

LES DIMENSIONS DANS LA PERCEPTION DES INTERVALLES MUSICAUX *

W.J.M. LEVELT et R. PLOMP

(Institute for Perception R.V.O.-T.N.O., SOESTERBERG, PAYS-BAS)

Introduction

Il est intéressant de savoir de quelle manière des sujets classent dans des catégories les différents accords de deux sons, quelles caractéristiques de ces accords sont en général perçues par le sujet, autrement dit quels sont les traits « physiques » spontanément utilisés par eux pour les différencier, ou, si l'on préfère ce terme, pour les « coder ».

Nous avons précédemment traité ce problème en présentant des accords de deux sons à des sujets et en leur demandant de les juger au moyen d'un jeu d'échelles sémantiques selon la technique du différentiel sémantique d'Osgood. L'analyse factorielle fournit ensuite les principales dimensions de cet espace de jugement (1). Bien sûr nous y avons trouvé une dimension principale « d'évaluation » distinguant les accords agréables et désagréables. C'est dans cette dimension que l'échelle « consonant-dissonant » a révélé une saturation importante, et nous en avons conclu que nos sujets naïfs utilisaient le terme consonant comme une catégorie appréciative. Il fut plus difficile de préciser les déterminants physiques de cette évaluation. De nouvelles expériences que je vais décrire dans un instant, ont donné une vue plus directe sur ce point. Une autre dimension, dans cette première analyse, parut reliée à la grandeur de l'intervalle : nous l'appelons « fusion ».

Cependant, les techniques verbales de jugement ont des inconvénients. Le sujet est obligé d'utiliser une catégorie qu'il n'emploierait pas spontanément ou qui ne lui semble pas pertinente. Nous avons donc cherché à utiliser une technique non-verbale. La plus élégante nous a paru être une technique de comparaisons triadiques.

Comparaisons triadiques des intervalles musicaux.

Procédure expérimentale.

Le sujet dispose de trois boutons-poussoirs, chacun d'eux correspondant à un accord de deux sons. Sa tâche est de choisir parmi eux

* Cette étude a été réalisée avec le soutien de l'Organisation Néerlandaise pour le Développement de la Recherche Scientifique (Z.W.O.).

les deux qui sont le plus semblables l'un à l'autre et les deux qui sont le plus dissemblables. Ce mode de jugement paraît aisé pour le sujet, mais crée quantité de difficultés pour l'expérimentateur. La première concerne le jeu de triades à utiliser, la seconde le mode d'analyse.

TABLEAU I

| <i>Proportion</i> | <i>Fréquences en Hz.</i> | <i>Distance en Hz.</i> |
|-------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 : 2 | 333 : 666 | 333 |
| 2 : 3 | 400 : 600 | 200 |
| 3 : 4 | 429 : 572 | 143 |
| 2 : 5 | 286 : 715 | 429 |
| 3 : 5 | 375 : 625 | 250 |
| 4 : 5 | 444 : 555 | 111 |
| 5 : 6 | 455 : 546 | 91 |
| 4 : 7 | 364 : 637 | 263 |
| 5 : 7 | 415 : 581 | 166 |
| 5 : 8 | 385 : 616 | 231 |
| 4 : 9 | 308 : 693 | 385 |
| 8 : 9 | 472 : 531 | 59 |
| 11 : 12 | 473 : 516 | 43 |
| 8 : 15 | 344 : 645 | 301 |
| 15 : 16 | 480 : 512 | 32 |

Nous avons un ensemble de 15 accords, c'est-à-dire 15 stimuli (Tableau I). Cependant, pour une expérience complète, le sujet devait juger 455 triades, ce qui était une tâche impossible. Pour éviter ceci nous avons utilisé une procédure dite « incomplète », dans laquelle un sujet devait juger seulement 35 triades, les sujets se complétant les uns les autres. Nous n'entrerons pas dans ces détails techniques dont le reste sera publié par ailleurs (2).

Quant au mode d'analyse, après l'exécution de l'expérience il fallait trouver une technique d'échelle multidimensionnelle. Une technique de ce genre a été développée récemment par le Dr Kruskal des Bell Telephone Laboratories (3). Tandis que dans d'autres techniques les fréquences relatives de jugements de similarité entre stimuli sont transformées en distances spatiales par une transformation en notes normalisées (z), la technique de Kruskal est indépendante de toute hypothèse de probabilité. Elle utilise seulement l'ordre des rangs des fréquences relatives sans donner de signification à leurs valeurs absolues. Le Dr Kruskal a eu la bienveillance de nous envoyer son programme de calcul, mais ce n'est que récemment que les résultats expérimentaux ont pu être manipulés. On trouvera donc ici seulement quelques considérations préliminaires sur les résultats. (L'analyse définitive est conçue en (2).)

Stimuli.

Nous avons réalisé deux expériences. Dans la première, les 15 stimuli du Tableau I étaient des intervalles composés de sons simples (sinusoïdaux); c'est l'expérience des sons simples. Dans la seconde expérience, les mêmes 15 stimuli ont été utilisés, mais ils étaient composés de sons complexes. Chaque son résonnait avec tous ses partiels, chacun d'eux ayant la même énergie. On a filtré les partiels au-delà de 4.000 Hz. C'est l'expérience des sons complexes. Chacun des stimuli avait une fréquence de 500 Hz, de sorte qu'ils semblaient tous avoir la même hauteur moyenne. La pression sonore avait un niveau de 60-70 dB.

Résultats.

Une partie des résultats de nos analyses est donnée dans le Tableau II. Ce tableau fournit les saturations des 15 stimuli en trois dimensions orthogonales, à gauche pour l'expérience des sons simples, à droite pour celle des sons complexes. La position des axes aussi bien que l'unité de mesure sont arbitraires. Les deux configurations montrent des différences caractéristiques. Pour les besoins de cet exposé, nous considérerons seulement une différence typique, importante pour l'étude de

TABLEAU II

Projection des 15 stimuli en trois dimensions
(KRUSKAL's MDSCAL-program)

| | Tons simples (S) | | | Tons complexes (C) | | |
|---------|------------------|--------|--------|--------------------|-------|-------|
| | I | II | III | I | II | III |
| 1 : 2 | -.734 | .096 | -.731 | -1.261 | -.234 | -.122 |
| 2 : 3 | .714 | .596 | .032 | -.857 | .223 | .620 |
| 3 : 4 | -.292 | .088 | .900 | -.394 | -.358 | .652 |
| 2 : 5 | .041 | .133 | -1.105 | -.924 | .453 | -.364 |
| 3 : 5 | .061 | .848 | -.045 | -.098 | .607 | .418 |
| 4 : 5 | -.314 | -.389 | .630 | .168 | -.658 | .471 |
| 5 : 6 | .246 | -.486 | .701 | .520 | -.400 | .346 |
| 4 : 7 | -.365 | .692 | -.075 | .364 | .738 | -.092 |
| 5 : 7 | .118 | .266 | .923 | .459 | -.142 | .972 |
| 5 : 8 | .460 | .745 | .272 | .387 | .578 | .539 |
| 4 : 9 | -.496 | .042 | -1.089 | -.099 | .943 | -.517 |
| 8 : 9 | .458 | -.839 | .223 | .469 | -.702 | -.404 |
| 11 : 12 | .382 | -1.111 | -.160 | .435 | -.623 | -.954 |
| 8 : 15 | -.868 | .396 | -.328 | .585 | .368 | -.641 |
| 15 : 16 | .590 | -1.077 | -.149 | .146 | -.793 | -.923 |

la consonance musicale. La consonance d'un intervalle a toujours été attribuée à la simplicité du rapport des fréquences qui le composent. Cependant une question de fait se pose : un sujet utilise-t-il la complexité de ce rapport comme un moyen de codage dans la perception des intervalles musicaux ? Mathématiquement cette question revient à se demander si nous pouvons trouver dans l'espace des stimuli un axe sur lequel les projections des stimuli sont ordonnées selon la complexité de ces stimuli. Autrement dit : ayant un espace unidimensionnel c , dans lequel les 15 stimuli ont des valeurs selon leur complexité, nous essayons d'améliorer la covariance de c et l'espace tri-dimensionnel du stimulus S , par une rotation de c en S . En fait ceci est un problème d'algèbre matricielle dont le Professeur Van de Geer a trouvé la solution générale (4). Ceci également sera publié par ailleurs (2). Il nous suffit ici de donner pour chaque solution les coefficients de direction de l'axe à rotation optimale dans l'espace du stimulus.

La complexité du rapport de fréquences est plus convenablement définie par le nombre le plus élevé du rapport (ainsi, par exemple, 2 pour l'octave, 3 pour la quinte, 5 pour la tierce majeure, etc.). Ce n'est pas là la définition la plus évidente, mais pour le moment nous nous y tenons et l'appellerons complexité I . A cause de la distribution oblique de ces nombres (qui est un inconvénient pour l'analyse optimale) nous avons utilisé dans notre analyse les mesures logarithmiques des complexités.

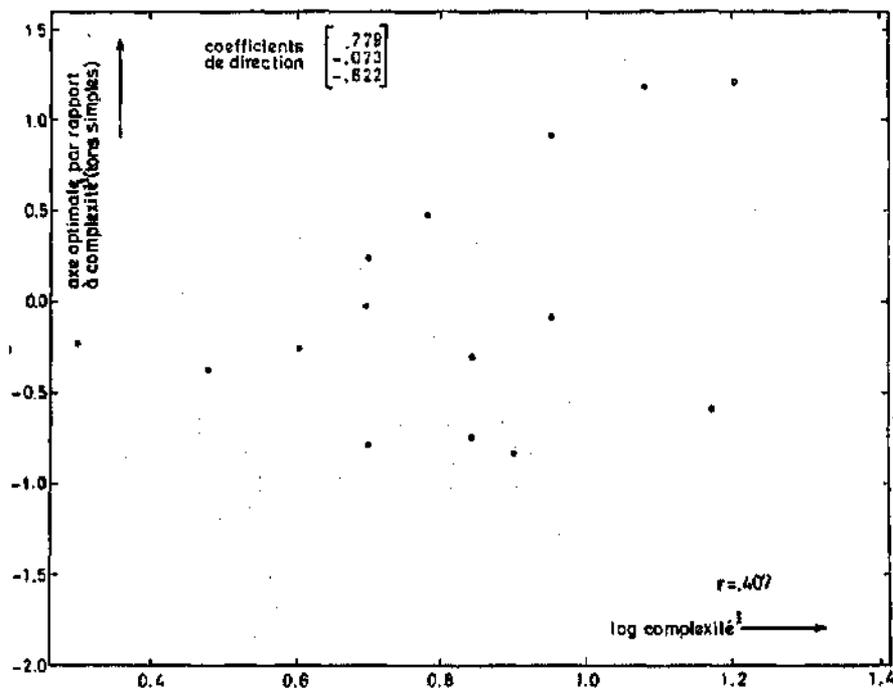


Figure 1. — Relation entre l'axe optimal de complexité dans l'espace des sons simples et la complexité I des rapports de fréquences.

Nous avons calculé d'abord l'axe optimal de complexité dans l'espace des sons simples. La Fig. 1 représente le résultat de cette analyse. Cet axe optimal est représenté par les coordonnées verticales, les coordon-

nées horizontales représentent les logarithmes de la complexité I. Il est immédiatement évident à la vue de cette figure que les sujets ne distinguent pas les accords de deux sons simples selon la complexité de leurs rapports de fréquences. Un des principaux moyens de les différencier paraît être la grandeur de l'intervalle. Ceci est clair dans la Fig. 2. La grandeur de l'intervalle est définie par la distance en cycles

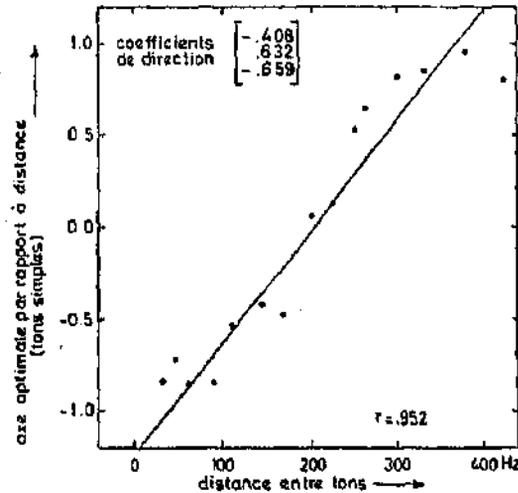


Figure 2. — Relation entre l'axe optimal de distance dans l'espace des sons simples et la largeur des intervalles (distance en Hz).

par seconde entre les deux sons de l'intervalle. L'axe vertical représente l'axe optimal des distances dans l'espace des sons simples, tandis que l'axe horizontal représente la grandeur des intervalles. Cette relation paraît bien établie. On en conclut que dans des accords de deux sons simples les sujets entendent la grandeur de l'intervalle mais non la complexité du rapport de fréquences.

Voyons maintenant ce qu'il en est des accords de deux sons complexes. Le calcul de l'axe optimal de complexité dans cet espace donne le résultat représenté dans la Fig. 3. Ici une relation claire semble exister entre l'axe optimal de complexité et les logarithmes de la complexité I des 15 stimuli. Apparemment les sujets différencient les intervalles de sons complexes selon la complexité de leur rapport de fréquences. Nous en concluons que la perception de la complexité dépend de la présence d'harmoniques. Il ne semble pas y avoir de sensation inhérente à la simplicité du rapport de fréquences. Le jugement de complexité et de simplicité est dû à des indices rattachés à la structure des harmoniques.

Interférence.

Dans une communication faite au V^e Congrès International d'Esthétique (5), nous avons appelé ces indices « interférences ». Dans les expériences de psychophysique il est possible de montrer que deux sons simples produisent des interférences physiologiques lorsqu'ils sont sé-

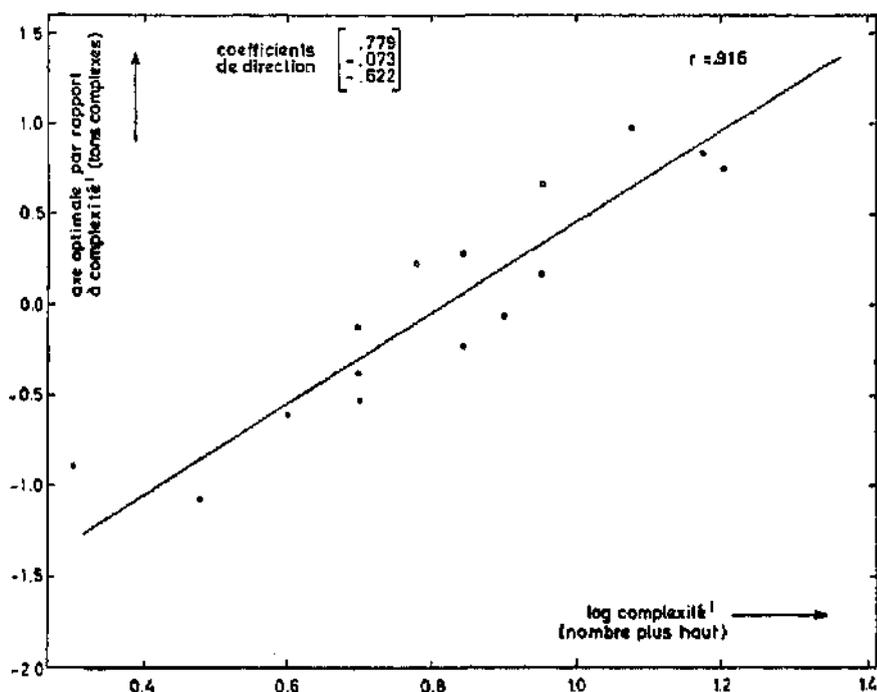


Figure 3. — Relation entre l'axe optimal de complexité dans l'espace des sons complexes et la complexité I des rapports de fréquences.

parés par une distance moindre qu'une distance critique appelée la bande critique. A l'inférieur de cette bande on peut démontrer qu'il y a une sommation des énergies stimulatrices et aussi d'autres effets d'interaction sonore. Ces effets sont absents lorsque les sons sont séparés par une distance supérieure à la bande critique. Mais la largeur de cette bande, loin d'être constante est fonction de la fréquence moyenne, comme nous allons le montrer tout à l'heure.

Nous pouvons montrer que pour les paires de sons simples le degré d'interférence, mesuré par exemple par le jugement de dissonance d'un sujet, est fonction du degré selon lequel les sons entrent dans leur bande critique. Un exemple en est donné à la Fig. 4. Cette figure représente les moyennes et les lignes de 25 et 75 % des jugements de consonance sur des échelles en 7 point faits par 14 sujets, en fonction de la largeur de l'intervalle. Seuls des intervalles de sons simples ont été utilisés, d'une fréquence moyenne de 500 Hz. La ligne pointillée verticale représente la largeur de la bande critique pour une fréquence moyenne de 500 Hz. L'échelle de consonance dans sa totalité est parcourue à peu près entre 25 et 100 % de la largeur de la bande critique. Ceci est aussi vrai pour d'autres fréquences moyennes pour lesquelles la largeur de la bande critique peut être différente (6). L'existence des bandes critiques n'est pas due à des processus centraux, mais à des processus siégeant dans l'organe périphérique de l'ouïe. Il n'est donc pas surprenant que ce soit aussi le cas de l'interférence. Pour des sons simples, une seconde mineure est beaucoup plus dissonante qu'une septième majeure. Mais ces intervalles sont estimés également consonants lorsque l'un des sons est présenté à une oreille et l'autre à une autre oreille (4). L'interférence n'est alors plus possible.

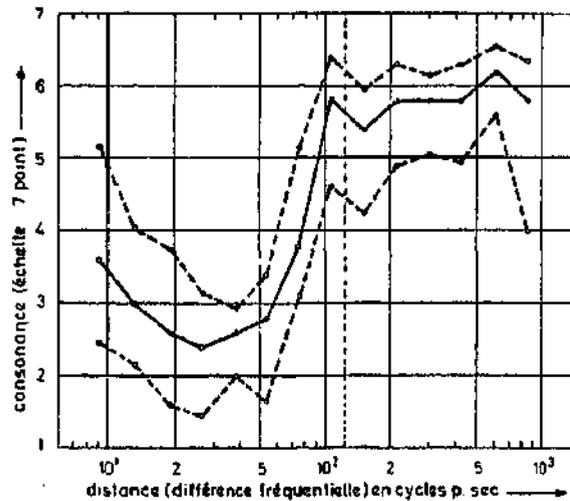


Figure 4. — Relation entre le degré de consonance de paires de sons simples et la largeur des intervalles. Tous les accords de deux sons ont une fréquence moyenne de 500 Hz. La courbe pointillée verticale représente la largeur de la bande critique pour 500 Hz.

Il ressort clairement de ces considérations que pour des paires de sons complexes l'interférence ne coïncide pas avec la largeur de l'intervalle, comme dans le cas des paires de sons simples, mais approximativement avec la complexité du rapport des fréquences défini plus haut. Car l'interférence ne dépend pas seulement alors de la distance entre les sons fondamentaux, mais aussi de la distance entre harmoniques. Des rapports simples donneront des coïncidences d'harmoniques, et par suite une réduction du nombre de petites distances interférentes. Ainsi nous pouvons employer alors une autre mesure de la complexité, c'est-à-dire la fréquence du premier partiel commun des deux sons fondamentaux. Comme les autres harmoniques communs ont des fréquences qui sont des multiples du premier, leur fréquence mesure la densité de coïncidence des harmoniques dans l'échelle des harmoniques. Ceci est une mesure plus compréhensible de la complexité — nous l'appelons complexité II — mais elle est fortement corrélée avec la complexité I. La Fig. 5 montre la relation entre les logarithmes de la complexité II et l'axe optimal correspondant dans l'espace des sons complexes.

Analyse des interférences musicales.

Si l'interférence est une dimension importante dans la perception des intervalles musicaux, on doit s'attendre qu'un compositeur de musique tienne compte, entre autres choses, du degré d'interférence qu'il introduit dans sa composition. Nous avons vu que l'écart entre l'interférence minimum et l'interférence maximum correspond à la distance comprise entre la largeur de la bande critique totale et un quart de cette largeur. Dans cet écart restreint de petits changements de la largeur des intervalles correspondent à de grands changements d'interférence. Ceci donne au compositeur un éventail intéressant de possibilités à utiliser. Il est possible d'analyser des compositions de ce point de vue. De plus,

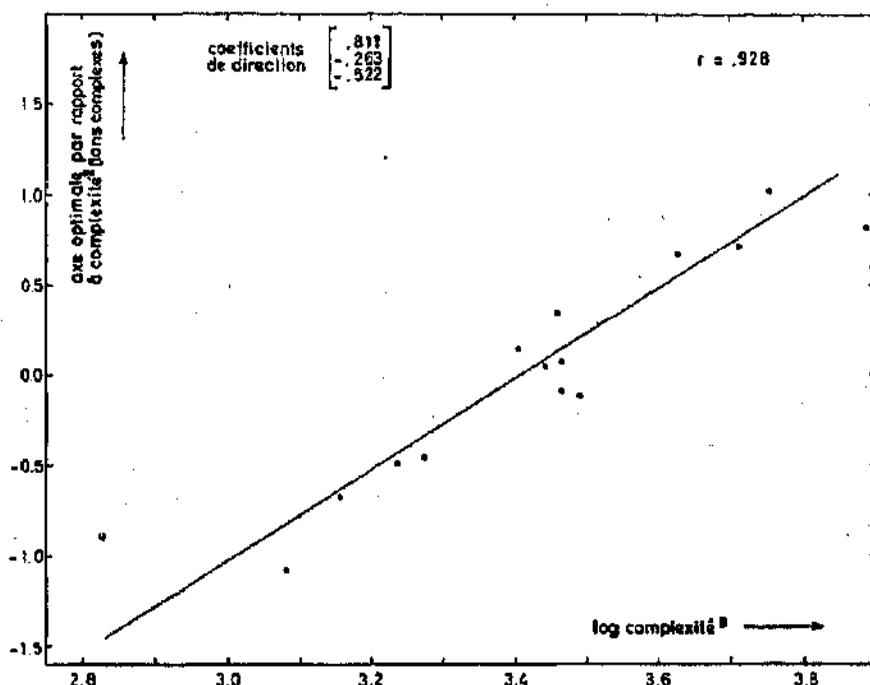


Figure 5 — Relation entre l'axe optimal de complexité dans l'espace des sons complexes et la complexité II (fréquence du premier partiel commun).

nous avons vu que la largeur de la bande critique est fonction de la fréquence moyenne des intervalles. Elle est plutôt constante jusqu'à 500 Hz (autour de 100 Hz), et augmente au-delà de 500 Hz presque proportionnellement à la fréquence moyenne. Si l'interférence joue un rôle important en musique, nous devons trouver une relation quelconque avec la bande critique en faisant des analyses musicales.

Il est clair que nous ne sommes pas ici concernés par la succession des accords, mais nous devons considérer seulement la « dimension verticale » de sons résonnant simultanément. Nous obtenons quelque idée de cette dimension verticale en cherchant la distribution de la densité de sons simultanés en fonction de la fréquence. C'est là une approche statistique; elle ne nous donne pas d'information sur l'apparition des accords spécifiques, mais seulement les fréquences d'apparition des différentes combinaisons sonores.

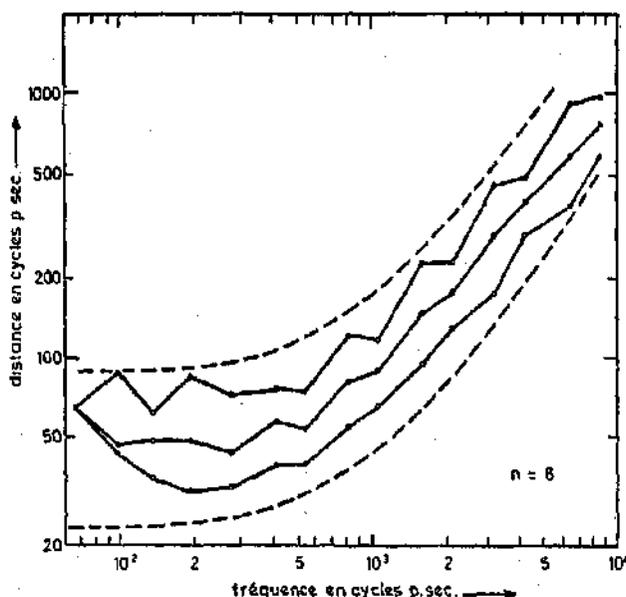
Une illustration peut expliquer comment ces analyses furent faites. Supposons que nous nous intéressons à la distribution de la densité des intervalles ayant pour son grave ut_2 (523,3 Hz). Nous prélevons alors dans une composition musicale tous les accords contenant ut_2 et un son plus aigu. Nous déterminons ensuite la fraction de temps pendant lequel le son aigu le plus proche est séparé de ut_2 par une distance d'un demi-ton, deux, trois demi-tons, etc. Il apparaît alors que la distance d'un demi-ton et celle de 15 demi-tons sont rares, tandis qu'une distance de 4 demi-tons est plutôt fréquente. De cette distribution des densités nous pouvons calculer la médiane (50 %) et les points correspondant à 25 et à 75 % respectivement. Ces mesures donnent une bonne impression des grandeurs des intervalles ayant ut_2 comme son grave.

Bien entendu nous ne nous intéressons pas seulement à ut_2 , mais nous

devons répéter cette procédure pour tous les autres sons du morceau de musique. Les points médians (50 %) de ces analyses peuvent être reliés par un trait le long de l'écart des fréquences et nous pouvons tracer également les lignes des 25 et 75 %.

Il y a cependant une difficulté. Une note écrite n'est pas la seule à se faire entendre. Nous devons tenir compte également des harmoniques. Pour cette raison le morceau de musique est, pour ainsi dire, écrit à nouveau, mais à présent avec un certain nombre d'harmoniques ajoutés à chaque son. « Pour ainsi dire » seulement, car nous pouvons faire toute l'analyse pour un nombre limitable d'harmoniques à l'aide d'un appareil à bande perforée spécialement construit, dans lequel la musique peut être jouée au moyen d'un clavier.

Jusqu'à présent deux morceaux ont été analysés de cette manière (6), tandis qu'un certain nombre d'analyses ont été faites auparavant à la main (7). Ces analyses portent sur de la musique de Schütz, J.S. Bach, Dvorak et Krenek. Les résultats pour ces compositeurs sont essentiellement les mêmes. Un exemple en est donné à la Fig. 6 : une analyse de la troisième partie du quatuor à cordes en mi bémol, op. 51 de Dvorak.



Figures 6. — Distribution de la densité des distances entre des sons simultanés (y compris les harmoniques) en fonction de la fréquence (courbes des 25, 50 et 75 %). Quatuor à cordes en Mi bémol, op. 51 de Dvorak. Les courbes pointillées supérieure et inférieure représentent respectivement les fonctions 100 et 25 % de la bande critique.

La courbe supérieure en pointillés représente la fonction de la largeur de la bande critique, la courbe inférieure en pointillés, celle des 25 % de cette bande critique. Les lignes pleines sont les courbes des 25, 50 et 75 % pour ce morceau, l'analyse ayant été faite pour 8 harmoniques de chaque son, ce qui est une estimation raisonnable du nombre d'harmoniques produits par des cordes.

Il ressort clairement de cette figure que la musique « module » entre 25 et 100 % de la bande critique, c'est-à-dire entre les limites du maximum et du minimum d'interférence. De plus les courbes sont exactement parallèles à la fonction de la largeur de bande critique, ce qui démontre l'importance de cette fonction en musique.

Finalement on peut remarquer que la forme de cette courbe n'est pas entièrement due au choix conscient du compositeur. Notre système à 12 demi-tons, tel qu'il a évolué au cours des siècles, fournit un certain nombre de moyens de protection contre les déviations trop larges à l'égard de la règle de la bande critique. Il est intéressant d'observer qu'en fait une évolution culturelle lente se produit en interaction avec la structure de la perception humaine.

BIBLIOGRAPHIE

1. VAN DE GEER (J.P.), LEVELT (W.J.M.) & PLOMP (R.), The connotation of musical intervals. *Acta Psychol.*, 1962, 20, 308-319.
2. LEVELT (W.J.M.), VAN DE GEER (J.P.) & PLOMP (R.), Triadic comparisons of musical intervals. *Brit. J. Math. Psychol.* (sous presse).
3. KRUSKAL (J.B.), Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika*, 1964, 29, 1-27.
4. VAN DE GEER (J.P.), Communication personnelle.
5. LEVELT (W.J.M.) & PLOMP (R.), The appreciation of musical intervals. *Actes V^e Congrès Intern. d'Esthétique*, Amsterdam, 1964.
6. PLOMP (R.) & LEVELT (W.J.M.), Tonal consonance and critical bandwidth. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1965, 38, 548-560.
7. PLOMP (R.) & LEVELT (W.J.M.), Musical consonance and critical bandwidth. *Proc. Fourth Intern. Congress on Acoustics*, Copenhagen, 1962.

DISCUSSION

Pr. Wellek. — Quelle est la relation entre la complexité et la fréquence ?

Dr. Levelt. — J'ai défini deux mesures de complexité qui dépendent de la relation de fréquence et tout cela dépend de la théorie de l'interférence. Selon cette théorie, des mesures exactes importent peu puisque la consonance pour une petite distance et pour une grande distance est la même. Mais il est important d'avoir leur relation.

Pr. Wellek. — Cela confirme la découverte du phénomène du seuil. Selon cette théorie, ce n'est pas la relation exacte 1 à 2 et à 3 ou 2 à 3 qui compte, mais la relation autour de ces chiffres. Il y a un problème d'ordre phénoménologique en ce qui concerne le procédé scientifique ou non informé. Les interférences acoustiques de 100 à 200 cycles par seconde ne donnent pas les meilleurs résultats. Les meilleurs

résultats sont donnés là où la courbe devient plus aiguë, donc ce qui est important c'est que ce soit plus aigu et non pas plus correct mathématiquement. J'ai fait des expériences de cet ordre sur les différents types d'audition et j'ai trouvé qu'il y a des intervalles de distance et des intervalles consécutifs. Il s'agit en somme d'intervalles simultanés et d'intervalles consécutifs, qualités d'intervalles qui ont été découvertes par Abraham. Les relations phoniques (Tonigkeiten) permettent une orientation de chacun de ces types.

Dr. Levell. — Mon problème expérimental a été plutôt de trouver une manière directe et naturelle de classification de ce genre de tons. J'ai indiqué au sujet d'utiliser l'une ou l'autre de ces catégories.