même un cercle). D'autre part, tout signal périodique peut être décrit comme une somme de sinusoides de fréquences multiples de la fréquence minimale, dite fondamentale. Lorsque la première oscillation harmonique (une octave au-dessus du son fondamental, c'est-à-dire à une fréquence double de celle du fondamental) s'ajoute au fondamental avec une intensité inférieure, l'ellipse se déforme jusqu'à former des nœuds (voir l'encadré ci-contre). Sur l'image, un déphasage entre les deux oscillations apparaît alors qu'il est inaudible. Des harmoniques supérieures engendrent de remarquables motifs en forme de fleurs, lorsque l'on choisit un écart de temps approprié, et un accord à trois notes donne une courbe compliquée (voir la figure 1). Un son de flûte aigu et très fort donne un champ gris avec une structure à peine reconnaissable (voir la figure 3).

Dans quelles conditions les points forment-ils des courbes reconnaissables ? Supposons qu'existe réellement une fonction f qui corresponde à la relation $s_{i+1} = f(s_i)$. Si seule la première valeur s_1 de la suite est fixée, toutes les autres valeurs seraient déterminées par la fonction f : $s_2 = f(s_1)$, $s_3 = f(s_2)$, $s_4 = f(s_3)$, etc. La fonction f est ce que l'on nomme une fonction d'itération, et le système dyna-

Images d'autocorrélation obtenues pour des superpositions d'oscillations sinusoïdales pures. À gauche, les images sont celles que l'on obtient pour une note sinusoïdale pure à laquelle on a ajouté la note à l'octave supérieure, deux fois moins intense ; les deux courbes ne diffèrent que par le déphasage des deux notes. À droite, l'image est celle d'une note sinusoïdale avec plusieurs harmoniques (le nombre m indique le rapport entre les fréquences de l'oscillation harmonique et de l'oscillation de base). Les écarts de temps (α indique l'écart en fraction de période) sont choisis de façon à obtenir une image la plus symétrique possible.



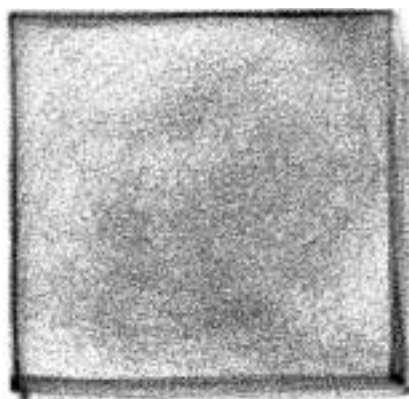


2. Images d'autocorrélation tridimensionnelle d'une note grave de flûte (à gauche) et d'un court morceau de trompette (à droite). La troisième dimension est représentée par la couleur.

mique auquel elle est associée est discontinu, car le temps s'écoule par pas successifs, comme s'il était compté par une montre dont les aiguilles avancent par crans. Quand on porte les couples de valeurs (s_j, s_{j+1}) d'un tel système dynamique dans un système de coordonnées, on obtient une courbe ayant une forme bien définie. Quand on choisit un écart entre les indices, lors de la représentations des points, on obtient encore une courbe, généralement un peu plus compliquée : les points (s_j, s_{j+k}) appartiennent à la courbe de la fonction g , qui est la répétition k fois de la fonction f .

Si un son engendre une courbe, une courbe peut-elle engendrer un son ? En principe non, parce que les sons sont continus, et non discrets. Toutefois les images d'autocorrélation confirment que des suites numériques, telle celle des valeurs d'un son sinusoïdal, se comportent comme si elles étaient issues d'une simple fonction d'itération ; elles aident également à distinguer le hasard pur du chaos déterministe. Dans le premier cas, on obtient un champ gris plus ou moins sans structure ; dans le second, on obtient la courbe associée à une fonction d'itération ou quelque chose d'un peu plus compliqué.

La situation où chaque valeur ne dépend que de celle qui la précède immédiatement est le cas le plus simple d'un système dynamique discret. Dans d'autres cas, la valeur de la fonction dépend des deux dernières valeurs, et l'itération prend la forme $s_{j+1} = f(s_j, s_{j-1})$. Plus généralement, chaque valeur peut dépendre des trois, quatre, cinq... dernières valeurs. On dit alors que le système est de dimen-



3. Image d'une note de flûte très forte avec un écart de temps d'environ un quart de période du son fondamental.

sion 2, 3, 4, 5, etc. La dimension désigne ici, comme dans le langage mathématique courant, le nombre de nombres nécessaires pour décrire intégralement l'état du système considéré. Pour un système bidimensionnel, la définition complète du système impose en outre de disposer la donnée des deux premières valeurs initiales.

ENTRE HASARD ET CHAOS

Pour des fonctions d'itération de dimensions élevées, la représentation des fonctions d'itération est plus difficile qu'à une dimension : une fonction à deux variables nécessite déjà, pour sa représentation graphique, trois coordonnées (et se présente alors comme un paysage vallonné au-dessus d'une surface plane). Pour ne négliger aucune des trois coor-

données, on doit porter les points (s_j, s_{j+1}, s_{j+2}) ou (s_j, s_{j+k}, s_{j+2k}) dans une représentation tridimensionnelle. Les deux dimensions d'une feuille de papier étant un peu justes, G. Monro et J. Pressing représentent la troisième dimension par des couleurs (voir la figure 2).

Ils obtiennent ainsi un résultat surprenant. Même en négligeant la couleur (correspondant à la troisième dimension), l'image n'est pas une surface entière : elle est réduite à une courbe un peu floue ou à un ensemble de courbes séparées par des espaces : la dimension de cet objet semble être supérieure à un, mais inférieure à deux.

Cette première impression s'exprime mathématiquement par un concept de dimension généralisée. À l'Université de Groningen, Floris Takens a montré que ce type d'analyse est applicable à des systèmes dynamiques de toutes sortes. Même quand on ignore combien il faut de variables pour décrire entièrement l'état d'un système, on peut déterminer, par le calcul, la dimension d'un processus quand elle est finie (le chaos est autorisé, mais pas le hasard pur) ; on obtient un nombre qui n'est généralement pas entier et que l'on nomme la «dimension fractale».

Ainsi, en théorie du chaos, les théorèmes abstraits sont complexes, mais les phénomènes fondamentaux deviennent visibles dès que l'on représente une série de mesures d'une façon habile.

Christoph PÖPPE est mathématicien et journaliste à la revue *Spektrum der Wissenschaft*.



Promenade en voiture

ROLAND LEHOUCQ

La physique aide à devenir un meilleur conducteur : nous comprenons mieux les conseils de la sécurité routière, ce qui nous incite à les appliquer.

Durant les vacances d'été, la sécurité routière incite les conducteurs à la prudence et leur prodigue ses habituels conseils de conduite. Parmi ceux-ci, nous en retiendrons trois : rouler en douceur en ayant correctement équilibré le chargement de son véhicule et en tenant compte de l'état de la route. Ces excellents conseils sont compris avec la loupe du physicien.

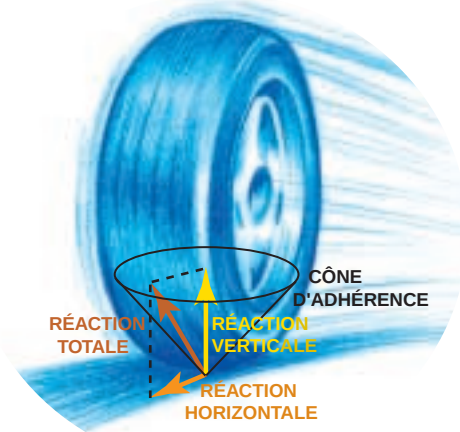
À l'arrêt, la résultante des forces qui s'appliquent à une voiture est nulle, car celle-ci est en équilibre. Ces forces sont le poids, dirigé vers le sol et appliqué au centre de gravité du véhicule, et la réaction de la route, dirigée vers le haut et appliquée aux points de contacts entre les pneus et le sol. Lorsque le poids est uniformément réparti, la réaction subie par le train avant, égale à celle qui est subie par le train arrière, est la moitié du poids total du véhicule. Les voitures de tourisme ne sont pas équilibrées de manière symétrique : la position du moteur fait que le train avant supporte 60 pour cent de la masse du véhicule. Cette asymétrie influence la tenue de route du véhicule en mouvement.

Démarrons. La réaction de la route sur les roues va-t-elle rester verticale ? Non, car les roues en rotation exercent une force horizontale sur la route qui, en vertu du principe de l'action et de la réaction, doit se traduire par une réaction horizontale du sol sur les roues. Cette réaction horizontale est bien sûr dirigée vers l'avant quand la voiture avance. La

réaction horizontale est toujours inférieure au produit de la réaction verticale, qui compense le poids du véhicule, par un coefficient d'adhérence, qui quantifie la qualité du contact entre les roues et le sol. Si l'égalité est vérifiée, le véhicule glisse sur la route. Autrement dit, pour éviter le glissement, la direction de la réaction totale doit rester à l'intérieur d'un cône d'adhérence (voir la figure ci-contre).

Pour estimer ce coefficient d'adhérence, poussons une voiture dont les roues sont bloquées. Tant que la poussée est insuffisante, il ne se passe rien ; puis, au-delà d'un seuil de poussée, la voiture commence à glisser. Ce glissement s'amorce dès que les forces de contact horizontales entre les pneus et le sol ne compensent plus la poussée. Le quotient entre la force nécessaire à l'amorçage du glissement et le poids de la voiture est le coefficient d'adhérence des pneus sur le sol. Sur sol sec, il vaut environ 0,9 pour des pneus courants et dépend de nombreux paramètres comme la composition et l'usure du pneu, la qualité du sol, la température, l'état des suspensions ou la pression de gonflage.

Ainsi, il faut exercer une poussée horizontale supérieure à 810 kilogrammes pour faire glisser sur un sol sec une voiture de 900 kilogrammes (que nous prendrons comme référence dans la suite). Sur un revêtement très glissant, comme la glace, le coefficient d'adhérence est inférieur et la force minimale à exercer est plus faible, presque nulle. Quand on



pousse une voiture libre de rouler (freins desserrés et désembrayée), la poussée nécessaire pour la mouvoir est plus faible, car il n'est plus nécessaire d'atteindre un seuil de glissement.

DÉMARRAGE EN DOUCEUR

Le conducteur engage la première vitesse et, en embrayant, transmet la rotation du moteur aux roues. Comme celles-ci ne tournent pas à la même fréquence que le moteur, laquelle est de quelques milliers de tours par minute en vitesse de croisière, on interpose entre l'arbre moteur et l'axe des roues un système de pignons réducteurs (boîte de vitesse, dispositif de transmission, etc.). En première, la réduction totale varie entre 0,06 et 0,08 pour une voiture courante. Ainsi, les roues effectuent de 60 à 80 tours par minute quand le régime du moteur est de 1 000 tours par minute. Pour des roues de 60 centimètres de diamètre, cela représente une vitesse, en première, comprise entre 6,8 et 9 kilomètres par heure.

La puissance fournie par le moteur est essentiellement utilisée pour propulser le véhicule, mais une fraction est dissipée par les frottements mécaniques et aérodynamiques. Le moteur exerce un couple de rotation proportionnel au quotient de la puissance fournie et du régime du moteur (sa

