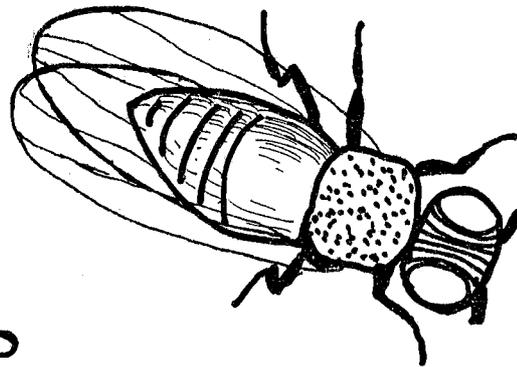


BENNET-CLARK

LE CHANT DES INSECTES



E. LEIPP

FORMES et COULEURS
DES CHANTS
d'INSECTES



n° 91

Avril 1977

GAM

BULLETIN du GROUPE d'ACOUSTIQUE MUSICALE
Université de PARIS VI Tour 66 4 Pl. Jussieu PARIS 5°

Paris, 24 Avril 1977

91° Réunion du G.A.M.

Thème : LE CHANT DES INSECTES

Exposés de BENETT-CLARK (Oxford Univ.)
et de E. LEIPP.

M. le Prof. SIESTRUNCK n'a pu être des nôtres ayant des obligations professionnels.
M. le Prof. GAUTHIER de même, pour raison de santé.

Etaient présents :

M. J.J. BERNARD, Directeur de l'U.E.R. de Mécanique,
M. LEIPP, Secrétaire général; Melle CASTELLENGO, secrétaire.

Puis, par ordre d'arrivée :

Mme LEIPP; Melle Y. LEROY (Dir. Adj. EPHE); M. ANTONY (étudiant); M. GENET-VARCIN (chimiste, spécialiste des carillons); Mme GENET-VARCIN; Mme GERVEIX (orthophoniste); Melle Sylvie HUE (Prof. Educ. Musicale); Mme Nelly CARON; M. POSSOMPES (Prof. biologie); M. MULLETIN (Maître assistant Paris VII); Mme MULLETIN; Mme D. JOURDAN-HEMMERDINGER (CR Musicologie CNRS); M. LE CAIGNE-GAYRIN (professeur); M. DUPREY (architecte); M. GUERDOUX (Prof.); M. DEMARS (Prof. Mathématiques); M. PASQUET; M. TERSAC (CGM, CNRS); M. J. BARDEZ (Prof. Musique); Mme J. BARDEZ; M. C. CEON (Preneur de son, Bruxelles); Mme BOREL-MAISONNY (orthophoniste); M. O. LACROIX; Mme DECHARIAUX (technicienne); Mme KADRI (médecin); M. SAPALY (Prof. Mécanique); M. CHABREL (ingénieur informatique); Mme Maria LAGUIER (comédienne, musicienne); M. BAZANTE (Mécanique); M. J.B. VAL (Maître assistant - Univ. Paris VII); M. BARJON (flûtiste); M. MAS (Artiste peintre); Melle D. RAIZELSON; M. FRIDMANN (Maître-Assistant Université Paris VI); M. CARRE (Prof.); M. CORDEAU (Prof.); M. GATIGNOL (Maître-assistant Mécanique Paris VI); Melle DINVILLE (orthophoniste); Mme CLAULY-VAL (Maître assistant); M. BAL; M. BAERD (ingénieur ONERA); M. ISACAS (Chercheur CNRS); Dr POUBLAN (médecin biologiste); Mme POUBLAN (Professeur); M. C. BRIGUET (Ingénieur du son); Dr CLAVIE.

Etaient excusés : M. Ch. MAILLOT (Lyon-Nice); M. J. CHAILLEY; Mme BRAN-RICCI; M. CONDA-MINES; Dr DORGUEILLE; M. JOSSERAND (Toulouse); M. VERDIE; M. LEGROS; M. CHENAUD; M. MOUSSEAU; M. LEHMANN; M. BATAISSIER; M. FRANCOIS (prés. GALF); M. JOUHANNEAU; M. LARACINE; M. GEUENS; Mme FULIN; Mme J. GALMICHE; Mme WEULERESSE; M. RONDELEUX.

PERIODIQUE : 6 numéros annuels

Imprimeur : Laboratoire de Mécanique Physique de l'Université de PARIS VI

Directeur de la publication : M. le Professeur R. SIESTRUNCK

N° d'inscription à la Commission Paritaire : N° 819 ADEP

Prix de l'abonnement annuel : 60,00 F (6 à 7 numéros)

Prix du numéro : 16,00 F

PROBLEMES D'ACOUSTIQUE CHEZ DES INSECTES
DE DIFFERENTES TAILLES

par H.C. BENNET-CLARK

INTRODUCTION

Des insectes de toutes tailles chantent, depuis de minuscules mouches jusqu'aux plus grosses sauterelles et aux plus volumineux coléoptères.

Dans la présente étude, on envisage l'émission sonore comme une perturbation de l'air qui entoure l'insecte émetteur et qui se propage de cet individu vers un autre.

Comme les plus petits insectes peuvent n'avoir qu'un millimètre de long et un poids inférieur à un milligramme, leur puissance musculaire ne peut être que très petite. Parmi les plus gros insectes, certains pèsent plusieurs grammes et peuvent atteindre 5 à 10 cm de long. La bande de fréquence couverte par le chant des insectes est très étendue, depuis les bourdonnements de quelques centaines de Hertz jusqu'aux stridulations dont la fréquence porteuse peut être de 5, 10, voire même 50 kiloHertz. En raison de ces diversités, le chant des insectes présente toutes sortes de problèmes acoustiques.

PROPRIETES ACOUSTIQUES DES TRANSDUCTEURS

On peut considérer la puissance acoustique en des termes similaires à ceux de la puissance électrique. Là où la puissance électrique est le produit de la tension par le débit, la puissance acoustique est le produit de la pression sonore (p) (l'équivalent du voltage) par la vitesse des particules (u) (l'analogue du débit). La puissance dans une onde sonore est alors donnée par la formule :

$$\text{Puissance} = p \times u = \frac{p^2}{c} = u^2 c$$

où c est la résistance acoustique spécifique du milieu, l'analogue de la résistance électrique.

Quand on considère une source sonore, sa charge acoustique dépend de deux facteurs : le rayon de la source en fonction de la longueur d'onde du son, et le degré d'isolement entre les deux faces de la source. En général, si le diamètre de la source excède $1/3$ de la longueur d'onde, sa résistance acoustique peut égaler celle de l'air et il y a rayonnement effectif. Si le diamètre de la source est nettement plus grand que la longueur d'onde, le rayonnement de la source est d'autant plus petit qu'augmente sa taille. Avec les petites sources, la situation se complique et dépend du type de générateur.

Avec un générateur de type " piston " vibrant dans un baffle, et si la source est petite, le rayonnement n'est pas directionnel, et la pression sonore est constante dans une zone hémisphérique autour de la source. La résistance de rayonnement décroît comme le carré du diamètre (si celui-ci est inférieur au $1/3$ de la longueur d'onde) et ainsi une source dont le diamètre est $1/30$ de la longueur d'onde peut rayonner $1/100$ aussi bien qu'une source de taille optimale.

En pratique, cela signifie que le diamètre des transducteurs efficaces doit approcher de la longueur d'onde du son, de ce fait, les plus gros insectes avec des ailes de 2 cm de l'arête (ou plus) peuvent chanter à des fréquences voisines de 5 KHz où la longueur d'onde est de 6 cm; mais ceux qui sont plus petits ne peuvent chanter fort qu'à des fréquences plus élevées.

Si la source consiste simplement en un piston vibrant librement dans l'air, il peut y avoir une interférence très destructrice entre le rayonnement d'une face et celui de l'autre, qui est en opposition de phase. L'effet de l'interférence devient d'autant plus grand que la source devient plus petite et, en dessous d'un diamètre de $1/3$ de la longueur d'onde, la résistance du rayonnement diminue comme la puissance quatrième du diamètre. De telles sources sont très inefficaces dans ces conditions parce que la pression sonore est maximale le long de l'axe de vibration, et nulle perpendiculairement à lui; le rayonnement de la source est bidirectionnel, en forme de "8" selon l'axe de vibration. Un tel type de source, en raison de l'interférence entre les deux faces est communément assimilée à une membrane libre. Les ailes d'insectes en vol tendent à se comporter comme des sources doubles et le rayonnement autour d'elles est directionnel.

Dans une onde sonore éloignée de la source, la vitesse des particules et la pression sonore sont en phase. Pour une distance inférieure à environ $1/6$ de la longueur d'onde, la source détermine une résistance et, comme dans une résistance électrique, le courant, ou la vitesse des particules, augmente avec l'impédance de la source. Avec une source ponctuelle, une source dans un baffle, la pression sonore est inversement proportionnelle à la distance pour toutes les longueurs d'onde, mais la vitesse des particules varie fortement et de façon inversement proportionnelle au dessus des distances supérieures au $1/6$ de la longueur d'onde, et de façon inversement proportionnelle au carré de la distance pour les portées nettement inférieures au $1/6$ de la longueur d'onde. Avec une source de type membrane libre, la situation est plus complexe et tandis que la pression et la vitesse des particules sont l'une et l'autre inversement proportionnelles à la distance (pour les grandes distances), à courte portée, la pression est supérieure de $2 \pi r$ pour une source ponctuelle d'une même puissance et la vitesse des particules est supérieure de $(\frac{2 \pi r}{\lambda})^2$ comme le montre la fig. 2c.

Aux petites distances, la vitesse des particules varie comme l'inverse du cube de la distance, tandis que la pression varie comme l'inverse du carré de la distance.

" CHANT " DE LA DROSOPHILE

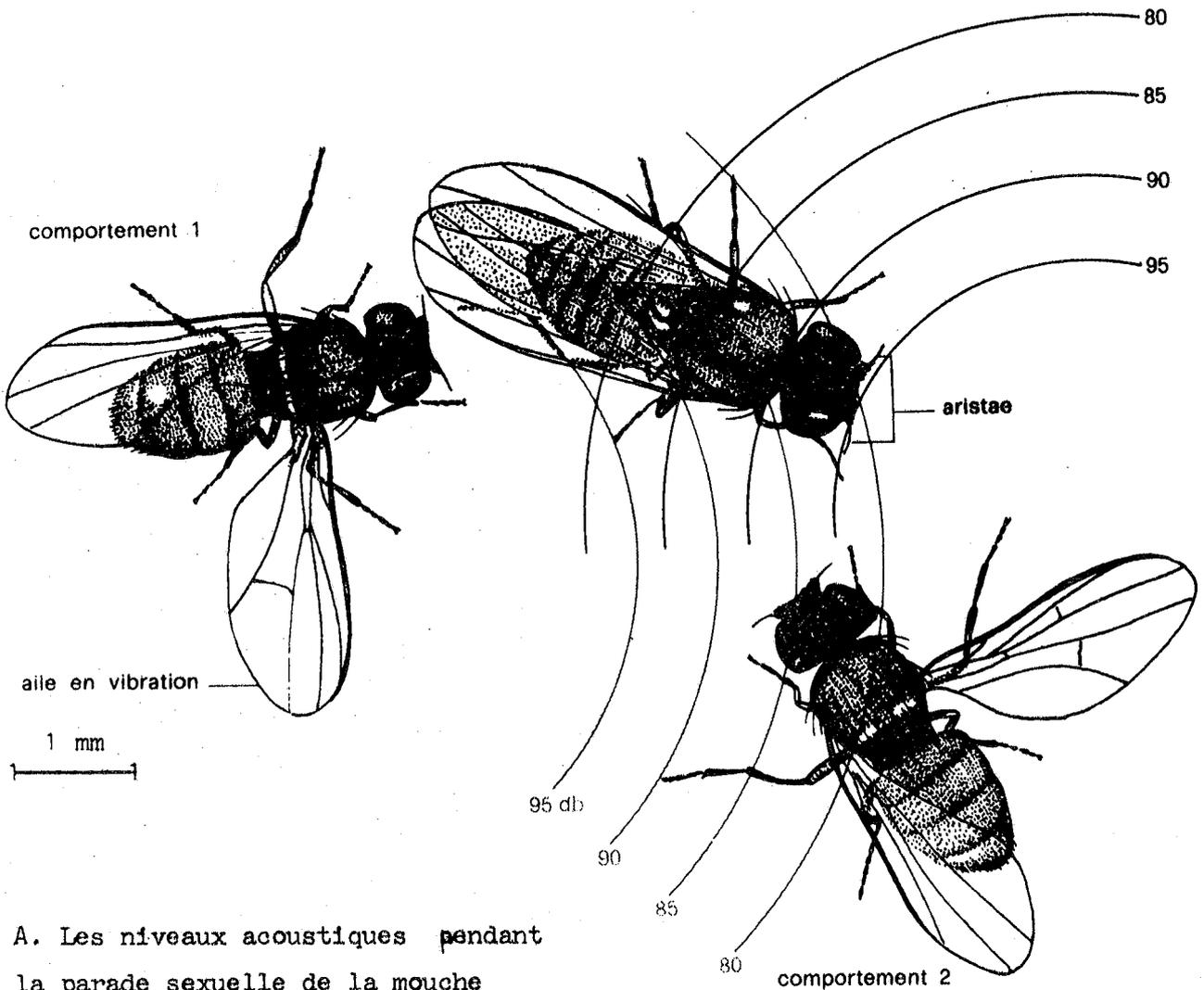
Comme de nombreux petits insectes utilisent des sources de type membrane libre, il est intéressant d'analyser le système acoustique de l'un d'entre eux. La Mouche du Vinaigre (Drosophila melanogaster) est une petite mouche de 2 mm de long qui produit un chant consistant en des séries de pulsations sonores monocycliques, dont chaque période dure environ 6 ms (Fig. . .). Ce chant est produit par une série de discrets battements d'ailes consistant en mouvements orientés alternativement vers le haut et vers le bas à environ 45° par rapport au substrat (Fig. 2A). Le son est produit par le mâle pendant qu'il courtise la femelle.

L'aile de la Drosophile n'a que 2 mm de long sur 1 mm de large. Le chant, avec sa période de 6 ms, peut être considéré comme ayant une longueur d'onde de 2 m; la source est donc relativement minuscule. Quand elles se courtisent, les Drosophiles se tiennent à des distances de l'ordre de 2 à 5 mm. On peut calculer que la puissance sonore produite par la mouche est d'environ 10^{-16} Watts seulement. Avec une source ponctuelle, à faible portée (5 mm), la pression sonore est voisine de 2,5 dB. Comme la source est de type membrane libre, la pression est beaucoup plus grande (environ 36 dB à 5 mm et 48 dB à 2,5 mm). Si on considère la vitesse des particules, l'ef-

LE CHANT DES INSECTES SELON LEURS TAILLES

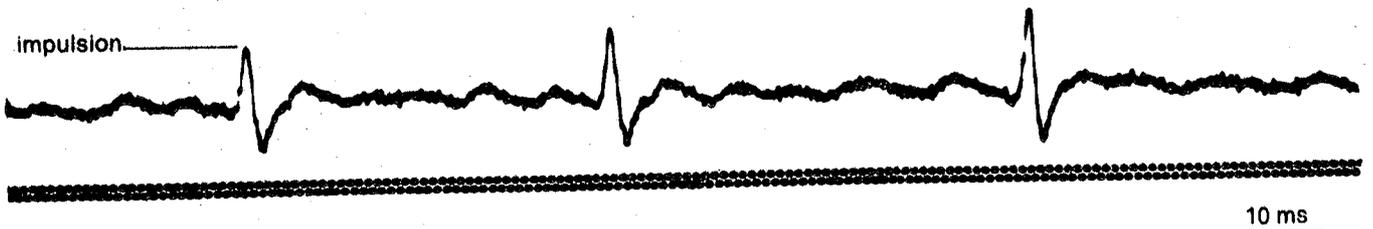
H.C. Bennet-Clark, Department of Zoology, Oxford University, Angleterre.

Figure 1



A. Les niveaux acoustiques pendant la parade sexuelle de la mouche

Drosophila melanogaster. Le chant du mâle se produit par un battement de l'aile.



B. Chaque battement de l'aile produit un impulsion sonore durant circa 6 millisecondes.

Figure 2

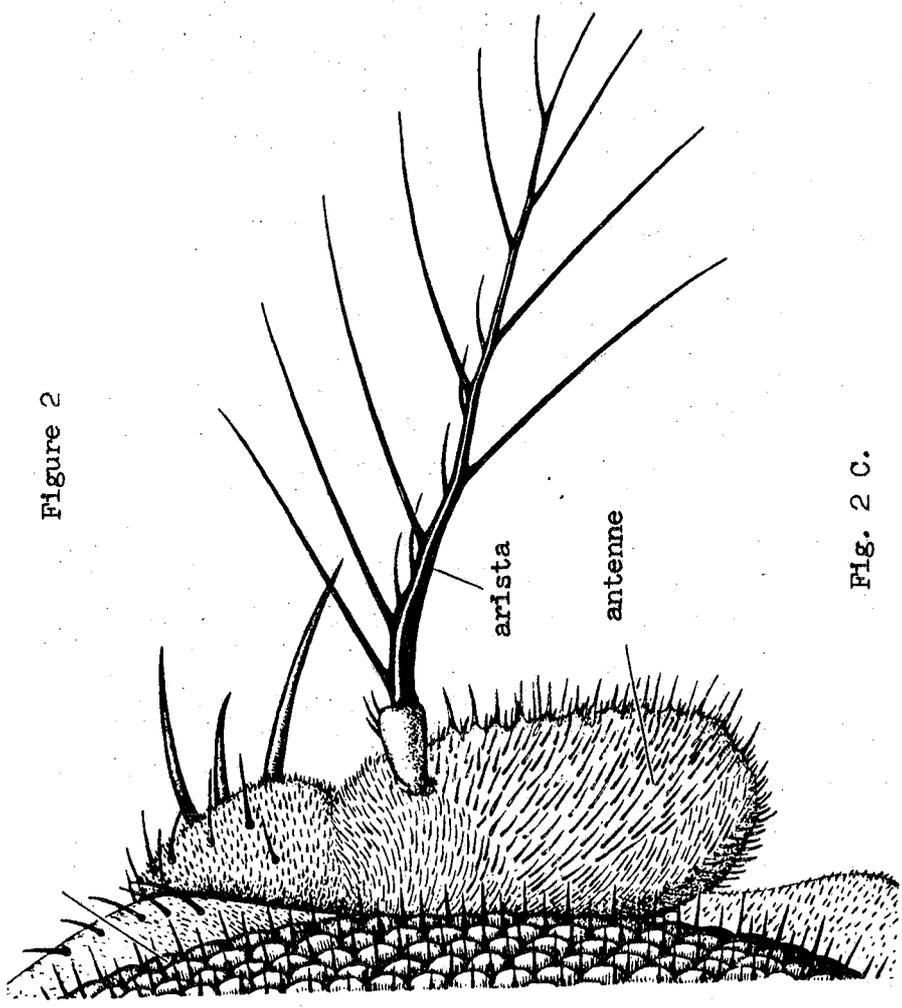


Fig. 2 C.

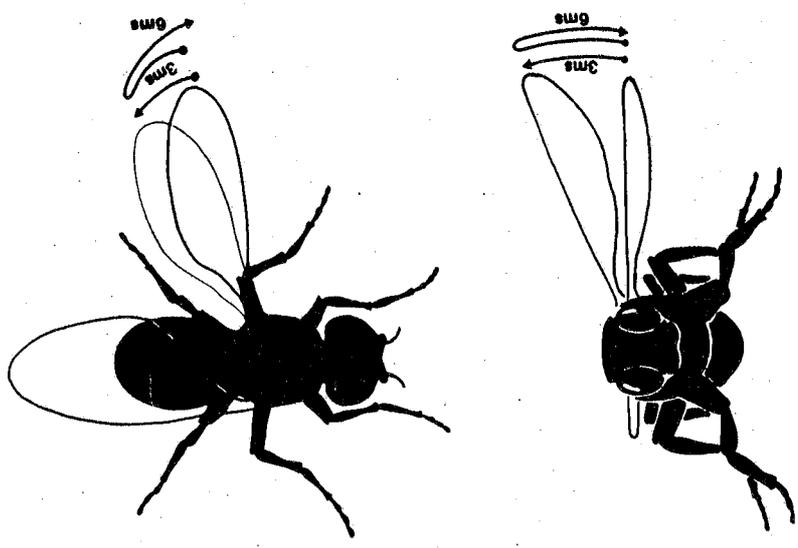


Fig 2 A

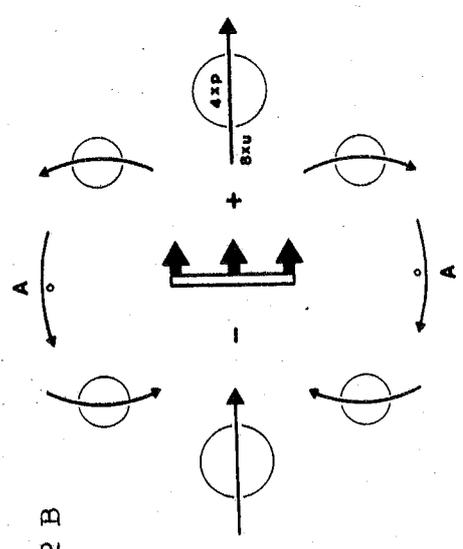


Fig. 2 B

A. Le chant se produit par un battement discret de l'aile durant 6 millisecondes.
 B. Autour d'une source doublet, près de la source, le champ acoustique n'est pas linéaire. Le niveau de pression acoustique se distribue en chiffre de huit (indiqué par le diamètre du cercle p), mais les courants acoustiques (indiqués par les flèches u) s'écoulent de l'avant vers l'arrière de la source. Aux points A A on trouve aucune pression, mais il y a des courants acoustiques. Près de la source, la pression augmente comme l'inverse du carré de la distance, mais la vitesse du fluide augmente comme l'inverse de la distance (quatrième puissance de la distance).
 C. L'arista de l'antenne est sensible à la vitesse du fluide, dans l'onde sonore. L'arista se situe sur la tête de la mouche (voir fig 1A)

fet de réaction de la source est encore plus important. A 5 mm la vitesse des particules est équivalente à celle d'un son de 74 dB et à 2,5 mm est de 95 dB au-dessus du seuil de $0,5 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ (Fig. 1).

On peut montrer que le récepteur acoustique de la femelle de *Drosophile* (qui est une partie plumeuse de l'antenne, l'arista) est un capteur de vitesse. Si on utilise un petit haut-parleur pour simuler la membrane libre, il y a, dans le plan du diaphragme, une position pour laquelle la pression sonore est nulle, mais où la vitesse des particules est normale au diaphragme (Fig. 2c, points A A). Si la tête de la *Drosophile* est placée dans cette position, on peut voir que l'arista de l'antenne vibre à son maximum quand son plan est normal à la direction de la vitesse des particules.

Ce recours à des récepteurs et émetteurs acoustiquement compatibles a d'importantes conséquences. La femelle de *Drosophile* est bien adaptée à percevoir une forte composante de la vitesse de particules du chant du mâle. Du fait que le chant décroît en force très rapidement avec l'augmentation de la distance, ce système s'avère être un modèle de système de communication de messages particulièrement efficace pour les petits animaux. On doit aussi noter que le chant n'est très fort que pour la distance qui sépare les mouches qui paradent (fig. 1). Au cours des premiers enregistrements, nous avons utilisé des microphones sensibles aux pressions; une isolation très poussée du microphone était alors nécessaire, même quand les mouches étaient placées directement sur le diaphragme du microphone! Dès que nous avons utilisé un microphone à ruban sensible à la vitesse des particules, il a été possible d'enregistrer les sons sans isolation sonore compliquée et d'obtenir de bons enregistrements. A titre d'exemple l'enregistrement qui figure dans l'illustration a été réalisé pendant qu'un marteau-piqueur fonctionnait sous les fenêtres du laboratoire!

LES GRILLONS ET LEURS SEMBLABLES

Parmi les gros insectes, les Orthoptères sont intéressants parce que la plupart des Grillons, Sauterelles et Criquets strident soit en frottant leurs élytres l'une contre l'autre, soit en frottant leurs pattes contre les ailes. En raison de leur taille, il est possible d'analyser comment l'action du nerf sur les muscles est réglée, et d'étudier les mécanismes des mouvements alaires et les problèmes acoustiques qui se posent entre l'insecte et son environnement.

Le cas du Grillon est plus facile à analyser que celui du Criquet, car le son est produit par le frottement d'un plectre (plectrum) situé sur une élytre, contre une série de dents (pars stridens) placée sur l'autre élytre. Deux mécanismes principaux sont en présence : 1) le plectre plie sur une dent et échappe ensuite derrière celle-ci. Ceci produit un train d'ondes rapide, de telle manière que le mouvement complet des élytres produit une rafale d'impulsions brèves, 2) le plectre détermine la résonance de l'élytre qui est renforcée par chaque interaction contre le plectre et chacune des dents successives de la râpe.

Dans le premier cas, la stridulation tend à être un bruit à large bande de fréquence, comparable à celui que produit un enfant en raclant un bâton sur les barreaux d'une grille. Dans le second cas, l'émission sonore peut être un son musical presque "pur". Dans chaque cas, la fréquence dominante se situe quelque part entre 2 et 50 kHz.

Pour produire une note pure, il faut que l'élytre joue le rôle d'un résonateur. Les élytres des insectes sont faites d'un mélange de fibres de chitine avec des protéines variées et peuvent être considérées comme similaires à des fibres de verre.

...../

Un tel " tissu " est élastique, et, selon le degré de tannage, peut avoir plus ou moins d'amortissement interne. Chez les Grillons, le résonateur est une surface durcie dont la résonance fondamentale se situe entre 2 et 8 kHz selon les espèces; chez les Sauterelles, par contre, le résonateur est une veine durcie qui réagit comme un diapason dont la fréquence de résonance, selon les espèces, se situe entre 10 et 50 kHz.

La pureté de la note dépend du degré d'humidité du matériau de l'aile et aussi de son impédance acoustique. Le degré d'amortissement peut être apprécié par le facteur qualitatif "Q" qui est donné par la formule :

$$Q = \left(\frac{\text{fréquence de résonance}}{\text{largeur de bande à } - 3 \text{ dB}} \right)$$

Pour les élytres de Grillon, il a été montré que le facteur Q des élytres isolés est d'environ 30 tandis que pendant l'émission sur l'insecte vivant, il est de 10 environ. Pour la plupart des autres Orthoptères, le facteur Q de la stridulation se situe entre 5 et 30, ce qui suggère que la résonance n'est que légèrement amortie.

Si la résonance n'est que légèrement amortie, il semble corrélativement que l'impédance acoustique de l'élytre soit petite, condition pour que le rayonnement du son soit inefficace, et l'émission douce. Ceci n'est visiblement, pas du tout le cas pour les Grillons qui, compte tenu de leur taille, produisent un bruit remarquable. Où est alors le paradoxe ?

Un insecte, la courtillière (Grylotalpa vineae) (fig. 3A), permet d'analyser la production sonore. Cet insecte, qui vit dans le sud de la France, chante au printemps et en été dans un terrier dont les ouvertures en forme de pavillon débouchent à l'extérieur par deux trous (fig. 4B). L'émission sonore est constituée d'impulsions régulières dont la fréquence porteuse est de 3,4 kHz (fig. 3B); elle peut durer de manière continue pendant une demi-heure. La stridulation est très forte. J'ai enregistré des niveaux de 90 dB à 1 mètre : étant donné que l'animal chante en un point fixe, il est possible de relever la répartition du son autour du terrier (fig. 4B), ce qui permet de calculer la puissance acoustique produite par l'insecte.

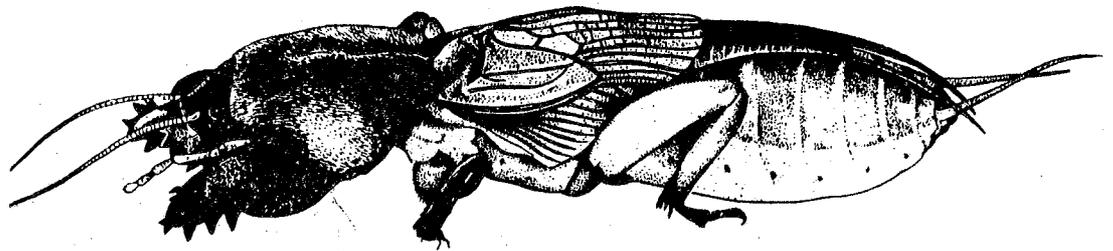
Cette puissance sonore est voisine de 1.2 mW pour environ 50 mg de muscles. Comme le type de muscle qu'utilise l'insecte produit 70 W/kg, la puissance musculaire n'est pas supérieure à 3.5 mW, ce qui suggère un rendement de production sonore d'environ 30 %.

La forme du trou du " terrier " est très importante. Non seulement du fait qu'il augmente de manière plus ou moins exponentielle depuis le niveau où se tient l'insecte jusqu'à la surface (fig. 4), mais aussi parce que la fréquence de la cavité est accordée pour être en résonance avec une cavité sphérique du côté interne du terrier. Il apparaît que ce bulbe accorde l'embouchure du pavillon de manière réduite au mieux la perte sonore qui pourrait se produire entre l'avant et l'arrière des ailes de l'insecte. Il y a deux espèces de Courtillières communes en France : l'une dont la fréquence porteuse est de 1,6 kHz et l'autre de 3,4 kHz (fig. 4A). La forme du terrier diffère, pour ces deux espèces, en fonction de la fréquence porteuse du chant et du terrier, qui paraît être bien adapté pour agir sur la charge de résistance acoustique. Ceci explique l'efficacité du message sonore, mais ne saurait expliquer la très grande pureté du chant caractéristique des deux espèces (fig. 3B, 4A).

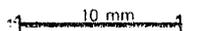
Si on examine le début et la fin d'une impulsion, on constate que les transitoires d'attaque et d'extinction sont tous deux très brefs (fig. 3B). Ceci implique un système possédant un facteur Q petit. Pendant l'impulsion, le son indique un petit changement de fréquence, et ici le facteur Q peut voisiner 20. Quand on calcule la masse de la charge acoustique, on trouve 0,25 mg. La partie résonante des ailes de l'insecte consiste en une fine membrane qui pèse 0,35 mg, entourée d'une veine de quelque 0,8 mg. La masse de la membrane et sa charge acoustique sont équi-

- Bennet-Clark -

Figure 3.

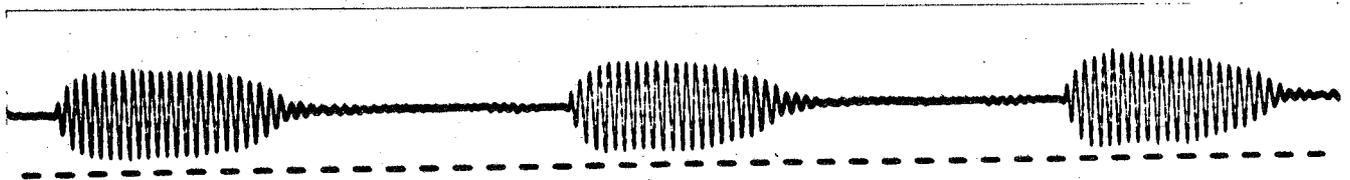


10 mm

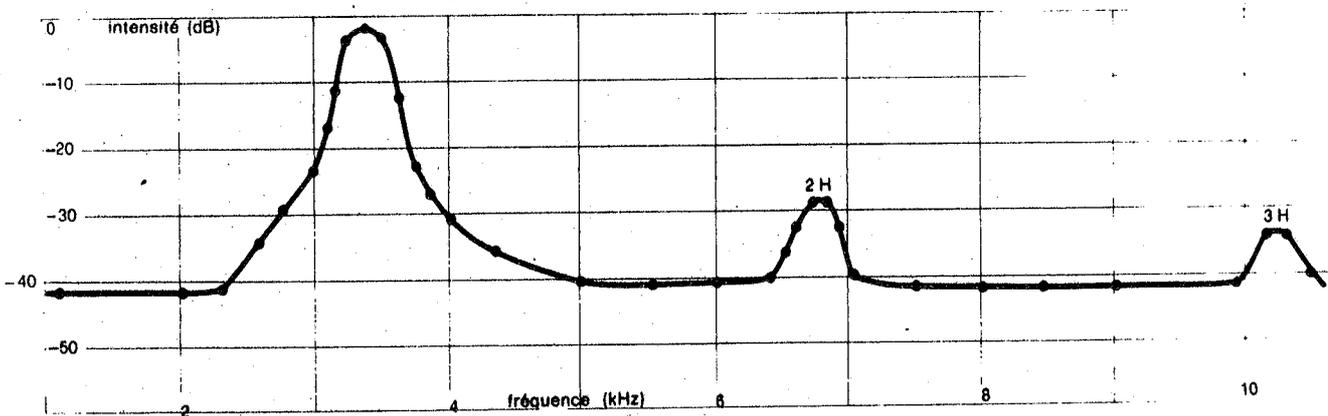


3A

Les courtilières sont des grands insectes qui vivent dans des terriers, creusés sous la surface du sol par les grandes pattes antérieures. Les mâles chantent en frottant les ailes antérieures l'une contre l'autre.



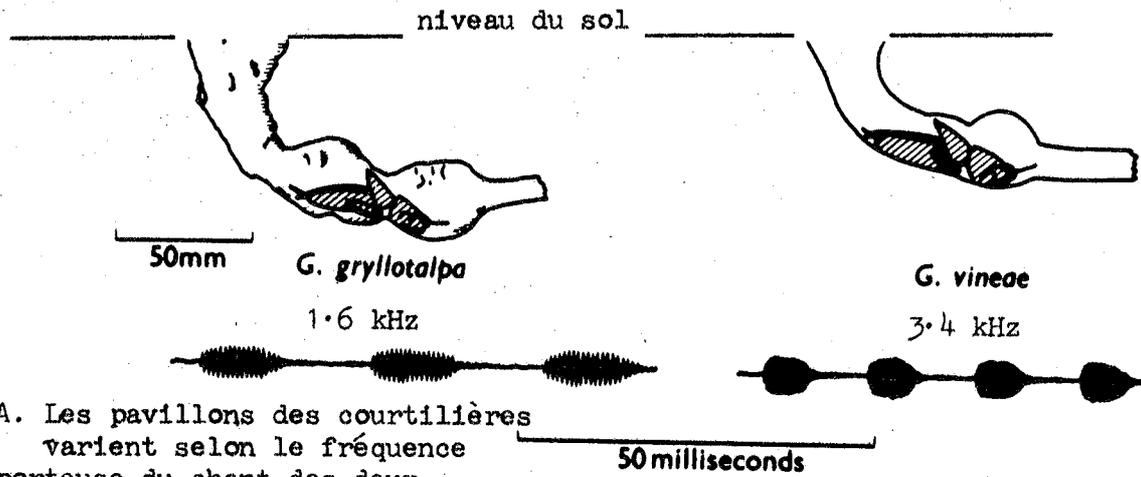
10 ms



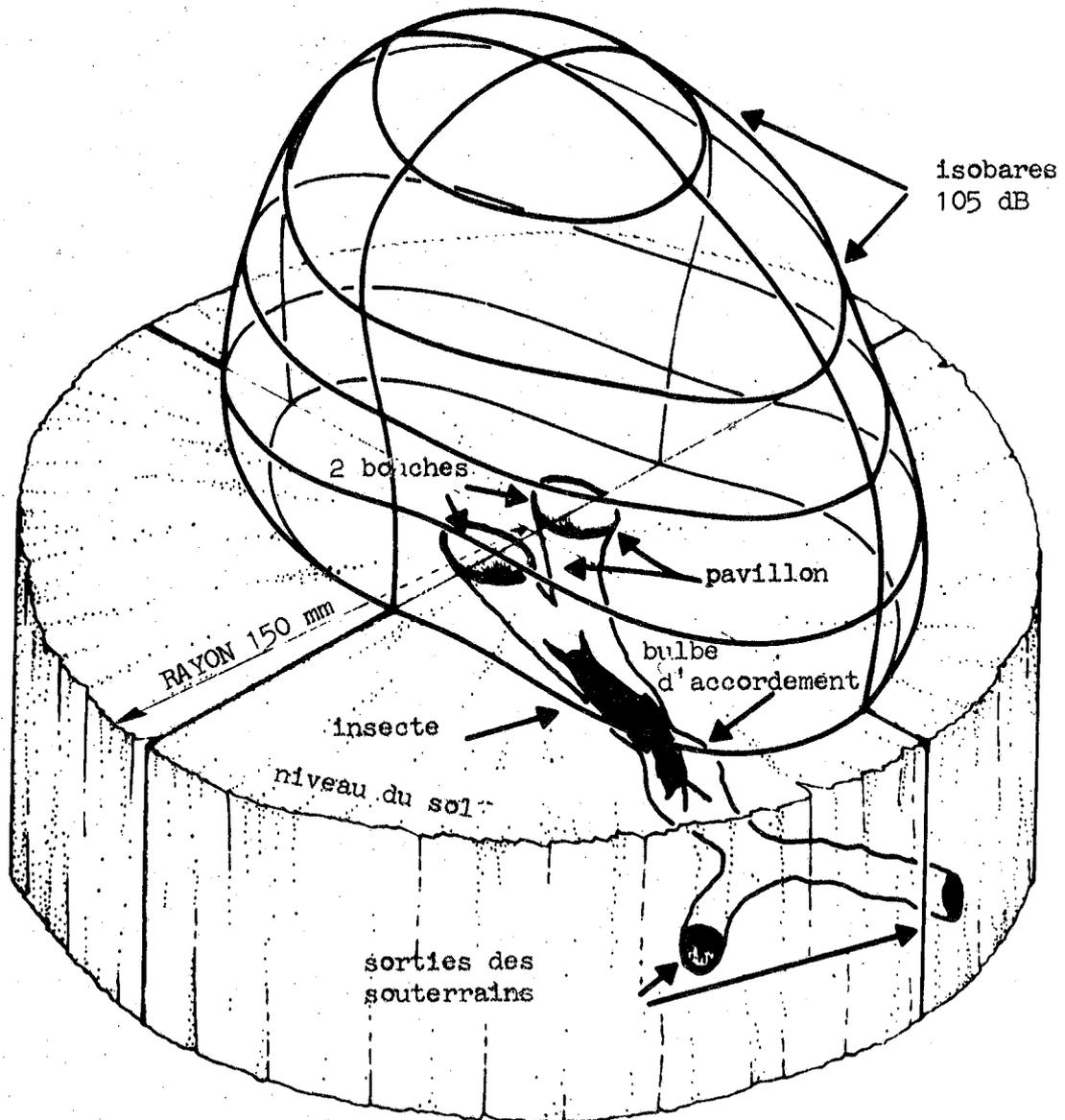
3B le chant de la courtilière *Gryllotalpa vineae* consiste en une série d'impulsions très régulières. Le spectre de l'énergie montre que le chant est bien accordé à une seule fréquence de 3,4 kHz.

- Bennet-Clark -

Figure 4.



A. Les pavillons des courtilières varient selon la fréquence porteuse du chant des deux espèces.



B. Le chant émis par une courtilière est bien puissant, grâce à la forme du terrier, accordé à la fréquence du chant. Le chant est dirigé par interférence entre les bouches du terrier; le chant constitue une sorte de phare acoustique, attirant les femelles volant au voisinage

valentes à celle de la masse des veines, aussi le facteur Q du système peut n'être que de 2; c'est ce qu'on observe approximativement au début et à la fin de l'impulsion.

Quand les ailes se ferment simultanément, elles sont mises en mouvement par leur propre inertie. La masse totale de l'aile est de 12 mg et celle de la partie qui comporte la structure résonante de 5 mg, ce qui devrait donner pour le système un facteur Q de

$$\left(\frac{\text{masse de l'aile}}{\text{charge de l'air} + \text{masse de la membrane}} \right)$$

soit de $\left(\frac{12}{0,25 + 0,35} \right)$; d'où un facteur Q voisin de 16 .

En pratique, le facteur Q observé pour le chant est d'environ 18 ; il semble donc probable que le mécanisme de la production du son est un léger diaphragme très chargé, animé par l'inertie des ailes relativement lourdes qui se meuvent à une vitesse plus ou moins indépendante de la charge acoustique.

Le cas de la courtillière est un cas extrême. Dans le cas des grillons, le chant est très pur, mais on constate que la charge acoustique sur la partie résonante des ailes est relativement petite parce que la surface de l'aile est petite par rapport à la fréquence du chant. Dans le cas des sauterelles, comme Ephippiger, la fréquence porteuse du chant est plus élevée; ainsi l'aile s'accorde bien avec l'air environnant. Le chant se compose d'une série d'impulsions amorties, mais on ne sait pas si l'amortissement est dû au mode de charge acoustique, au frottement d'un plectre sur une série de dents, ou à l'amortissement interne de la membrane de l'aile.

DIRECTIVITE DU SON

Une source simple tend à produire un mode de rayonnement du son en hémisphère ou en forme de " 8 " . Mais il peut être avantageux, pour un insecte, de diriger son émission sonore à la manière d'un phare, car si le son est concentré en un rayon orienté, sa portée effective sera plus grande. Cette directivité peut être obtenue par divers moyens. Dans le cas de la Drosophile, elle découle de la forme du battement d'aile, allant en haut et en arrière puis en bas et en avant. D'autre part, l'aile se tient juste au-dessus du substrat; l'émission du son tend alors à être maximale juste en avant de la mouche. Pendant la cour, le mâle essaie toujours de se placer de manière à avoir la femelle en face de lui (fig. A), dans la direction du son le plus fort. Ainsi, seulement le son est concentré où cela est utile, mais les signaux indésirables sont supprimés.

Chez les Grillons on rencontre une situation similaire. Comme les ailes sont maintenues comme une voûte au-dessus du sos de l'insecte, le son est dirigé vers l'arrière et vers le sol. Un Grillon qui émet un chant d'appel se tient à l'entrée dégagée de son terrier et il modifie son orientation chaque fois, après quelques secondes, afin de diriger le rayon sonore dans une nouvelle direction.

Avec la courtillière, le son est rayonné vers le ciel dans un espace en forme de disque (fig. 4B). Un tel rayonnement résulte de la double embouchure du terrier dont les ouvertures sont ovales (environ 1/4 de la longueur d'onde en travers et 1/2 longueur d'onde en longueur). Le long de l'axe le plus court, le son est réparti presque également dans toutes les directions, mais le long de l'axe le plus long, en raison des interférences entre les bouches du terrier, le son est rayonné vers le haut (fig. 4B). Un tel rayonnement hémisphérique coupé par un plan horizontal, a une superficie constante en regard de l'angle d'approche. A l'inverse, le rayonnement en forme de disque présente, pour une même surface totale, une superficie utile double, mais, évidemment, une aire minimale pour une approche par les bords.

CONCLUSION :

En vertu de leur petite taille et du fait que les organes producteurs et capteurs de son sont souvent situés à la surface du corps, les insectes s'avèrent être de bons supports pour l'étude des problèmes physiques d'acoustique liés à la production sonore

L'emploi de transducteurs inhabituels permet d'exploiter de s effets acoustiques particuliers. Un choix convenable des fréquences de l'émission et du mode de rayonnement, permet aux insectes de communiquer à des distances tout à fait remarquables pour de si petits animaux.

FORMES ET COULEURS DES CHANTS D'INSECTES

E. LEIPP

I. INTRODUCTION

Les insectes sont des musiciens... Des musiciens de rythmes! Et ils utilisent des instruments curieux et efficaces : frottoirs, cliquoirs, râcloirs... pour nous jouer leurs " sambas ". Bennet-Clark nous en a montré quelques exemples tout à fait intéressants !

Comme tous ceux qui sont nés tant soit peu poètes, j'ai été bercé, ou séduit, aux moments de rêverie ou de farniente, par le chant des insectes : la mélodie du grillon solitaire, le "jazz" des sauterelles en été, l'interminable ostinato des cigales dans les oliviers... D'autres fois aussi, comme tout le monde, j'ai été agacé par le " ronflement " d'un bourdon ou d'une abeille, où par la chanson des moustiques !

Mais cela était resté dans mes préoccupations de rêveur solitaire ou de vacancier... Jusqu'au jour, en 1959, où, comme sujet de thèse complémentaire (bib.1), M. SIESTRUNCK me suggéra un titre séduisant :

" L'étude au spectrographe acoustique des signaux émis par les animaux ".

Le spectrographe dont il s'agissait était le sonographe. Cet appareil était alors pratiquement inconnu en France, et M. BUSNEL, Directeur du laboratoire d'acoustique animale de l'INRA, à JOUY en JOSAS, venait d'en acquérir un exemplaire. A. MOLES, qui m'aidait alors dans mes recherches sur le rayonnement acoustique du violon (mon sujet principal de thèse) connaissait le sonographe pour l'avoir utilisé aux U.S.A. Il me conseille d'aller auprès de M. BUSNEL, et je pus faire ainsi toute une série de sonogrammes de sons de violon. Mais du même coup j'avais pris contact avec le spécialiste en acoustique animale... ce qui me permit de rédiger ma thèse complémentaire, comportant entre autres, des sonogrammes de signaux acoustiques de dauphins (que Busnel étudiait alors), de cris de détresse de corbeau, de " cris " de papillon tête de mort. Et aussi de parole humaine et de parole de perroquet!

Par la suite, au hasard des rencontres à mon propre laboratoire, j'eus l'occasion de refaire de temps à autre des sonogrammes de chants d'oiseaux, de moustiques, de guêpes, de cigales... enregistré pendant mes vacances. Tout cela ne relevait pas du spécialiste, mais de l'acousticien " musical " désireux de savoir comment fonctionnaient les instruments utilisés par les animaux, comment étaient faits, acoustiquement, leurs chants, et pourquoi ils s'avéraient si efficaces, malgré la quantité minime d'énergie en présence.

En effet, les signaux émis par une cigale ou un moustique représentent des fractions de milliwatts; or nous percevons les chants à des distances considérables! Finalement on le comprend bien, si on considère les propriétés particulières de l'oreille humaine, ultra-sensible dans la zone de 2 à 4000 Hz, où justement sont localisés beaucoup de chants d'insectes... Rappelons que l'oreille réagit à des amplitudes de quelque 10^{-8} millimètre dans cette " zone sensible ", là où nos appareils de mesure acoustique les plus sensibles s'avèrent souvent impuissants! Sauf le sonographe... qui, du fait de sa conception, réagit à tous les signaux acoustiques auxquels est sensible notre oreille. C'est justement cette particularité qui m'avait attiré vers le sonographe pour étudier les problèmes musicaux qui me concernaient alors.

...../

Bref, l'outil acoustique adéquat pour étudier les chants d'insectes existait à l'INRA dès 1958 et j'ai eu la chance de pouvoir m'en servir! Mais vers la même époque, MOLES me fournit aussi l'"outil à penser" les problèmes en cause (bib.2). En effet, les chants des insectes, comme la plupart des signaux acoustiques volontaires produits par l'homme ou les animaux, sont des messages. MOLES apportait les éléments de base pour aborder les problèmes des messages en général, et il n'est pas hors de propos de donner sur ce point quelques précisions.

Les messages sont des concepts transmissibles du cerveau d'un émetteur vers le cerveau d'un récepteur par l'intermédiaire de signes. Ces signes peuvent être quelconques : optiques, acoustiques, tactiles etc..., mais ils doivent nécessairement répondre à plusieurs impératifs. Il faut d'abord que l'émetteur dispose de moyens pratiques pour les fabriquer. Ensuite, ils doivent bien entendu être capables d'exciter l'un des "sens" dont est doté le récepteur; ils doivent encore pouvoir être traités par le centre informatique du cerveau récepteur (capacité suffisante de "l'ordinateur biologique" en présence pour traiter la complexité-fréquentielle ou temporelle - du message acoustique). Dans les messages de la nature, ces conditions sont réalisées de façon optimale : les messages acoustiques "passent" généralement bien. Il est intéressant d'étudier la structure physique de ces messages. Mais pour cela il faut de toute évidence disposer de moyens adéquats pour matérialiser, visualiser, les signaux acoustiques. On sait que ceux-ci sont caractérisés par deux particularités, découlant du fait qu'un signal de parole, d'avertissement, de musique, est un "être sonore". Entendez par là qu'un signal utilisé dans un message possède une forme (dessinée par l'évolution de la fréquence dans le temps), et une couleur (découlant de la répartition statistique de l'énergie dans le spectre acoustique pendant toute la durée du message).

Pour étudier de façon réaliste les messages acoustiques, il faut donc disposer de moyens pour mettre en évidence la forme et la couleur des sons. Ces deux moyens existent désormais : ce sont le sonographe et l'intégrateur de densité spectrale.

J'ai eu l'occasion de parler très souvent du sonographe et de sonagrammes, mais il n'est cependant pas hors de propos de revenir sur cet appareillage, car l'expérience nous montre journellement que beaucoup en parlent sans connaître les nombreuses possibilités des modèles actuels de sonographe.

Pour ce qui est de l'intégration de densité spectrale, c'est une méthode que j'ai imaginée et mise au point récemment pour définir la "couleur" des événements acoustiques. Un appareillage opérationnel, l'IDS, (qui fait l'objet d'un brevet ANVAR) a été construit dans le cadre de la RCP 537, CNRS, Prof. SAPALY). J'ai déjà donné des précisions à ce sujet (Bib.3), et en particulier, tout récemment, au Séminaire sur le chant des batraciens organisé par Melle LEROY (EPHE). Mais je crois qu'il faut en reparler ici.

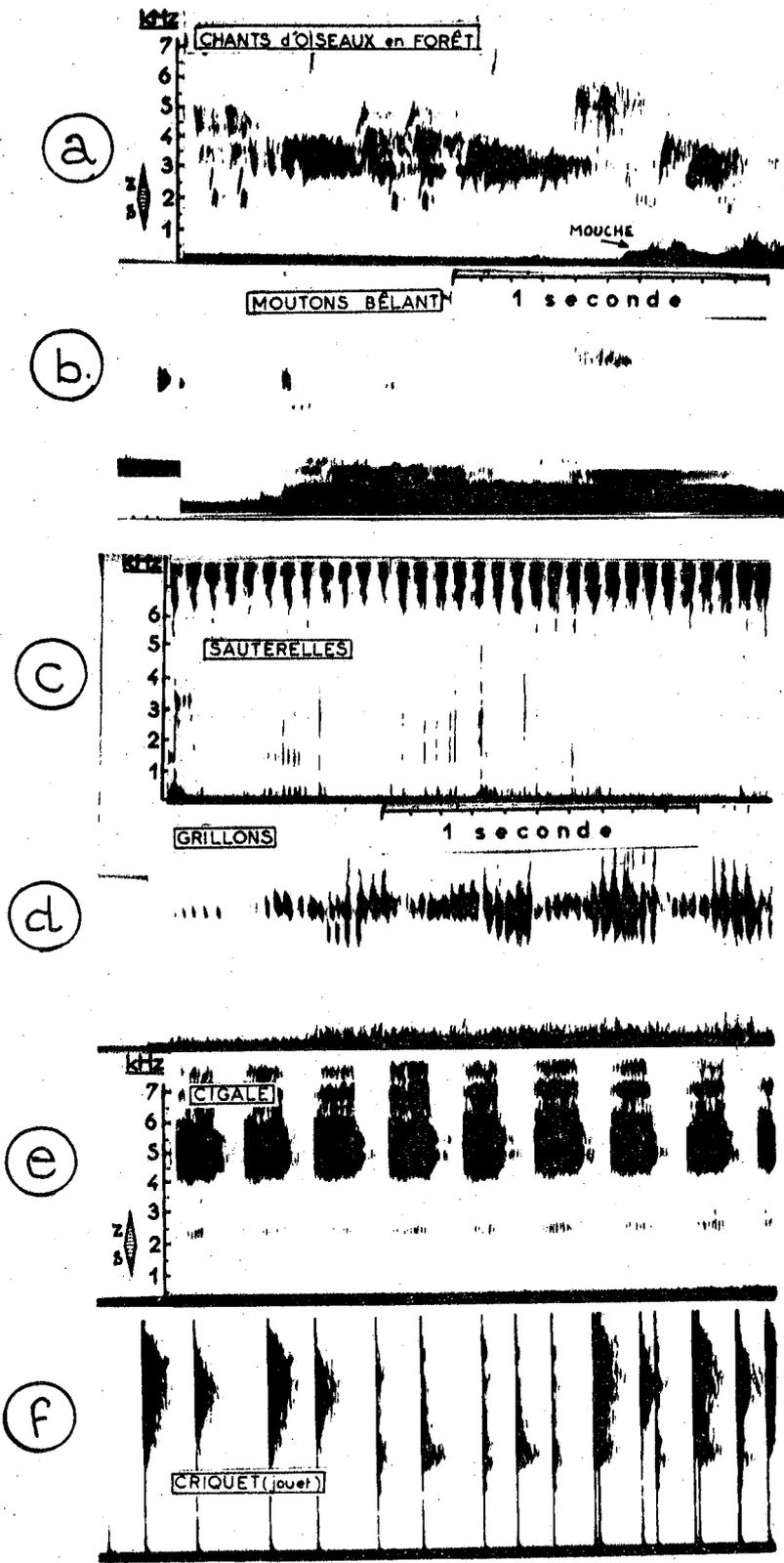
Voici donc quelques précisions résumées sur le sonographe et l'IDS, relativement au chant des insectes.

II. LE SONAGRAPHE

Mon intention n'est pas de donner ici un mode d'emploi détaillé de ce spectrographe, mais de faire un tour d'horizon rapide sur les innombrables possibilités qu'il offre quant on sait s'en servir. Faire un sonogramme, ce n'est pas seulement obtenir une "image" correcte visuellement; encore faut-il savoir la dépouiller! Une longue expérience m'a montré qu'il fallait en fait plusieurs années d'usage intensif pour exploiter les résultats graphiques et en tirer les informations utiles.

Fig 1

SONAGRAMMES de CRIS d'ANIMAUX



Les messages acoustiques des animaux sont constitués de signes dont la forme dépend du type de générateur sonore utilisé, et dont il existe deux sortes essentiellement:

— Les sources "mélodiques": sifflets (oiseaux: fig a) et cordes vocales (moutons: b). Les signes sonographiques ont alors une allure horizontale - évolutive...

— Les sources rythmiques produisant des "clics" disposés quasi périodiquement. Les signes sonographiques ont alors une allure verticale; ce sont des "rafales" de clics, dont la "formule rythmique" varie avec les espèces. On en donne ci-contre trois exemples: sauterelle, grillon, cigale; (c, d, e).

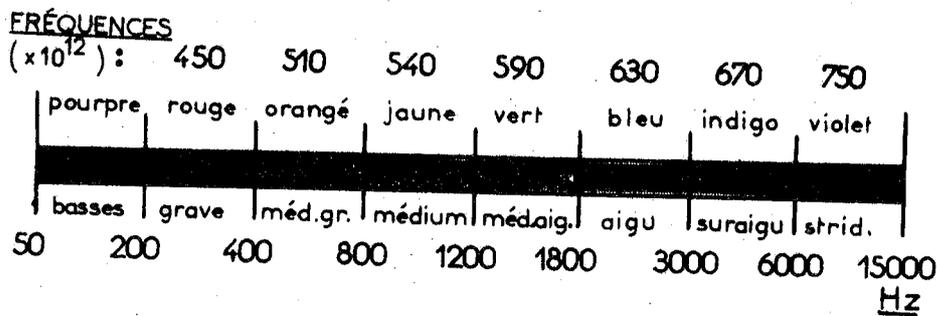
Ces signaux sont généralement concentrés dans la zone sensible de l'oreille humaine, d'où l'efficacité des signaux pour l'oreille humaine.

Les "clics" sont produits par des membranes raides excitées soit par des

"dents de scie", soit par simple torsion (timbale des cigales). On a simulé ce dernier cas à l'aide d'un "criquet", jouet d'enfant bien connu qui produit des clics se traduisant par des hachures verticales "colorées".

fig 2

LUMIÈRE

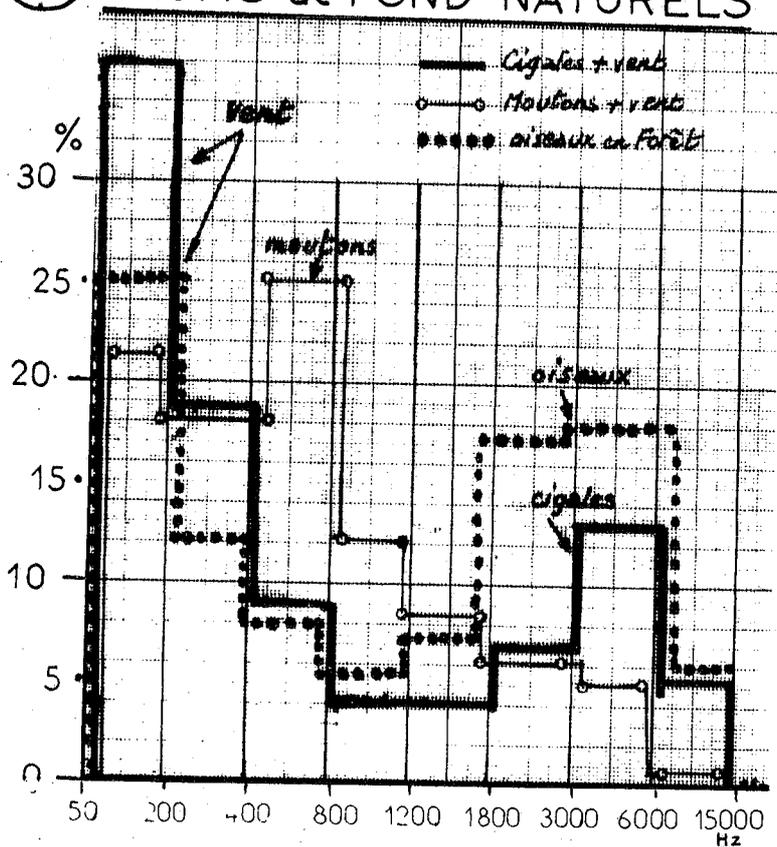


SONS

On peut faire un parallèle entre coloration lumineuse et coloration sonore: les musiciens le font depuis toujours... La sensation colorée, dans tous les cas, résulte du pourcentage d'énergie contenu dans chaque bande, dont la combinatoire peut varier à l'extrême (nuances...)

fig 3

BRUITS de FOND NATURELS



Diagrammes de densité Spectrale intégrée.

Un appareillage spécialement construit fournit, pour une séquence sonore complète, des diagrammes très "parlants", traduisant la "coloration" sonore de la séquence.

Voici trois exemples de bruits de fond diversement "colorés", enregistrés en été, à la campagne. La "balance" sonore est très différente dans chaque cas: l'ambiance

sonore n'a effectivement pas la même coloration statistique.....

Les messages acoustiques utilisés par l'homme et les animaux, nous l'avons dit, sont des super-formes constituées de formes élémentaires, fabriquées en modulant les fréquences dans le temps. L'intensité, dans les problèmes de messages, est un grandeur tout à fait négligeable : l'important est que la forme acoustique fréquence-temps soit perçue, qu'elle soit faible ou intense.

On a parfois comparé les sons non à des " objets " (MOLES : objets sonores). Mais ce sont des êtres acoustiques vivants, qui viennent jouer leur rôle devant notre oreille, tels des acteurs. Ce qui nous intéresse dans un acteur, c'est sa forme (déterminée par ses proportions), ses mouvements et sa " couleur " (visage, vêtements).

Le sonographe représente en fait une véritable CAMERA permettant, dans un empan limité, de filmer et de visualiser les événements sonores, de mettre précisément en évidence leur forme, leurs mouvements et leur couleur. Beaucoup de personnes parlant du sonographe, pensent aux tout premiers modèles et semblent ignorer ses possibilités actuelles. Par exemple on attribue souvent au sonogramme un empan temporel de 2,4 secondes, une bande passante fixe allant de 85 à 6000 Hz ou à 12 000 Hz. On lui reproche son échelle linéaire (alors que, selon la théorie, l'oreille serait logarithmique); on lui fait grief de son imprécision, de son incapacité à faire de la métrologie etc... Or dans les modèles actuels du sonographe tout cela est très largement dépassé et il est possible de régler à loisir, et très largement, les dimensions et la qualité des images en jouant sur les variables suivantes :

1°) La durée du sonogramme, l'empan temporel inscrit sur une feuille normale de sonogramme (longueur 32 cm). Dans les anciens modèles, cette durée était figée à 2,4 secondes. On pouvait évidemment toujours, comme nous l'avons fait parfois, obtenir des sonogrammes de durées plus longues, en coupant un événement enregistré sur bande magnétique en fragments de 2,4 secondes et en collant les sonogrammes bout à bout. Mais le modèle actuel possède désormais une gamme de vitesses différentes : le tambour magnétique tourne plus ou moins vite, avec, bien entendu, des limitations corrélatives de la bande passante. Voici toutes précisions utiles :

avec un tour de tambour magnétique de 1,2 seconde, on analyse entre 160 Hz et 16000Hz			
"	2,4	"	80 à 8000 Hz
"	4,8	"	40 à 4000 Hz
"	9,6	"	20 à 2000 Hz
"	19,2	"	10 à 1000 Hz
"	38,4	"	5 à 500 Hz

On dispose donc dès le départ d'un choix, qu'il faut faire en connaissance de cause, selon les caractéristiques acoustiques du signal à étudier

2°) Extension d'échelle. Si l'on s'intéresse, par exemple, à un phénomène qui se situe exclusivement dans la bande de 3000 Hz à 4500 Hz, on peut " grossir " ce phénomène et l'amener à occuper toute la surface du sonogramme, comme avec un microscope, régler à loisir le grossissement de la forme à étudier. Ceci est parfois important, et permet d'observer des phénomènes qui, sans cela, échappent à l'oeil dans le sonogramme normal.

3°) Filtres. Un spectrographe implique la présence d'un filtre, pour explorer le phénomène. On sait (KUPFMULLER) qu'un filtre présente des contraintes technologiques incoercibles. S'il explore le phénomène par bandes très étroites, il lui faut une durée relativement longue pour se mettre en action (constante de temps). Inversement, si la bande passante est très large, le filtre sera rapide à se mettre en fonction, et on pourra observer alors des phénomènes de très courte durée. Bref, pour " cinématographier " une séquence sonore où l'on s'intéresse aux variations

fines de hauteur, un filtre à bande étroite donnera une image très fine pour l'évolution mélodique (exemple : un chant de rossignol). A l'inverse, si une grande précision temporelle est requise (chant d'une cigale, comportant des impulsions extrêmement brèves, mais où la ligne mélodique est inexistante) on a tout intérêt de prendre un filtre à très large bande passante, qui permettra précisément d'observer des phénomènes de l'ordre de la milliseconde.

Le sonographe actuel comporte en fait 4 filtres, utilisables au choix, et que l'expérience a montré comme suffisants :

- un filtre d'une largeur de bande de 300 Hz (finesse temporelle maximale)
- " " " 150 Hz
- " " " 45 Hz
- " " " 10 Hz (finesse fréquentielle maximale)

J'ai même fait construire par le laboratoire d'électronique, naguère, un filtre intermédiaire. Mais en pratique les filtres courants suffisent pour tous les problèmes : Il suffit de savoir choisir celui qui correspond au type d'image qu'on désire. Rien n'empêche d'ailleurs de tirer du même événement une image fine en fréquence et une autre fine en temps : ces deux images se complètent. En fait, on simule ainsi tout à fait ce que fait notre oreille quand elle s'accommode sur un phénomène donné pour l'"observer" : je me suis longuement expliqué sur ce point ailleurs (bib.5).

- 4°) Choix de l'échelle de fréquence : On peut à loisir obtenir une échelle de fréquence linéaire ou logarithmique par simple commutation. En fait, l'expérience a montré que l'échelle linéaire permet de dépouiller beaucoup plus facilement les documents (équidistance des harmoniques), et il est bien probable que notre oreille procède de même, contrairement à ce qu'affirment les théoriciens (FECHNER; la sensation serait logarithmique....)
- 5°) Contraste : On peut, tout comme en photographie, modifier largement le contraste des images obtenues. Il est possible ainsi de faire apparaître ou disparaître de l'information : à l'usager de choisir selon ce qu'il se propose d'observer, et selon ce qu'il veut faire des documents (diapositives, impression etc...).
- 6°) Noircissement des images : Comme en photographie encore, on peut " développer " l'image plus ou moins longtemps, obtenir une image plus dense, plus claire ou foncée.
- 7°) Calibrage : On peut inscrire au début de chaque sonagramme une échelle de fréquences sous forme de raies équidistantes (ou logarithmiques) à des intervalles de 50 Hz, 500 Hz ou 1000 Hz. On choisit selon les besoins.
- 8°) Courbe de niveau : Il est possible, par simple commutation de relever la variation globale de l'intensité dans le temps (courbe de niveau). En fait une longue expérience m'a montré que cette courbe de niveau présentait très rarement un intérêt (alors qu'elle est un document de base en métrologie acoustique classique).
- 9°) Contour : Un " tiroir " spécial permet de tirer un sonagramme particulier en " courbes de niveaux " où, comme sur une carte géographique on lit les reliefs, les niveaux en fonction du serrage de lignes de niveau (équidistantes de 6 dB et 6 dB). Cette représentation ne présente que des applications limitées (problèmes du bruit), mais elle ne nous a jamais été très utile dans les problèmes que nous étudions.

- 10°) Grand tambour : On peut adapter au sonographe un gros tambour, portant donc une bande de papier sonographique beaucoup plus longue. Ceci permet d'étudier ainsi, toutes choses égales, des séquences plus longues qu'avec le tambour classique.
- 11°) Entrées : On peut entrer les séquences en direct par microphone (impédance 200 ohms) ou par l'intermédiaire de la bande magnétique (impédances 600 ohms et 10 000 Ohms).
- 12°) Tiroir compteur électronique : Un tiroir spécial permet, si le besoin s'en faisait sentir, d'étalonner les sonagrammes en fréquence avec une grande précision grâce à un compteur électronique. Ce tiroir ne nous sert autant dire jamais. La raison en est fort simple : l'oreille ne fait pas de précision métrologique en fréquence; elle ne sait pas faire de mesure, mais seulement des rapports de fréquences...

Comme on le voit, le nombre de choix à faire pour obtenir une image sonographique significative est considérable, et la combinatoire entre les diverses fonctions et réglages de boutons énorme. C'est la raison pour laquelle le sonographe demande un long apprentissage. Si l'on sait bien s'en servir, on retrouvera toujours sur le sonogramme ce que l'oreille a perçu lors de telle écoute particulière. Le véritable intérêt du sonogramme, nous l'avons souvent répété, peut en effet, être résumé ainsi : si tout est bien réglé, tout ce que saisit notre système auditif se verra sur l'image; et tout ce qui est sur l'image peut être entendu.

Ce tour d'horizon devrait lever un certain nombre d'idées simplistes sur le sonographe. Si on se propose d'étudier la forme des signaux acoustiques quels qu'ils soient, le sonographe reste actuellement le seul appareillage adéquat. La difficulté est d'apprendre à s'en servir et, surtout d'apprendre à dépouiller les résultats. Voici à titre d'exemples quelques images commentées montrant que le chant des insectes n'échappe pas à la règle générale (Fig.1). On vérifie que l'image d'un chant de grillon est aussi différente de celle d'un chant de cigale que ne le sont les images photographiques des deux insectes!

Nous tenons donc un moyen efficace pour "photographier", "cinématographier" les formes des chants d'insectes et aussi leurs mouvements. Mais un complément utile à la connaissance d'un objet, d'un être, c'est sa couleur. Parlons donc de l'appareillage d'intégration de densité spectrale.

III. L'INTEGRATION DE LA DENSITE SPECTRALE

Beaucoup de praticiens du son, musiciens et spécialistes HI FI, en particulier, utilisent depuis toujours des termes relatifs à la vision pour décrire la "sonorité", la "coloration" des instruments, des enceintes etc.. Ce parallèle entre audition et vision a déjà fait l'objet d'une réunion du GAM (COMBASTET, bulletin GAM N°80), et nous avons souvent eu l'occasion de reparler de ces problèmes. Pourquoi ce parallèle entre deux sensations a priori assez étrangères l'une à l'autre ? On ne peut pas éluder la question en l'ignorant purement et simplement. Pour savoir s'il y avait quelque réalité cachée sous toutes les affirmations que l'on soutient depuis si longtemps, j'ai fait une série d'expérimentations, en particulier avec la collaboration des étudiants qui suivent mon cours d'acoustique musicale (et qui sont tous musiciens ou mélomanes).

Partons de quelques données élémentaires de l'optique, et essayons de trouver des raccords avec notre problème de "couleur des sons".

L'optique ondulatoire a montré que la lumière, tout comme les sons, était un phénomène lié à des vibrations; avec la différence, cependant que les fréquences en cause dans la lumière sont beaucoup plus élevées que dans le domaine sonore. Rappelons à titre de curiosité des ordres de grandeur.

...../

On a découpé la lumière blanche en 7 " bandes " élémentaires, auxquelles on ajoute généralement une huitième : le pourpre. Ces bandes sont arbitraires, bien entendu, car il n'y a pas de discontinuité dans le spectre de la lumière blanche (seul le spectre solaire comporte des raies noires, indiquant l'absence d'un certain nombre de " couleurs " dans la lumière solaire). Les couleurs élémentaires habituellement admises, avec les fréquences respectives moyennes sont :

1°) Le pourpre (mélange de rouge et de violet)	
2°) Le rouge :	fréquence moyenne : $450 \cdot 10^{12}$
3°) L'orangé	" " $510 \cdot 10^{12}$
4°) Le jaune	" " $540 \cdot 10^{12}$
5°) Le vert	" " $590 \cdot 10^{12}$
6°) Le bleu	" " $630 \cdot 10^{12}$
7°) L'indigo	" " $670 \cdot 10^{12}$
8°) Le violet	" " $750 \cdot 10^{12}$

Comme on voit, entre les limites extrêmes on a donc environ une octave. C'est ce qui avait conduit COMBASTET à attribuer à chaque note de la gamme, indépendamment des octaves, une couleur donnée. Le mélange des "notes" donnait, après translation optique réalisée à l'aide d'un appareillage particulier, une "couleur" unique.

Je ne pense pas le problème de cette manière, parce que le découpage en bandes colorées de la lumière est arbitraire et aussi parce que chaque "note" musicale normale contient en fait à elle seule des "séries" souvent considérables de sons différents (harmoniques ou partiels) : d'où l'impossibilité d'attribuer à un accord musical réel une couleur unique.

Partons plutôt de la considération suivante. Si une sorte de consensus s'est fait pour découper le spectre lumineux en 7 ou 8 bandes, c'est certainement parce que notre système visuel, et en particulier notre "ordinateur" cérébral qui traite l'information (qu'elle soit visuelle, acoustique ou autre) n'est capable de démêler un phénomène complexe que s'il comporte au maximum une combinatoire de quelque 8 "composants". S'il en est ainsi pour la vue, il en est certainement de même pour l'audition. En effet, c'est le même ordinateur central qui traite toutes les informations perçues, et sa capacité détermine nécessairement les limites de perception en temps réel des phénomènes de notre environnement. Dans ces conditions essayons de découper la bande passante audible (entre 50 et 15000 Hz environ) en 8 bandes, dont chacune correspond à une qualité particulière des sons, perceptible et définissable verbalement. Pour définir ces bandes j'ai procédé expérimentalement.

J'ai commencé par faire écouter des bandes de bruit de largeurs données, en demandant à des sujets de différencier verbalement ces bandes à l'aide de noms de couleurs. L'expérience a montré que, moyennant un apprentissage préalable, un musicien arrive aisément à associer une couleur à une bande de bruit donnée. Combien de bandes peut-on vraiment discriminer en tout dans le spectre audible? J'ai fait des essais avec 3, 5, 7, 8, 12 et 15 bandes. Avec 3 bandes, le découpage était trop grossier, trop simpliste, avec 15 bandes, le découpage était trop fin, et il y a des confusions entre bandes voisines. Finalement je me suis arrêté à 8 bandes.

Mais les bandes de bruit représentent un artefact sonore. Il fallait vérifier dans quelle mesure ces bandes avaient une réalité dans la musique normale. Pour cela j'ai raisonné de la façon suivante.

Faisons un parallèle avec la vision colorée. La lumière blanche est la somme de toutes les fréquences perceptibles par notre œil. Que représente la somme de toutes les

...../

fréquences possibles existant, en musique classique? Pour le savoir, écoutons une pièce de musique comportant le maximum d'instruments, une pièce écrite par un compositeur qui a su exploiter les instruments de l'orchestre classique de façon optimale pour l'oreille. Au cours de l'exécution, on voit successivement chatoyer toutes les "couleurs sonores", toutes les combinatoires de "couleurs" élémentaires. A la fin, on a une impression d'ensemble sur la "sonorité globale", la "couleur" de l'orchestre résultant de la combinatoire du contenu global des 8 bandes définies.. Prenons par exemple la Grande Valse du Chevalier à la Rose de Richard STRAUSS. Faisons écouter cette pièce à un auditoire composé de musiciens et de mélomanes entraînés à l'écoute, éventuellement de spécialistes de la HI-FI, et cherchons un moyen pour mettre en évidence le rôle de chaque bande dans la sonorité, la "couleur" globale. La méthode la plus réaliste consiste à supprimer une bande du tout et à voir quel changement sonore subit alors le tout. L'opération est aisée. Pour la réaliser, j'ai disposé à la sortie du magnétophone un filtre acoustique classique, permettant de couper dans la musique, une bande quelconque, réglable à loisir (filtre de réjection). Puis j'ai réglé le filtre pour couper une première bande (grave), entre 50 et 75 Hz par exemple. Mes sujets réécoutaient alors la Grande Valse, et je coupais de temps à autre, en cours d'audition, la bande de 50 à 75 Hz. Je posais alors la question : "avez-vous remarqué des changements de "sonorité", de "coloration"?". Dans le cas précédent, un petit nombre de sujets seulement réagissait. Alors j'élargissais la bande vers l'aigu jusqu'au point où tout le monde percevait nettement un changement de "coloration". Ainsi, en coupant tout entre 50 et 200 Hz, tous les auditeurs trouvaient que cela "manquait de basses". J'appelais donc cette bande (qu'on peut mettre en parallèle avec le "pourpre") la "bande des basses". Puis on réécoutait la même pièce en réglant différemment le filtre; entre 200 et 400 Hz, tout le monde était d'accord pour juger que "cela manquait de grave". La bande en question était donc désignée par le mot "grave".

Et ainsi de suite. Finalement, l'opération a permis de définir les 8 "BANDES SENSIBLES" suivantes (que l'on peut mettre en parallèle avec les bandes de couleurs!) (fig.2) .

A priori, l'aspect de ces bandes sensibles semble irrationnel. On a deux octaves pour les basses, une octave pour les graves, une octave pour le médium grave; une quinte pour le médium, une quarte augmentée pour le médium aigu; une octave pour le suraigu, et une dixième pour la stridence. Cette distribution n'est paradoxale qu'en apparence; elle est liée aux propriétés de l'oreille et à sa sensibilité qui décroît de part et d'autre de la région 1800-3000 Hz! Je me suis expliqué là-dessus ailleurs (bib. 3c).

Le nombre et les limites des bandes sensibles étant déterminées expérimentalement à l'aide de sujets entraînés, la question s'est posée de savoir s'il est possible de déterminer, de mesurer, dans une pièce de musique donnée, le pourcentage d'énergie contenu dans chacune des bandes sensibles. Car c'est la combinatoire des différentes bandes sensibles qui détermine précisément la sensation statistique globale de "coloration" à l'écoute d'un événement musical déterminé. Il fallait donc concevoir et construire un appareillage permettant de mettre sous forme graphique le pourcentage d'énergie contenu dans les bandes sensibles pour telle ou telle pièce de musique. Le problème est techniquement soluble : on sait faire des intégrateurs électroniques qui cumulent l'énergie pendant une durée déterminée. J'ai donc commencé par demander à un électronicien compétent (M. SOLE) de me construire un tel intégrateur, qui fut branché à la sortie du filtre (réglé en passe-bande). On relève alors, pour la bande considérée, la quantité d'énergie en présence, lue sur un simple voltmètre. En repassant la même pièce huit fois de suite, le filtre étant chaque fois réglé pour une bande différente, on dispose à la fin de l'opération du diagramme de "densité spectrale" qui décrit, en fait, la "coloration" globale de la pièce considérée.

Cette opération est longue et fastidieuse. J'ai alors demandé à notre Laboratoire d'Electronique (Professeur SAPALY) de construire un appareillage plus opérationnel, faisant l'analyse des 8 bandes simultanément. Cet appareillage a été utilisé de

très nombreuses fois et dans divers domaines, pour étudier la "coloration statistique" de la musique ou de la parole dans telle ou telle condition de local ou de reproduction sonore (voir bib.3). Il était intéressant de tenter d'utiliser la méthode en acoustique animale....

En effet, lorsque nous sommes assis au bord d'une mare où se manifeste un chœur de batraciens, lorsque nous rêvons sous un olivier ou sous un pin en écoutant un orchestre de cigales, lorsque nous écoutons un ensemble vocal de moutons etc... nous avons bien une sensation que le bruit de fond possède chaque fois une "couleur" originale... De même, si diverses variétés de "chanteurs" d'une même espèce se répètent bien à l'oreille cela doit bien apparaître sur les diagrammes de densité spectrale intégrée!

Alors faisons quelques expériences avec notre "Intégrateur de densité spectrale" (IDS), amélioré encore du fait qu'une simple commutation permet de relever directement le pourcentage d'énergie relativement à l'ensemble d'un événement. Ce perfectionnement ultime permet en effet de faire des comparaisons de diagrammes indépendamment de la durée de l'échantillon sonore et de son intensité lors de l'enregistrement (c'est bien ainsi que procède apparemment notre système auditif!) J'ai proposé récemment quelques exemples à l'occasion d'un séminaire sur le chant des batraciens (Melle LÉROY, bib 4). Il s'agissait en particulier de bruits de fond complexes et composites enregistrés par Melle LÉROY en Afrique. Relevons donc quelques diagrammes d'IDS relatifs à des bruits de fond naturels, colorés soit par des chants d'oiseaux, des bêlements de moutons ou des chants de cigales... Les différences sautent aux yeux (fig.3). La constante (bruit du vent) étant repérée, on voit bien que la balance colorée est très différente dans les trois cas, et la coloration suraiguë est bien celle des cigales...

Bref, avec l'IDS, on a un moyen de visualiser la sensation sonore statistique découlant de la distribution particulière de l'énergie dans chaque bandes sensibles des événements sonores.

Ces exemples sont suffisamment éloquentes pour montrer tout l'intérêt de l'IDS, qui apporte précisément les informations qui n'apparaissent pas sur les sonagrammes: le sonagramme nous apporte bien la forme des sons, l'IDS leur couleur statistique. Sonographe et IDS simulent en fait les deux grandes fonctions de l'audition: analyse d'ordre proche (saisie des formes et des mouvements des êtres sonores) - analyse d'ordre lointain (appréhension de la coloration, du timbre statistiques - dans les phénomènes sonores de longue durée).

IV. CONCLUSIONS

Les insectes utilisent, pour faire leur musique, les "machines à sons" que leur fournit la nature. Le fonctionnement et le rayonnement acoustique de celles-ci ne diffèrent en rien de ceux des instruments rythmiques inventés par les hommes pour réaliser certaines musiques rythmiques (méracasses, râcloirs etc... des musiques sud-américaines...) Que les insectes attribuent à leurs signes d'autres significations que l'homme ne peut nous surprendre et n'a finalement aucune importance: la signification des signes d'un message est totalement arbitraire, nous le savons bien. Mais un point reste acquis: pour étudier scientifiquement de la façon exhaustive la forme et la couleur, c'est-à-dire la structure physique des chants d'insectes, nous disposons désormais de deux outils précieux: le sonographe et l'IDS. Ces outils, incidemment, sont susceptibles de nous éclairer sur les mécanismes de production de ces chants à propos desquels la lumière est loin d'être faite dans beaucoup de cas.

E. LEIPP

20 Avril 1977

BIBLIOGRAPHIE

- 1°) LEIPP (E) - Les paramètres sensibles des instruments à cordes.
Thèse d'Université (Mécanique), Bib. Sorbonne 1960.
Thèse complémentaire : Etude au Spectrographe acoustique des signaux émis par les animaux.
- 2°) MOLES (A) - Théorie de l'Information et perception esthétique.
Ed. DENDEL, Paris 1972.
- 3°) LEIPP (E)
 - a) Peut-on tester l'oreille musicienne ?
Bulletin GAM N° 85 (Mai 1976).
 - b) Acoustique et animation.
Bulletin GAM N° 87 (Oct. 1976).
 - c) Evaluation globale d'une chaîne haute-fidélité par analyses d'ordre proche et lointain. Conférences des Journées d'Etude du Festival International du son. Ed. RADIO, Paris (1977).
- 4°) LEIPP (E) - Analyse d'ordre proche et lointain des cris d'animaux.
Exposé fait dans le cadre du Séminaire sur les batraciens (EPHE : Melle LEROY)
à paraître dans le bulletin de la Société Zoologique de France.
- 5°) LEIPP (E) - La machine à écouter.
Ed. MASSON, Paris (1977).
- 6°) COMBASTET (M) - L'audition colorée : mythe ou réalité ?
Bulletin du GAM N° 80 (Juin 1975).

D I S C U S S I O N

M. LEIPP : Ce qui me frappe le plus dans tout ce que BENETT-CLARK nous a dit, c'est l'exemple de la courtilière dont le chant peut être perçu à 500 mètres. Il me semble certain que cette efficacité a deux causes :

- d'abord les chants sont souvent constitués de "clics", c'est-à-dire de "concentré temporel" d'énergie... Quand on ne dispose que de peu d'énergie, autant la concentrer dans le temps si on veut porter à distance. De plus, autant fabriquer des signaux de fréquence élevée, car les sons aigus étant directionnels, il est certain qu'on perd moins d'énergie avec la distance. Mais cela implique alors de bien diriger les "rayons acoustiques"....
- d'autre part, il est clair que l'efficacité pour l'homme vient de ce que son système auditif est sursensible dans la région de 2-3000 Hz. Est-il besoin de rappeler que nous percevons déjà des sons, dans ces régions fréquentielles, pour des amplitudes de 10^{-8} millimètres. On a souvent appelé, à ce sujet, la comparaison avec le diamètre d'une molécule d'hydrogène...

La question que je voudrais vous poser est la suivante. Dans les chants d'insectes, la motivation des intéressés est une communication de messages par voie acoustique. Qui dit "message" dit "formes"; ici les formes sont acoustiques, et il est clair que ces formes sont beaucoup mieux mises en évidence par le sonographe que par l'oscillographe. Y a-t-il quelqu'un à OXFORD, qui étudie les chants d'insectes avec la méthode sonographique ?

M. BENETT-CLARK : Oui; nous publions de temps à autre des sonogrammes et je vous en ai montré un échantillon tout à l'heure.

M. LEIPP : Ce qui m'a frappé est que le sonogramme en question était fait avec le filtre à bande étroite, ce qui donne une image floue dans le temps. Le filtre à bande étroite me semble mieux adapté pour les stridulations d'insectes... Je ne vous demande pas si quelqu'un s'intéresse à l'IDS dans votre laboratoire, car c'est un appareillage et une méthode toute récente que nous avons mise au point au laboratoire. En fait, peu de chercheurs s'intéressent à l'analyse spectrale à long terme; (JANSSEN, en Suède, pour la musique, est le seul que je connaisse). Puis-je vous poser une question d'ordre technique : la prise de son lorsqu'il s'agit de fréquences très élevées, inaudibles pour nous, et de signaux faibles, doit vous poser bien des problèmes.

Melle LEROY Y. : En effet, certains insectes émettent des ultra-sons, jusque vers 60 000 Hz... qui ne "portent" guère à distance. Mais c'est justement ce qui permet de faire des études de la distribution des insectes sur le terrain, de leurs distances réciproques....

M. LEIPP : Un autre problème me préoccupe depuis longtemps, et qui a des liens avec les vôtres. Les insectes chantent dans un bruit de fond souvent intense; vent, bruits de feuilles etc.. Il est clair que pour se faire entendre, ils ont intérêt de fabriquer des signaux qui sont situés dans des régions fréquentielles différentes de celles du bruit de fond. Dans ces conditions, on réussit à se faire entendre avec une énergie infime, si on la compare à celle d'un bruit de fond donné, intense... L'un des intérêts de l'IDS est de fournir un document statistique sur les bruits de fond. Dès lors, si on connaît le domaine de fréquence du bruit de fond, on peut prédire ce qui va se passer lorsque l'animal chante dans celui-ci. On pourrait en particulier comprendre l'efficacité du chant de certains insectes.

...../

Je voudrais poser une autre question à BENETT-CLARK... Vous avez parlé de "sons purs" à propos d'insectes; je crois qu'il faut absolument préciser ce que signifie ce mot pour vous. En effet, pour les uns, un "son pur" c'est un son sinusoïdal (sans composantes); pour les autres (musiciens) c'est un son complexe mais ne comportant pas de bruits parasites; pour d'autres, c'est un son harmonique, contrairement aux sons à partiels (percussions) qui sont "impurs...."

M. BENETT-CLARK : Pour moi, un son pur est un son de hauteur bien définie, bien précise.

M. LEIPP : Donc un son à spectre harmonique. Mais peut-on parler de sons harmoniques chez les insectes alors qu'ils fabriquent en fait des impulsions colorées réparties périodiquement dans le temps?

M. BENETT-CLARK : Oui; mais c'est la périodicité des impulsions qui détermine la sensation de hauteur unique et précise.

M. X. : Avez-vous fait un bilan énergétique des chants d'insectes dont vous parlez ?

M. BENETT-CLARK : Oui; et nous calculons les éléments à partir des données accessibles, c'est-à-dire les mesures de puissance.

M. J.J. BERNARD : Nous avons fait des opérations de ce genre à propos du vol des coléoptères, avec le Professeur BROUSSE. Le bilan était fait par un entomologiste. On dissèque les insectes, on pèse les muscles et on fait le bilan énergétique en fonction de la vitesse ascensionnelle de l'insecte et de la vitesse de propulsion. On peut obtenir des résultats précis ainsi.

M. GENET VARCIN : Vous avez parlé d'insectes utilisant des râpes pour leur stridulation; mais ils ont deux râpes... Cela ne pose-t-il pas des problèmes ?

Melle LEROY : En général, c'est une seule râpe qui fonctionne... le problème est résolu!

M. VAL : Votre intégration de densité spectrale, M. LEIPP, pourrait être faite à partir d'un sonagramme et la sommation des "points" de l'image sonographique, sur chaque bande de fréquence élémentaire, donnerait un diagramme de densité spectrale...

M. LEIPP : Oui. Mais on n'a alors que quelques secondes d'investigation. Avec l'IDS vous pouvez à volonté explorer quelques secondes, mais aussi quelques minutes. D'une façon générale, c'est très important de pouvoir explorer une durée variable. En effet, s'il s'agit de bruit de fond très stables, quelques secondes suffisent pour en relever la densité spectrale; mais les bruits de la nature sont souvent très compliqués et changent beaucoup dans le temps; pour avoir un aspect statistique satisfaisant, il faut donc une longue durée d'intégration.....

M. Y. : M. BENETT, avez-vous essayé d'enregistrer des chants d'insectes et de les rediffuser pour voir si le partenaire concerné réagit au chant enregistré ?

M. BENETT-CLARK : Oui, nous avons fait des appareils à source sinusoïdale dans ce but, mais il faut des haut-parleurs très spéciaux et de très haute qualité dans l'aigu...

M. LEIPP : Le problème de la réaction à des artefacts sonores dépend certainement de l'"intelligence" des sujets considérés... Vous avez tous entendu parler du "Corbeau artificiel" de BUSNEL... Pour chasser les corbeaux qui dévastent les semailles, BUSNEL avait enregistré un corbeau que l'on maltraitait fortement... Les cris de détresse de la bête étaient ensuite diffusés au bord d'un champ. Au début, les corbeaux se sauvaient, effolés... Mais en peu de temps, ils ont repéré qu'il s'agissait d'un artefact, et sont tranquillement revenus. Mais le corbeau est un animal qui a la réputation d'être intelligent. Les insectes ont sans doute un "ordinateur" de capacité beaucoup plus limitée!... et alors ils "marchent" beaucoup plus facilement. Bref, pour connaître et comprendre la réaction d'un animal à un message il faut connaître non seulement la forme des signes acoustiques qu'ils produisent mais aussi les propriétés du système auditif concerné : pas seulement le capteur, mais aussi l'ordinateur qui traite l'information captée.

M. BENETT-CLARK : On a des méthodes permettant de définir les propriétés du système capteur des animaux; pour ce qui est du traitement des signaux par le cerveau des insectes on en est aux hypothèses....

M. LEIPP : Je retiens que les insectes sont de fameux musiciens, spécialisés en musiques rythmiques, et qu'ils savent la faire entendre à qui elle est destinée... Je remercie BENETT-CLARK de nous avoir apporté des informations précises sur les instruments qu'ils utilisent. La cigale et le grillon nous donnent d'utiles leçons d'acoustique expérimentale pour tous les problèmes où nous voulons émerger dans un bruit de fond donné; les musiciens, mais aussi et surtout les spécialistes du bruit auraient tout intérêt de méditer ces leçons.....

E. LEIPP