

LES SONS

LA HAUTE FIDÉLITÉ

Choisir une bonne chaîne

Hi-Fi subjective et objective • Enceintes et haut-parleurs • Tables de lecture et cellules • Magnétophones • Tuners • Microphones et casques.



informatique électronique ...

...Carrières d'avenir

2 formules d'Enseignement

COURS DU JOUR

BACCALAURÉAT DE TECHNICIEN
(Diplôme d'Etat)

Classes d'Enseignement Général (avec préparation spéciale pour l'admission dans les classes professionnelles).
BREVET D'ENST PROFESSIONNEL.
BACCALAURÉAT DE TECHNICIEN.
BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR.
CARRIÈRE D'INGÉNIEUR.
OFFICIER RADIO (Marine Marchande).
TECHNICIEN DE DÉPANNAGE.
DESSINATEUR EN ÉLECTRONIQUE.

Possibilités de BOURSES D'ÉTAT
Internats et Foyers
Laboratoires et Ateliers Scolaires
très modernes.

BUREAU DE PLACEMENT (Amicale des Anciens)

COURS PAR CORRESPONDANCE

Informatique

INITIATION (connaissance générale des ordinateurs et de la programmation).
PROGRAMMEUR (Langages Cobol et Fortran).

Electronique

Enseignement Général (Maths et Sciences) de la 6^e à la 1^{re}. Monteur Dépanneur. Electronicien. Agent Technique. Carrière d'Ingénieur. Officier Radio (Marine Marchande). Dessinateur Industriel.

• Préparation théorique au C.A.P. et au B.T. d'électronique avec l'incontestable avantage de Travaux Pratiques chez soi, et la possibilité, unique en France, d'un stage final de 1 à 3 mois.

• Ecole agréée par la Chambre Française de l'Enseignement Privé par Correspondance.

ÉCOLE CENTRALE
des Techniciens
DE L'ÉLECTRONIQUE

Reconnue par l'Etat (Arrêté du 12 Mai 1964)

12, RUE DE LA LUNE, PARIS 2^e · TÉL. : 236.78-87 +

**B
O
N**

à découper ou à recopier

Veuillez m'adresser sans engagement
la documentation gratuite svs

NOM

ADRESSE

LA 1^{re} DE FRANCE



Photo Miltos Toscas

SOMMAIRE DU N° HORS-SÉRIE

LES SONS

LA HAUTE FIDÉLITÉ

Quand l'air entre en vibration	6
L'acoustique musicale nous révèle les sons réels	18
L'audition et ses mécanismes	30
Au-delà des fréquences audibles : les ultrasons	42
Voir avec les sons : les hologrammes acoustiques	54
La guerre des sons	62
Des fréquences redoutables : les infrasons	70
Le bruit, fléau de l'environnement	78
L'acoustique des grandes salles	88
Du phonographe d'Edison au magnétophone stéréo	98
Haute-fidélité 70	107
A la librairie Science et Vie	158

Tarif des abonnements: UN AN. France et États d'expr. française, 12 parutions : 35 F (étranger : 44 F); 12 parutions envoi recom. 51 F (étranger 76 F); 12 parut. plus 4 numéros hors série : 50 F (étranger : 62 F); 12 parut. plus 4 numéros hors série envoi recom. : 71 F (étranger : 104 F). Règlement des abonnements : Science et Vie, 32, boulevard Henri IV, Paris. C.C.P. PARIS 91-07 ou chèque bancaire. Pour l'Étranger par mandat international ou chèque payable à Paris. Changements d'adresse : poster la dernière bande et 0,80 F en timbres-poste. — Belgique, Grand Duché de Luxembourg et Pays-Bas (1 an) : service ordinaire FB 300, service combiné, FB 450. Règlement à Edimonde, 10, boulevard Sauvinière, C.C.P. 283-76, P.I.M. service Liège. — Maroc : règlement à Sochepress, 1, place de Bandoeng, Casablanca, C.C.P. Rabat 199.75.

Directeur général : Jacques Dupuy. Rédacteur en chef : Michel Rouzé. Direction, Administration, Réaction : 32, boulevard Henri IV, Paris 4^e. Tél. : 887.35.78. Chèque Postal : 91-07 PARIS. Adresse télégr. : SIENVIE PARIS. Publicité : Excelsior Publicité, 2, rue de la Baume, Paris 8^e (Ély 87-46). Correspondants à l'étranger : Washington : « Science Service », 1719 N Street N.W. Washington 6 D.C. New York : Arsène Okun, 64-33 99th Street, Forest Hills 74 N.Y. Londres : Louis Bloncourt, 38, Arlington Road, Regent's Park, Londres N.W.I.

Braun Cockpit 250



La nouvelle génération Braun
Puissance :
2 fois 25 watts
Platine avec
ou sans changeur
Tuner :
PO. GO. FM.

BRAUN

Documentation sur demande à :
Major Electronic
143, rue de Verdun (92) Suresnes

Nom _____

Adresse _____

cockpit 250

UNIQUE —
CHAINÉE STÉRÉO
HAUTE FIDÉLITÉ
20 WATTS

(2 x 10 w)

BSR
TYPE MA 70



890 FRANCS

(45 F par mois)

COMPRENANT :

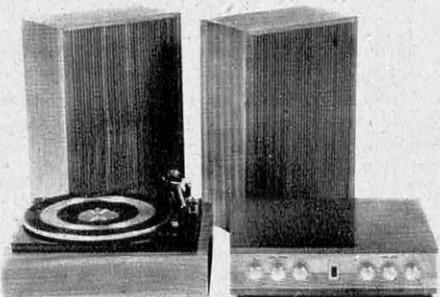
• UNE TABLE DE LECTURE SUR SOCLE

Professionnelle, automatique, manuelle, équipée d'un bras tubulaire muni d'un contrepoids réglable par 1/3 de g de 0 à 6 g.

- Moteur 4 pôles — 4 vitesses — plateau lourd
- Lève-bras manuel — Réglage Anti-Skating
- Pleurage < 0,2 %. Scintillement < 0,06 %.

• UNE TÊTE DE LECTURE MAGNÉTIQUE

Impédance de charge : 47 K. ohms — Compliance : $12 - 15 \times 10^{-6}$ cm/dyn — Bande passante : 20 - 20 000 Hz \pm 2,5 dB — Séparation entre les canaux : 28 dB à 500 Hz — Ecart de niveau entre les canaux : < 2 dB — Pointe : diamant — Pression de la pointe : 1 à 2 grammes — Angle d'attaque : 15° — Niveau de sortie : 7 mV (par canal) à 5 cm/sec. à 1 000 Hz.



• LE NOUVEL AMPLI-PREAMPLI STÉRÉO 20 watts TRAFALGAR

Impédance 4 à 15 ohms. Entrées : PU magnétique et piézo, tuner, micro, magnétophone. 16 transistors. Réglage séparé des graves et aigus sur chaque canal. Distorsion 0,3 % à 1 kHz. Bande passante 20 Hz, 300 kHz-0,5 dB. Coffret teck ou acajou. Face avant en aluminium satiné. 110/220 V.

• LES DEUX NOUVELLES ENCEINTES OXFORD

420 x 290 x 155 cm — HP 210 mm + tweeter (bicône d'aiguës - aimant forte induction impédance 4-5 ohms) en teck ou acajou, musicalité exceptionnelle.

Audition permanente tous les jours 9 h à 19 h.
Expéditions dans toute la France.

E U R O P ' C O N F O R T

87, boulevard de Sébastopol, PARIS-2^e
TÉL. : CEN. 38-76 Métro : Réaumur-Sébastopol

OUVERT LE LUNDI

PUBLI SAP



Une révolution dans le domaine de la musique enregistrée :
APRES LE DISQUE MICROSILLON, LA BANDE MAGNETIQUE en

MUSICASSETTES

- Pas de bruit de fond
- Un encombrement réduit
- Une manipulation simple
- Une présentation luxueuse dans d'élégants petits livres-coffrets

JUGEZ VOUS-MEME... SANS AUCUN ENGAGEMENT, ECOUTEZ

Gratuitement

chez vous et sur votre magnétophone, une heure de musique de votre choix, classique ou variétés, enregistrée sur bande magnétique par le CLUB DES GRANDES VEDETTES.

Si après 8 jours, vous décidez de conserver cette cassette, vous ne la réglerez qu'au prix de seulement 12,50 F (valeur normale 32,50 F)

12,50F

(+2 F de frais d'envoi)

POURQUOI CETTE OFFRE ?

Nous voulons simplement que vous jugiez vous-même de la qualité musicale et technique de nos cassettes. C'est pourquoi nous vous proposons d'entendre gratuitement, chez vous, pendant 8 jours, la cassette de votre choix (classique ou variétés) décrite ci-dessous. Cette écoute vous permettra d'apprécier la qualité de reproduction sur bande magnétique d'œuvres célèbres interprétées par les plus grands artistes de votre temps. Une heure de musique environ, sans aucune distorsion, ni saturation.

PHONOPHILIE ET BIBLIOPHILIE

Nous voulons, également, que vous ayez en main les élégants petits livres-coffrets que nous avons conçus pour contenir nos cassettes. En effet, nous avons imaginé de présenter ces enregistrements dans le joli petit format qu'on utilisait aux 18e et 19e siècles pour de précieux volumes reliés en cuir et dorés au fer. Alignés sur le rayon de votre bibliothèque, ces livres-coffrets s'harmoniseront parfaitement avec vos volumes de luxe reliés et feront plaisir à voir. Cette présentation raffinée a obtenu cette année L'OSCAR DU CONDITIONNEMENT - Section Promotion - Vente.

AUCUN PAIEMENT PRÉALABLE, AUCUN ENGAGEMENT

Avec ce premier envoi, nous vous adresserons une documentation complète sur le Club et vous constaterez que vous pourrez vous constituer avec 33% d'économie une collection de cassettes de grande valeur.

Renvoyez-nous dès aujourd'hui le bon d'écoute ci-dessous. Vous recevrez par retour votre cassette dans son précieux petit livre-coffret et si, après 8 jours, vous décidez de la conserver, vous n'aurez qu'à nous régler la somme de seulement 12,50 F (+ 2 F de frais d'envoi). Sinon, vous nous la retournez sans rien nous devoir.

Club des Grandes Vedettes, 27-Evreux



MUSICASSETTE CLASSIQUE

TCHAIKOVSKI : Marche slave (I. Markevitch) — HAENDEL : Water Music, extraits (P. Boulez) — WAGNER : Ouverture du Vaisseau Fantôme (P. Monteux) — TCHAIKOVSKI : La Belle au bois dormant, extraits (L. Maazel) — RIMSKI-KORSAKOV : Le Coq d'Or, extraits (C. Munch) — J. STRAUSS : Le Beau Danube bleu (J. Krips) — BACH : Concert brandebourgeois n° 2 (C. Schuricht). Avec les orchestres R.S.O. Berlin — National O.R.T.F. — Festival de Vienne.

MUSICASSETTE VARIETES

Riquita — La Peregrinacion ("Alouette") — Piggalle — Frankie and Johnny — Amazing Grace — Penny Lane — Swing Low, Sweet Chariot — Nuanes — I can't stop loving you — Aux marches de Palais — La chanson de Lara — Angels Eyes — Casatchok — Alice — Solfeggietto — Daydream — Georgia on my Mind — avec L. Armstrong — P. Robeson — B. Coleman — Los Guayaki — G. Ulmer — J.-C. Pascal — E. Carrara — etc.

Si vous n'avez pas d'appareil pour écouter les cassettes, demandez-nous une documentation complète sur notre cassettophone.

BON D'AUDITION GRATUITE

à envoyer au : Club des Grandes Vedettes, 27-Evreux

Veuillez m'adresser pour écouter la cassette offerte dans son livre-coffret que j'ai cochée ci-dessous.

FESTIVAL DE MUSIQUE CLASSIQUE GALA DE VARIETES

J'écouterai chez moi ces enregistrements ; si 8 jours après les avoir reçus, je décide de les conserver, je vous réglerai la somme de 12,50 F (+ 2 F de frais d'envoi). Sinon, je vous la retournerai sans rien vous devoir.

Envoyez-moi également une documentation complète sur votre Club Musical sans engagement de ma part.

Cochez ici si vous désirez recevoir une documentation sur notre cassettophone.

SIGNATURE OBLIGATOIRE

*Si vous avez moins de 21 ans,
signature des parents ou du tuteur légal*

Nom _____ écrire en majuscules

Prénom _____

N° _____ Rue _____

N° Dépt | | Ville _____

9-634-901/105

Toujours
au sommet
de la
Haute-Fidélité

Gaillard
vous propose

sa nouvelle gamme 71

- Préamplis-emplis de 8 à 30 watts efficaces
- Chaînes compactes ou en éléments séparés
- Amplis-Tuners AM/FM ou FM multiplex, grande sensibilité
- Un vaste choix d'enceintes acoustiques, de magnétophones et de platines
- Tourne-Disques
- ... et son téléviseur couleurs 66 cm

Démonstration permanente :
21, rue Charles-Lecocq PARIS 15^e - Tél. 828.41.29
Documentation D4 sur demande

RAPY

**CASQUE DYNAMIQUE
HAUTE-FIDELITE
« ELEGA »**



**Modèle Stéréophonique
DR 66 C/DR 80 C**

Casque d'écoute agréable à porter. Très haute-fidélité grâce à sa courbe de réponse étendue. Puissance admissible importante, sans distorsion aux basses fréquences.

Caractéristiques :

Impédance : 2 × 8 ohms.
Autres impédances : à la demande.
Bande passante : 25 à 17 000 Hz.
Puissance admissible : 0,5 W.
Poids : 380 g.

DEMANDEZ
LA DOCUMENTATION SPÉCIALE 69-34-05
ET GÉNÉRALE 69-40-01
SUR TOUS NOS CASQUES
RAPPORT MAXIMUM = QUALITÉ/PRIX

Distributeur exclusif
pour la France



127, avenue de la République
92-CHATILLON - Tél. 253-77-60 + 655-36-37

**Demandez à un véritable spécialiste de la
HAUTE-FIDELITE de vous faire écouter la chaîne**

SERVO-SOUND

**Cybernetic
HiFi**

à "circuit cybernétique"

Il vous fera découvrir un prodigieux progrès :

LA MUSIQUE A L'ETAT PUR

- ◆ sans coloration due aux enceintes (brevet Circuit Cybernétique).
- ◆ sans coloration du local d'écoute (brevet Stéréo-Crossing).
- ◆ avec les baffles électroniques miniaturisés.
- ◆ puissance de 30 à 1000 watt.

LA QUALITE musicale ne se décrit pas : elle S'ENTEND !

DOCUMENTATION ET RENSEIGNEMENTS : D.R.E. 24 rue Feydeau - 75-Paris 2^e
Tél. : 231.54.30 qui vous fera connaître son distributeur le plus proche.

Situation assurée

dans l'une
de ces

QUELLE QUE SOIT
VOTRE INSTRUCTION
préparez un

DIPLOME D'ETAT
C.A.P.-B.P.-B.T.N.-B.T.S.
INGÉNIEUR

avec l'aide du
PLUS IMPORTANT
CENTRE EUROPÉEN DE
FORMATION TECHNIQUE
disposant d'une méthode révo-
lutionnaire brevetée et des La-
boratoires ultra-modernes pour
son enseignement renommé.

branches techniques d'avenir

lucratives et sans chômage :

ÉLECTRONIQUE - ÉLECTRICITE - INFOR-
MATIQUE - PROGRAMMEUR - RADIO - TÉ-
LÉVISION - CHIMIE - MÉCANIQUE - AUTO-
MATION - AUTOMOBILE - AVIATION
ENERGIE NUCLEAIRE - FROID - BETON
ARME - TRAVAUX PUBLICS - CONSTRUC-
TIONS METALLIQUES - TELEVISION COULEUR

par correspondance et cours pratiques



Vue partielle de nos laboratoires

Stages pratiques gratuits dans les Laboratoires de l'Etablissement. Stages pratiques sur ordinateur - Possibilités d'allocations et de subventions par certains organismes familiaux ou professionnels - Toutes références d'Entreprises Nationales et Privées

Différents cours programmés. Cours de Promotion - Réf. n° ET 5 4491 et cours pratiques IV/ET. 2/n° 5204. Ecole Technique agréée Ministère Education Nationale.

DEMANDEZ LA BROCHURE GRATUITE N° A 11 à :



ECOLE TECHNIQUE
MOYENNE ET SUPÉRIEURE DE PARIS

94, rue de Paris - CHARENTON-PARIS (94)

Pour nos élèves belges : BRUXELLES : 12, av. Huart-Hamoir - CHARLEROI : 64, bd Joseph II



Quand l'air entre en vibration

Avant de parler des sons, rappelons quelques notions sommaires sur la nature des ondes sonores. Vous donnez un coup de marteau sur une tôle. Vous pincez la corde d'une guitare. Votre oreille recueille des sons. Physiquement, que se passe-t-il ? Sous l'impulsion mécanique reçue, la feuille de métal ou la corde tendue sont animées d'oscillations rapides. A chaque vibration, les molécules de l'air ambiant sont repoussées puis — l'air étant élastique — elles tendent à revenir à leur position initiale. Il se produit une série de compressions et de décompressions qui se propagent de proche en proche, comme les ondes qui courent à la surface d'une eau tranquille où l'on a laissé tomber un caillou. La propagation d'un son n'est alors autre chose que la propagation dans un milieu élastique — l'air ou un autre — d'un train d'ondes constitué par des alternances pression-dépression. Notre tympan est sensible à ces variations, qui l'enfoncent vers l'intérieur de l'oreille, pour le tirer ensuite vers l'extérieur. Nous verrons dans un autre article comment ces signaux mécaniques sont élaborés en sensation auditive.

La forme du front d'onde dépend dans une large mesure de celle de la source sonore. Une sphère pulsante émet autour d'elle des ondes sphériques, un piston vibrant à l'extrémité d'un tuyau acoustique rigide peut donner une onde plane. Ce sont des cas extrêmes. Dans la pratique, la forme de la surface d'onde est souvent difficile à déterminer.

Par contre, le temps que met l'onde sonore pour parcourir une distance donnée dans un milieu homogène est absolument constant, quelle que soit la source sonore. Le langage courant appelle volontiers « vitesse » du son la distance qu'il parcourt en une seconde. Les physiciens préfèrent parler de *célérité*, car la valeur ainsi définie ne caractérise pas un déplacement de matière, mais la transmission d'un mouvement. Dans l'air sec à 0 °C, la célérité du son est de 331,6 mètres/seconde. Il est vrai que les molécules d'air (ou éventuellement d'un autre milieu élastique) se déplacent effectivement de part et d'autre de leur position d'équilibre. Leur distance à la position d'équilibre, à un moment donné, s'appelle l'élongation. La vitesse avec laquelle s'effectue ce mouvement varie avec le temps ; elle est nulle à l'instant de l'élongation maximale, lorsque la molécule va repartir en sens contraire (tout comme le mouvement d'un pendule au sommet de sa course). Mais cette vitesse vibratoire des particules aériennes autour de leur point d'équilibre ne doit pas être confondue avec la « vitesse » de propagation du son dans le milieu, à laquelle il vaut donc mieux garder le nom de *célérité*.

Lorsque le corps vibrant se retrouve dans la même position à des intervalles de temps égaux, l'onde sonore présente un caractère périodique : toutes les grandeurs qui la caractérisent (élongation, vitesse, accélération) se retrouvent identiques à elles-mêmes à des intervalles de temps correspondant à la *période* (ou cycle) du phénomène. Le nombre de périodes par unité de temps constitue la *fréquence*. L'unité de fréquence est le hertz (Hz), ou période par seconde.

La fréquence varie selon les caractéristiques de la source vibrante. La note la plus basse du piano vibre à une trentaine de Hz. A la limite de l'aigu audible, le cri de la fauvette et certains sifflets engendrent des

trains d'ondes de 15 000 à 20 000 Hz (15 à 20 kHz).

La *longueur d'onde* représente la distance minimale de deux points matériels d'un même milieu se trouvant dans le même état vibratoire, ou, si l'on préfère, à la même phase de la période de vibration. Tout comme pour les rayonnements électromagnétiques, la longueur d'onde est liée à la fréquence par une relation constante : leur produit est égal à la célérité du son dans le milieu donné (comme le produit de la fréquence par la longueur d'onde d'un rayonnement électromagnétique est égal à la vitesse de la lumière). Lorsque la fréquence augmente, la longueur d'onde diminue. Enfin l'amplitude est l'élongation maximale, autrement dit la distance qu'une particule matérielle soumise aux vibrations du champ acoustique parcourt de part et d'autre de sa position d'équilibre.

Dans le cas des sons musicaux purs, comme ceux qu'émet un diapason, la courbe qui représente les déplacements de la particule vibrant autour de sa position d'équilibre est une *sinusoïde*. Les oscillations sinusoïdales sont fréquentes parmi les phénomènes naturels. Le célèbre mathématicien Fourier a démontré que tout phénomène périodique peut se décomposer en une somme d'oscillations sinusoïdales aux fréquences multiples de la plus faible d'entre elles, dite *fondamentale* ; les autres sont les *harmoniques*.

La notion de phase

Si deux émetteurs distincts produisent des ondes sinusoïdales de même fréquence et de même amplitude, ces ondes peuvent ne pas produire, au même instant, la même variation de pression en un point donné. On dit qu'elles ne sont pas en concordance de phase. C'est le cas le plus général. Mais il peut y avoir deux cas particuliers. Le premier est celui où, en un point donné de l'espace, les maxima et les minima des deux ondes coïncident : elles sont en concordance de phase. Le second cas est celui où les maxima d'une des ondes coïncident avec les minima de l'autre : elles sont en opposition de phase.

Quand un point de l'espace reçoit des ondes sonores de même fréquence provenant de plusieurs sources, l'amplitude de la vibration à un instant donné est la somme des

amplitudes que produirait séparément chaque onde. Si les ondes sont en concordance de phase, les amplitudes s'ajoutent. Si elles sont en opposition de phase, elles se retranchent ; au cas où elles sont égales, la somme est nulle, il n'y a aucun son au point considéré ; ces phénomènes d'interférence sont connus aussi bien avec les ondes électromagnétiques, lumière ou radio.

Toujours comme les ondes électromagnétiques, les ondes sonores, quand elles rencontrent un milieu différent de celui où elles se propagent, subissent des phénomènes de diffraction, de réfraction et de réflexion. Ce dernier se produit notamment quand l'onde sonore rencontre un mur : dans un local clos (pièce d'habitation, salle de concert), l'auditeur perçoit, en même temps que le son émanant directement de la source (voix humaine, instrument de musique, haut-parleur...), des ondes réfléchies (ou *réverbérées*) dont le déphasage varie avec la distance qu'elles ont parcourue. En certains points de l'enceinte, et pour certaines fréquences, il se produit des maxima d'amplitude sonore si les ondes directes et réfléchies y parviennent en concordance, ou des minima si elles sont en opposition de phase. Avec un message sonore modulé (c'est-à-dire variable en amplitude et/ou en fréquence), lorsque le déphasage dépasse le dixième de seconde, le message sonore direct et le message réverbéré sont perçus distinctement : c'est l'écho.

Propagation dans les différents milieux

L'onde acoustique est une modification de l'état physique du milieu qui se propage de proche en proche, chaque particule matérielle agissant sur une particule voisine. Elle ne se transmet donc pas dans le vide, mais seulement dans un fluide ou un solide élastique, avec des célerités qui dépendent des propriétés physiques du milieu.

Dans un solide, la célerité du son est donnée par une formule où entrent en jeu la masse volumique et une quantité appelée module d'Young, qui caractérise la capacité de déformation élastique du solide. Le plomb transmet le son à 2 200 m/s, l'acier à 6 000 m/s.

Avec les fluides, il faut tenir compte des coefficients de compressibilité, avec ou sans échange de chaleur entre le milieu loca-

lement ébranlé et le milieu ambiant. La célerité varie avec la température du milieu. Dans l'air à 0 °C, nous avons vu qu'elle est d'environ 331 m/s ; dans l'eau pure à 4 °C, de 1 500 m/s.

L'onde sonore produit des variations locales de pression, par rapport à la pression ambiante : c'est la *pression acoustique*, mesurée en pascals. Elle transporte de l'énergie, d'où les notions de *puissance acoustique*, mesurée en watts, et d'*intensité acoustique* (nombre de watts par m²). La puissance et l'intensité acoustique sont proportionnelles à la fois au carré de l'amplitude et au carré de la fréquence.

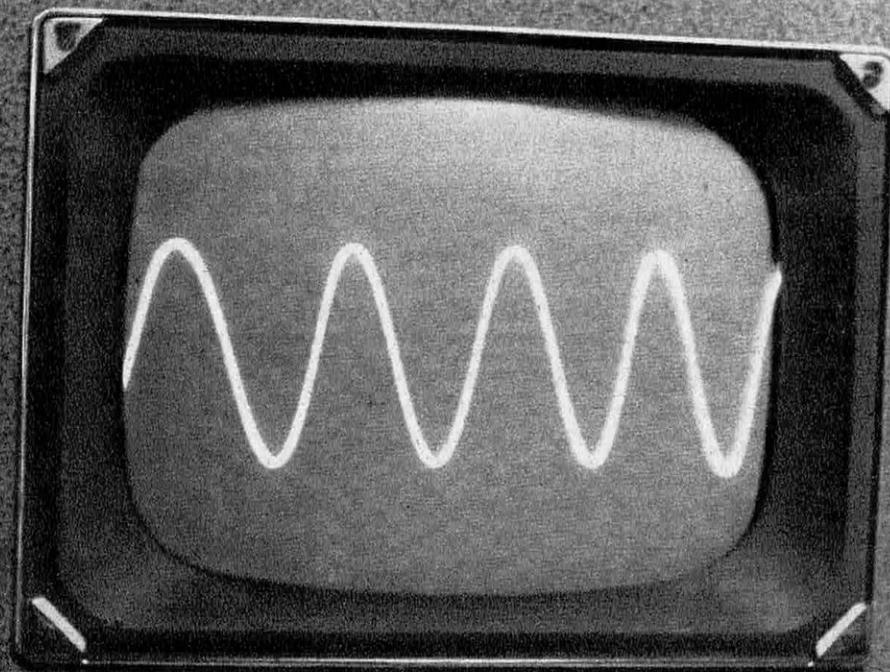
L'étude de la transmission des vibrations sonores sinusoïdales à des systèmes mécaniques (chaîne des osselets dans l'oreille, membrane de haut-parleur) fait apparaître — par analogie avec les courants électriques alternatifs sinusoïdaux — la notion d'*impédance acoustique*, quotient de la pression acoustique par le flux de vitesse acoustique (ce flux est le produit de la surface par la vitesse vibratoire) ; *impédance mécanique*, quotient de la force appliquée à un système par la vitesse vibratoire existant au point d'application de la force ; *impédance intrinsèque* (ou *résistivité acoustique*), produit de la masse volumique par la célerité du son. Les modalités du passage de l'onde sonore d'un milieu dans un autre dépendent dans une large mesure du rapport des impédances des deux milieux. Dans ce cas, en effet, une partie de l'énergie acoustique est réfléchie par l'interface des deux milieux, une autre est absorbée, une autre enfin se propage dans le nouveau milieu, le tout selon des lois comparables à celles de l'optique.

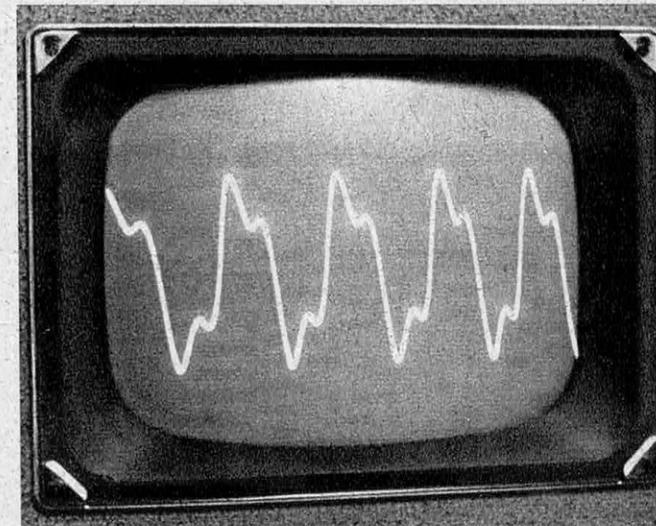
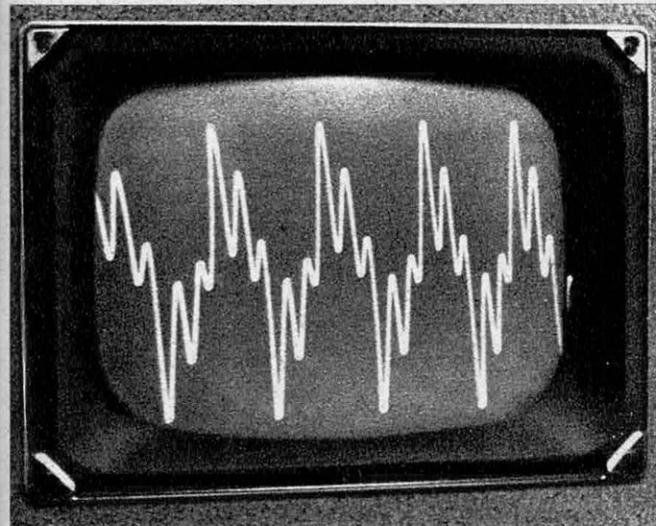
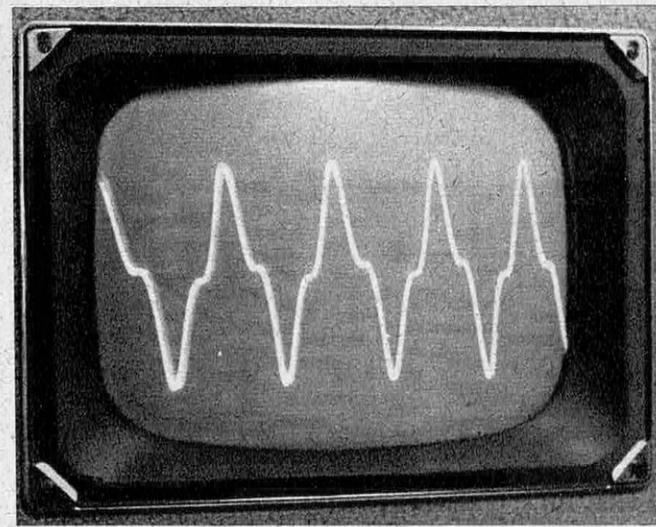
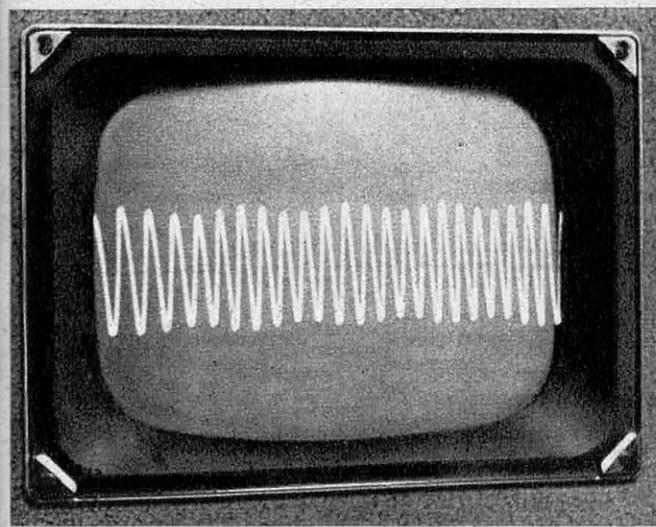
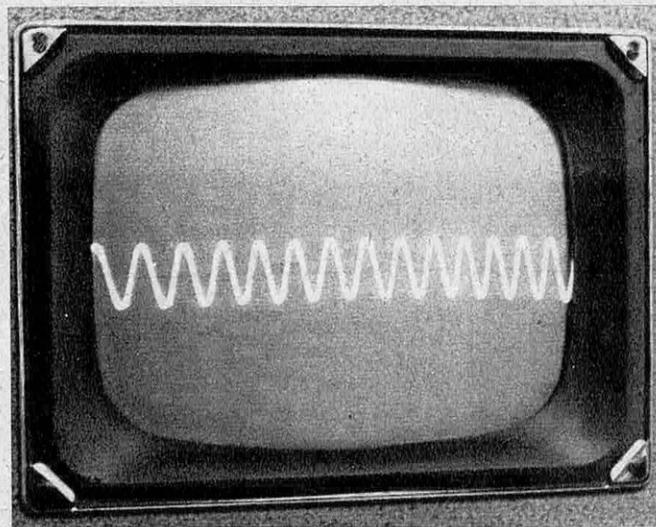
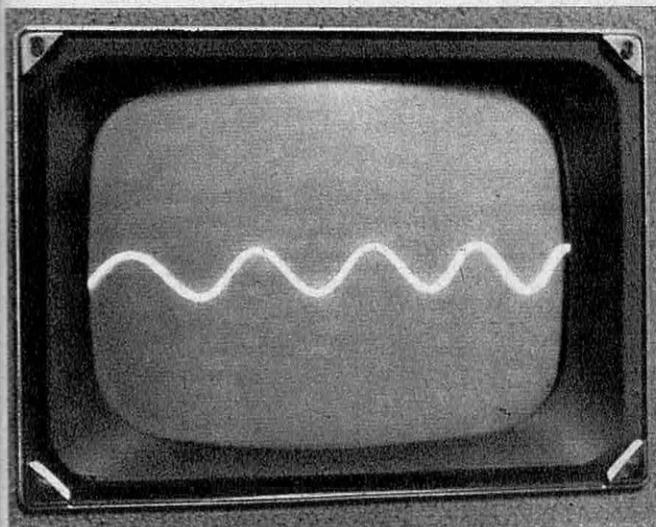
Décibels, phones et sones

Les puissances acoustiques auxquelles est sensible l'oreille humaine varient dans d'énormes proportions : la plus faible est un million de fois moins grande que la plus forte. Aussi, pour les mesurer, a-t-on choisi une unité logarithmique, ce qui réduit considérablement le nombre de graduations de l'échelle et la rend bien plus pratique que serait, par exemple, une échelle graduée en watts. Pour honorer la mémoire de Graham Bell, l'inventeur du téléphone, les ingénieurs américains des télécommunications

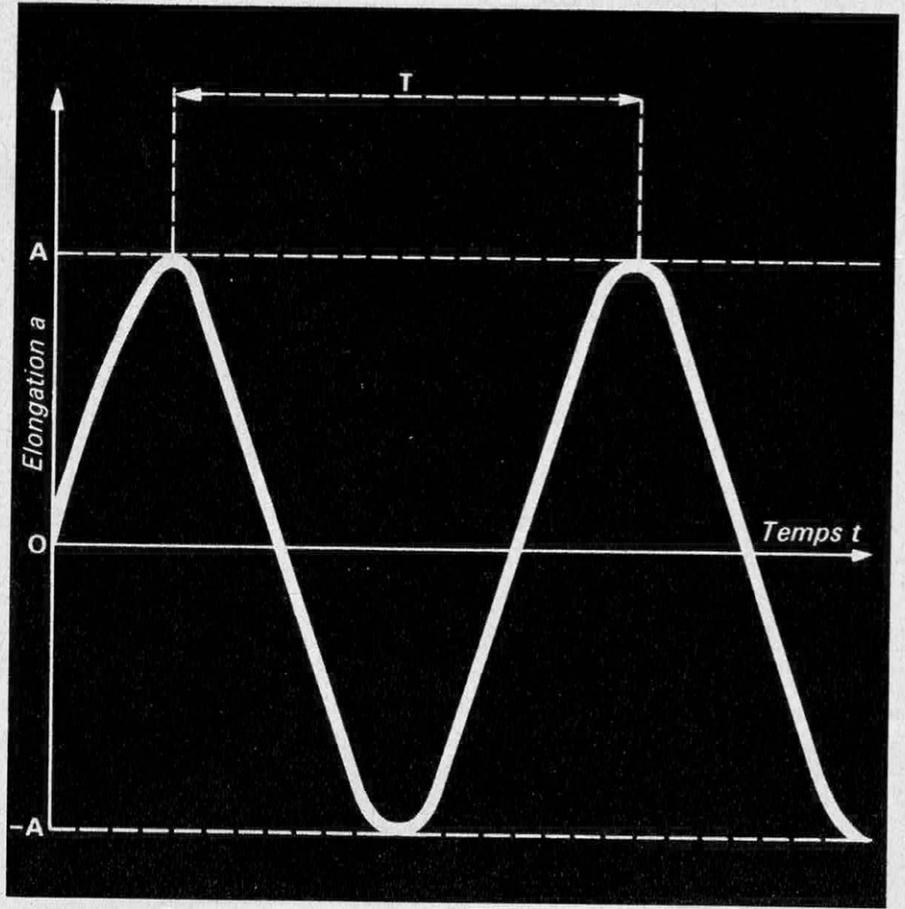
Devant les visiteurs du Palais de la Découverte, cet appareil fait apparaître sur un écran cathodique la courbe correspondant au son qu'il émet simultanément. Le tracé sinusoïdal qu'on voit d'abord ci-dessous est celui du Sol 3 pur (387 Hz), repris ci-contre à droite avec une amplitude différente. Les images suivantes correspondent à deux harmoniques impaires de cette même note (1 161 Hz et 1 935 Hz), émises isolément. Enfin, on mélange le son fondamental aux deux harmoniques: les profils composites ainsi obtenus varient lorsqu'on décale en phase les harmoniques par rapport au son fondamental.

SYNTHESE DES SONS





Représentation d'un mouvement sinusoïdal. L'intervalle de temps T entre deux élongations maximales est la période du mouvement.

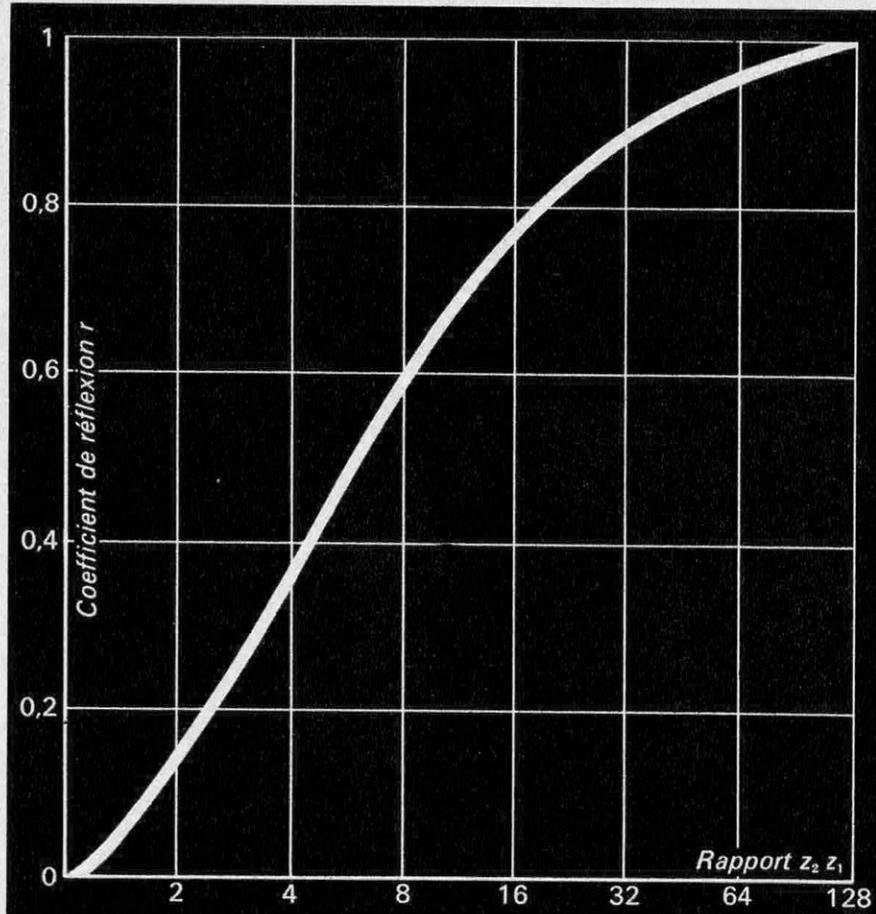


ont donc inventé le *bel*, qui est le logarithme décimal du rapport entre une puissance sonore considérée et une puissance de référence. Pratiquement, on utilise le décibel (dB) ; le nombre de décibels d'un son de puissance acoustique W_2 se définit par la formule $10 \log W_2/W_1$, cette dernière étant la puissance acoustique de référence.

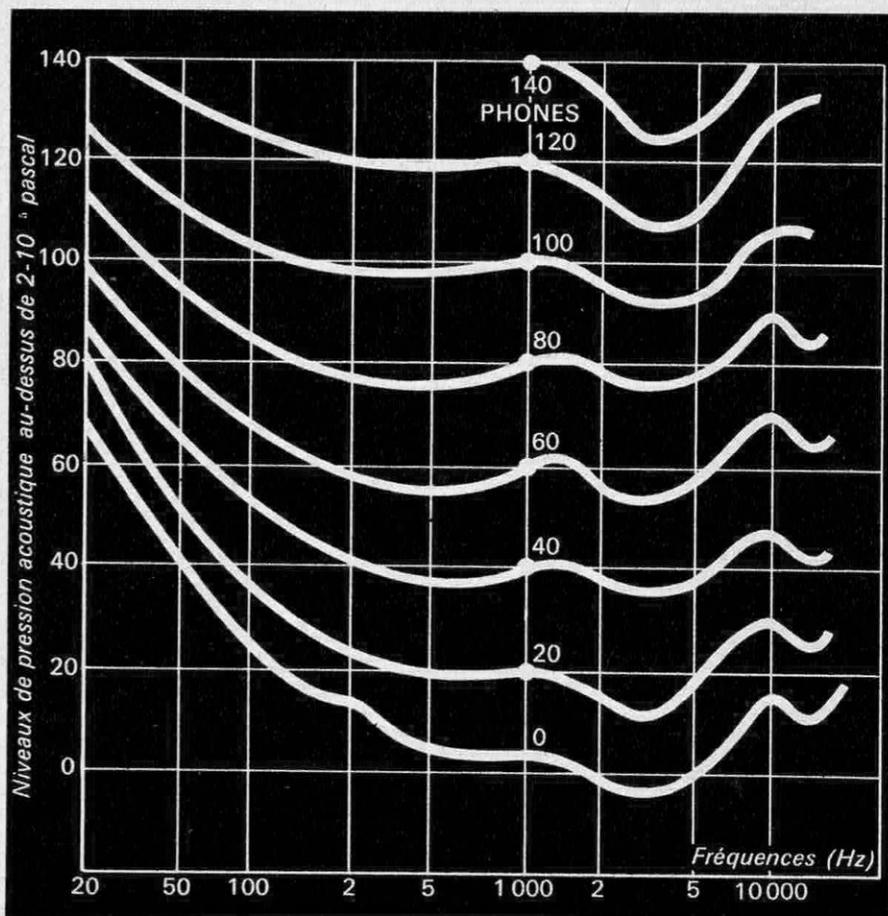
Le décibel n'exprime donc pas, dans le principe, une valeur absolue, mais un rapport entre deux puissances sonores. Or nous avons vu que la puissance acoustique est (de même que l'intensité) proportionnelle au carré de la pression acoustique, ce qui permet de transformer la formule ci-dessus en disant que le nombre de décibels est $20 \log P_2/P_1$ — P_2 et P_1 étant respectivement la pression acoustique du son considéré et une pression acoustique de référence. Il est maintenant classique en acoustique de prendre comme pression de référence une valeur P_0 adoptée sur le plan international et égale à $2 \cdot 10^{-5}$ pascal (qui correspond à peu près au seuil d'audibilité binaural pour un son de 1 000 Hz). Le nombre de décibels « absolu » est alors $20 \log$

P_2/P_0 . C'est sur cette base que sont gradués les sonomètres modernes, qui servent à mesurer les niveaux sonores. Il convient de ne jamais perdre de vue la signification logarithmique du décibel : si, par exemple, deux sources sonores atteignant chacune 50 dB viennent à s'additionner, elles produisent ensemble 53 dB (et non 100).

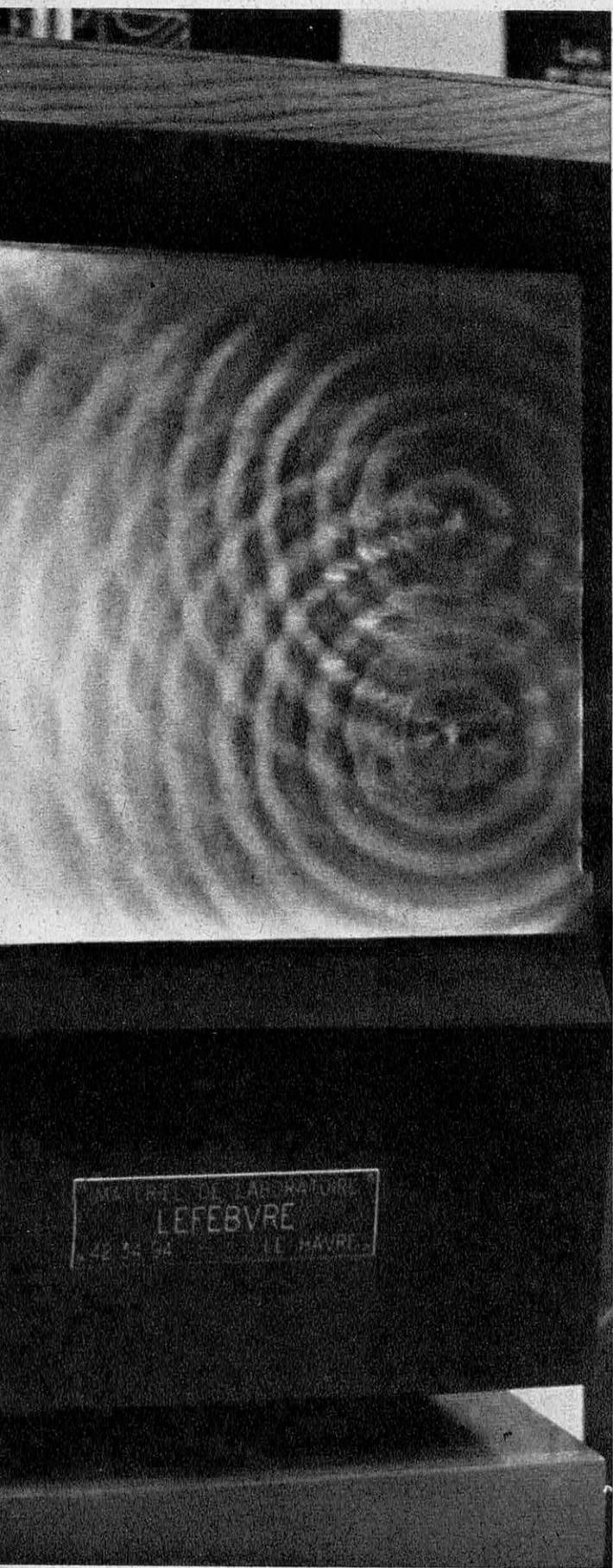
Bien que l'adoption du décibel ait été en partie inspirée par la célèbre loi (purement empirique) de Weber-Fechner, suivant laquelle toute sensation (notamment sonore) varierait comme le logarithme de l'excitation physique, le décibel demeure une unité purement physique. Le besoin de disposer d'une unité physiologique est apparu d'autant plus que la loi de Weber-Fechner ne constitue qu'une approximation plus ou moins valable dans certaines limites. C'est ainsi qu'est intervenue la notion de *sonie* ou intensité subjective d'un son. Deux sons différents par leurs caractéristiques physiques sont situés sur une même *courbe d'isononie* quand ils produisent sur l'auditeur la même impression de « force » sonore. On établit les courbes d'isononie en prenant



Variation
du coefficient
de réflexion
d'un train d'ondes
sonores
à l'interface
de deux milieux
en fonction
du rapport
des impédances
acoustiques.



Courbes d'isosonie
(d'après Robinson
et Dadson).



Toujours au Palais de la Découverte, l'appareil de synthèse des sons voisine, dans la salle consacrée aux phénomènes oscillants, avec cet autre dispositif, qui projette simplement sur un écran vertical l'image d'ondes périodiques engendrées à la surface de l'eau par deux pointes en mouvement. Les phénomènes d'interférence, bien visibles ici, se produisent de la même façon avec les ondes sonores.

comme coordonnées le niveau de pression acoustique et la fréquence ; une unité physiologique, le *phone*, caractérise le niveau d'isosonie : il est de n phones quand la sonie est jugée équivalente, par un auditeur normal moyen, à celle d'un son pur de 1 000 Hz, se propageant par ondes planes face à l'auditeur, et dont le niveau de pression acoustique est de n décibels par rapport à la pression de référence P_0 (définie ci-dessus).

On utilise aussi (notamment pour l'étude des bruits) une autre unité subjective appelée le *sone*. Sa valeur est liée à la valeur en phones par une formule arithmétique simple.

L'étude des lignes isosoniques montre, par exemple, que la pression acoustique à partir de laquelle un son est perçu est plus faible pour un son de 1 000 Hz que pour un son de 100 Hz : la différence est de l'ordre de 25 dB. Le réseau des lignes isosoniques varie aussi considérablement avec les conditions d'écoute.

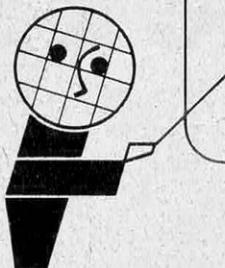
Les niveaux

La notion de décibel, définie, nous l'avons vu, comme le logarithme du rapport de deux pressions, et qui exprime le niveau de pression acoustique, peut être étendue aux niveaux de puissance et d'intensité. Si l'on choisit une grandeur de référence, on obtient un niveau absolu. Pour la puissance, le niveau de référence est 10^{-12} watt ; le niveau absolu est donné par la formule $10 \log W/W_0$, W étant le niveau considéré et W_0 le niveau de référence. Pour l'intensité, le niveau de référence I_0 est 10^{-12} watt/mètre carré ; le niveau absolu $10 \log I/I_0$. L'acoustique utilise couramment ces trois niveaux de pression, de puissance et d'intensité. Nous les verrons donc apparaître, ainsi que les unités particulières à l'acoustique (décibel, phone), dans les articles qui suivent.

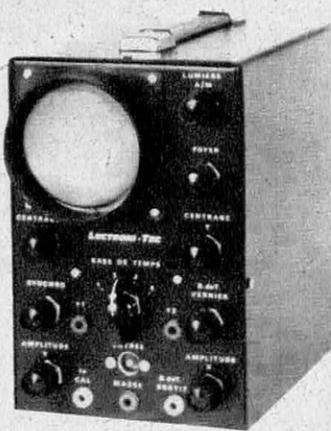
Michel ROUZÉ

L'électronique est à vous!

sans connaissances théoriques préalables,
sans expérience antérieure,
sans "maths"



notre méthode :
faire et voir

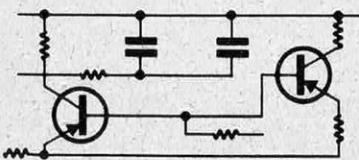


LECTRONI-TEC est un nouveau cours par correspondance, très moderne et très clair, accessible à tous, basé uniquement sur la PRATIQUE (montages, manipulations, utilisation de très nombreux composants et accessoires électroniques) et l'IMAGE (visualisation des expériences sur l'écran de l'oscilloscope).

1/ CONSTRUISEZ UN OSCILLOSCOPE

Vous construisez d'abord un oscilloscope portatif et précis qui reste votre propriété. Avec lui vous vous familiariserez avec tous les composants (radio, TV, électronique).

2/ COMPRENEZ LES SCHÉMAS



de montage et circuits employés couramment en électronique.

3/ ET FAITES PLUS DE 40 EXPÉRIENCES

Avec votre oscilloscope, vous vérifierez le fonctionnement de plus de 40 circuits : action du courant dans les circuits, effets magnétiques, redressement, transistors, semi-conducteurs, amplificateurs, oscillateur, calculateur simple, circuit photo-électrique, récepteur radio, émetteur simple, circuit retardateur, commutateur transistor, etc.

Après ces nombreuses manipulations et expériences, vous saurez entretenir et dépanner tous les appareils électroniques : récepteurs radio et télévision, commandes à distance, machines programmées, ordinateurs, etc.

gratuit!

Pour recevoir sans engagement notre brochure couleurs 32 pages, remplissez (ou recopiez) ce bon et envoyez-le à LECTRONI-TEC, 35 - DINARD (FRANCE)

NOM (majuscules SVP) _____ SVS 12

ADRESSE _____

GRATUIT : un cadeau spécial à tous nos étudiants

(Envoyez ce bon pour les détails) _____

LECTRONI-TEC
RENDE VIVANTE L'ÉLECTRONIQUE !

25 ans de numéros hors série



Pour vous aider à retrouver nos principaux sujets, nous les avons classés par ordre numérique. Vous pourrez ainsi, soit compléter votre collection, soit commander les volumes qui vous intéressent à l'aide du bon spécial qui figure ci-contre.



- N° 11 1950 Astronomie
- N° 20 1952 Les vacances
- N° 22 1952 Astronautique
- N° 24 1953 Aviation 1953
- N° 25 1953 Auto 1953/54
- N° 29 1954 Auto 1954/55
- N° 31 1955 Les Arts Ménagers
- N° 32 1955 Photo et Cinéma
- N° 34 1956 Électricité
- N° 36 1956 Auto 1956/57

- N° 40 1957 Agriculture
- N° 42 1958 La Vitesse
- N° 43 1958 Le Sahara
- N° 44 1958 Auto 1958/59
- N° 45 1959 Médecine-Chirurgie
- N° 46 1959 Habitation
- N° 47 1959 Aviation 1959
- N° 48 1959 Auto 1959/60
- N° 49 1959 Électronique
- N° 50 1960 L'Homme dans l'Espace

- N° 62 1963 Week-End 1963
- N° 63 1963 Aviation 63
- N° 64 1963 Auto 1963/64
- N° 65 1963 Radio-Télévision
- N° 66 1964 Photo
- N° 68 1964 Auto 1964/65
- N° 69 1964 L'Automatisme
- N° 70 1965 Aviation 1965
- N° 71 1965 Auto 1965/66
- N° 72 1965 De la Cellule à l'Homme



la mer



- N° 85 1969 Les Greffes
- N° 86 1969 A la conquête des Océans
- N° 87 1969 Aviation 1969
- N° 88 1969 La Lune
- N° 89 1969 L'Automobile 1969/70
- N° 90 1970 Photo 1970
- N° 91 1970 Navigation de plaisir
- N° 92 1970 Météo
- N° 93 1970 Auto 1970/71
- N° 94 1970 Le Son
- N° 95 1970 à paraître : L'aviation



- N° 51 1960 La Mer
- N° 52 1960 Auto 1960/61
- N° 53 1960 Chemins de Fer
- N° 54 1961 Aviation 1961
- N° 55 1961 Énergie
- N° 56 1961 Auto 1961/62
- N° 57 1961 Photo-Cinéma
- N° 58 1962 Musique
- N° 59 1962 Astronomie
- N° 60 1962 Auto 1962/63
- N° 61 1963 Électricité

- N° 73 1966 Les Chemins de Fer 1966
- N° 74 1966 Habitation
- N° 75 1966 Photo-Ciné
- N° 76 1966 Auto 1966/67
- N° 77 1967 L'Espace
- N° 78 1967 Aviation 1967
- N° 79 1967 Auto 1967/68
- N° 80 1967 Photo
- N° 81 1968 Télévision
- N° 83 1968 Transport Aérien
- N° 84 1968 L'Auto et la Motocyclette



COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION

De nombreux lecteurs désireux de compléter leur collection ne parviennent pas à trouver les numéros manquants. Ceux-ci sont disponibles à notre service de vente et leur seront expédiés à réception de leur commande accompagnée du règlement. Écrire à :

SCIENCE & VIE « PROMOTION 1 », 32, boulevard Henri-IV - PARIS 4^e - tél. 887.35.78

Nom :

Adresse :

Numéros demandés :

Ci-joint mon règlement : F

(F 5. - par numéro, plus 10 % du montant de la commande pour frais d'envoi).

Chèque bancaire

Chèque postal

(CCP 91.07, centre PARIS)

Mandat-lettre

A l'ordre de Excelsior-Publications

Aucun envoi ne pourra être fait contre remboursement

CONSERVEZ VOTRE COLLECTION

Pour vous permettre de garder vos numéros de SCIENCE & VIE, mensuels et hors-série, nous avons édité des reliures permettant chacune la conservation de 6 numéros. Celles-ci sont disponibles à notre service de vente et vous seront expédiées à réception de votre commande accompagnée du règlement. Écrire à :

SCIENCE & VIE Hors-Série « PROMOTION 1 », 32, boulevard Henri-IV - PARIS 4^e - tél. 887. 35.78

Nom :

Adresse :

Reliures demandées :

(les reliures sont obligatoirement expédiées par multiples de deux - F 14,15 pour deux reliures, port compris).

Chèque bancaire

Chèque postal

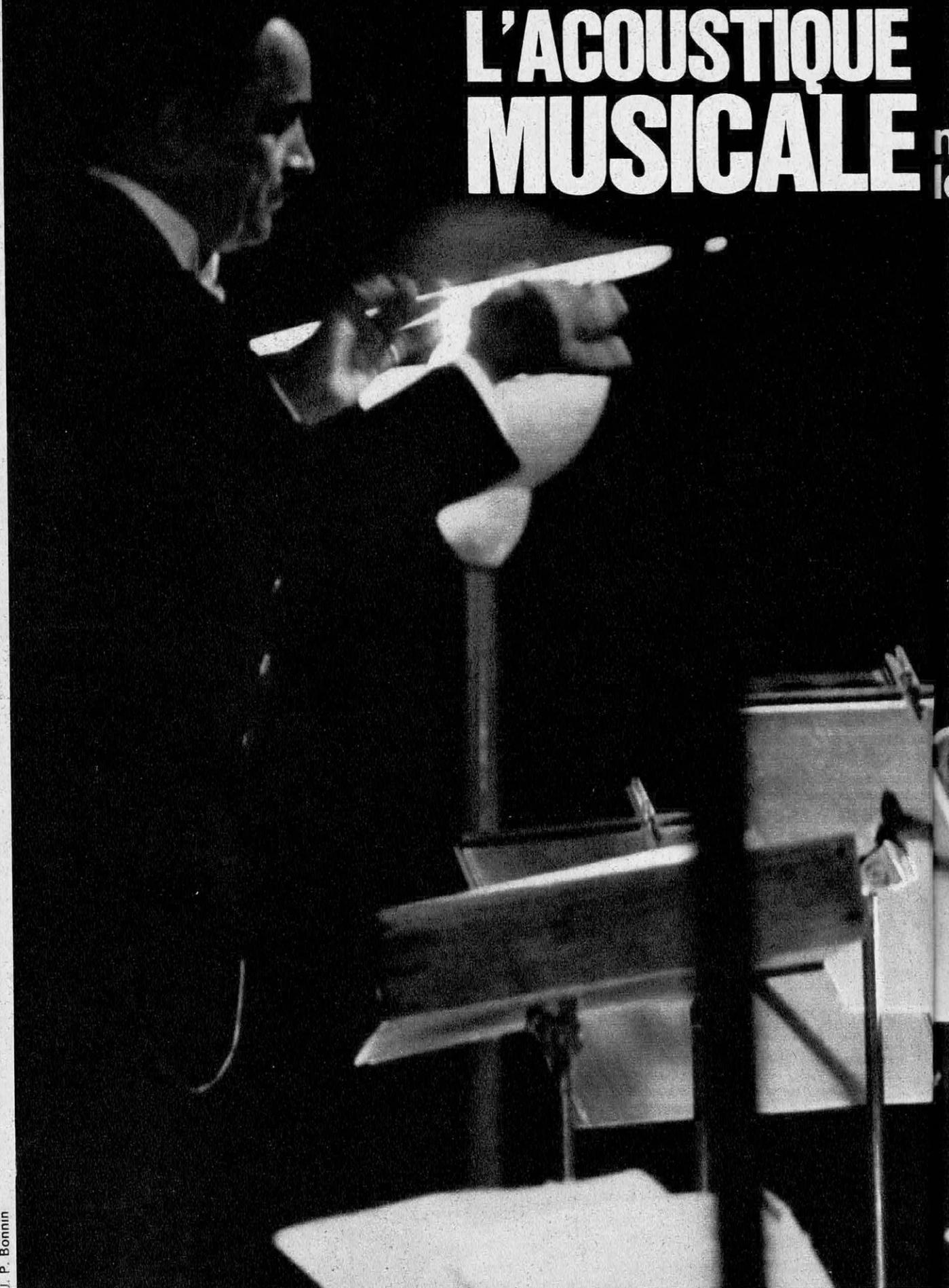
(CCP 91.07, centre PARIS)

Mandat-lettre

A l'ordre de Excelsior-Publications

Aucun envoi ne pourra être fait contre remboursement.

L'ACOUSTIQUE MUSICALE



nous révèle les sons réels

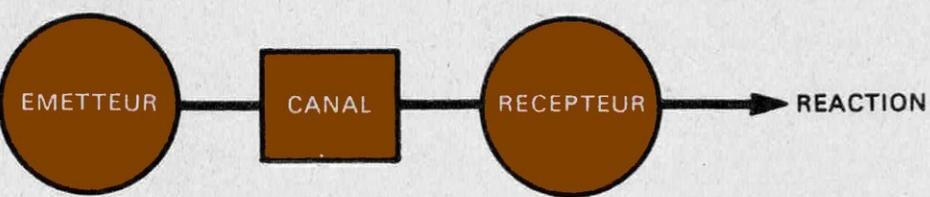
L'ongtemps négligée, l'Acoustique est devenue en peu de décennies une science moderne, en pleine expansion. En 1959, au Congrès International d'Acoustique (ICA) qui se réunit tous les trois ans, 350 communications furent présentées ; en 1965, il y en eut 424. Ces communications se répartissent en diverses spécialités, de rentabilité immédiate, donc d'importance, très variable. En 1965, pour un ensemble de 242 communications, dix seulement étaient consacrées à l'acoustique musicale.

Nous voici déjà au cœur du sujet : l'acoustique musicale se classe parmi les parents pau-

vres de la famille. Lorsqu'un spécialiste avoue s'en occuper, on le considère généralement comme un original, avec une nuance d'ironie, si ce n'est de commisération. Les scientifiques le soupçonnent d'être un « artiste », avec tout ce que cela sous-entend de leur part, en général ; les musiciens le tiennent pour un « mathématicien », un « physicien », dont les travaux, d'ailleurs inintelligibles, n'ont aucune signification pour leur art.

L'acoustique est une science exacte, la musique un art, échappant à la mesure précise, parce que liée à des problèmes psycho-physiologiques, sociologiques, etc. Est-il possible de concilier les deux termes ? Pythagore, à qui l'on attribue la paternité de l'acoustique musicale, avait formulé des lois relatives aux rapports numériques simples qui régissaient, pensait-il, l'échelle musicale utilisée à l'époque. Il prétendait aussi trouver dans la musique une explication de l'univers, car la musique est

La musique est un message. Sa transmission suppose, dans le cas le plus général, un émetteur, un canal de transmission, un récepteur. Le résultat final est une réaction, provoquée au niveau du récepteur



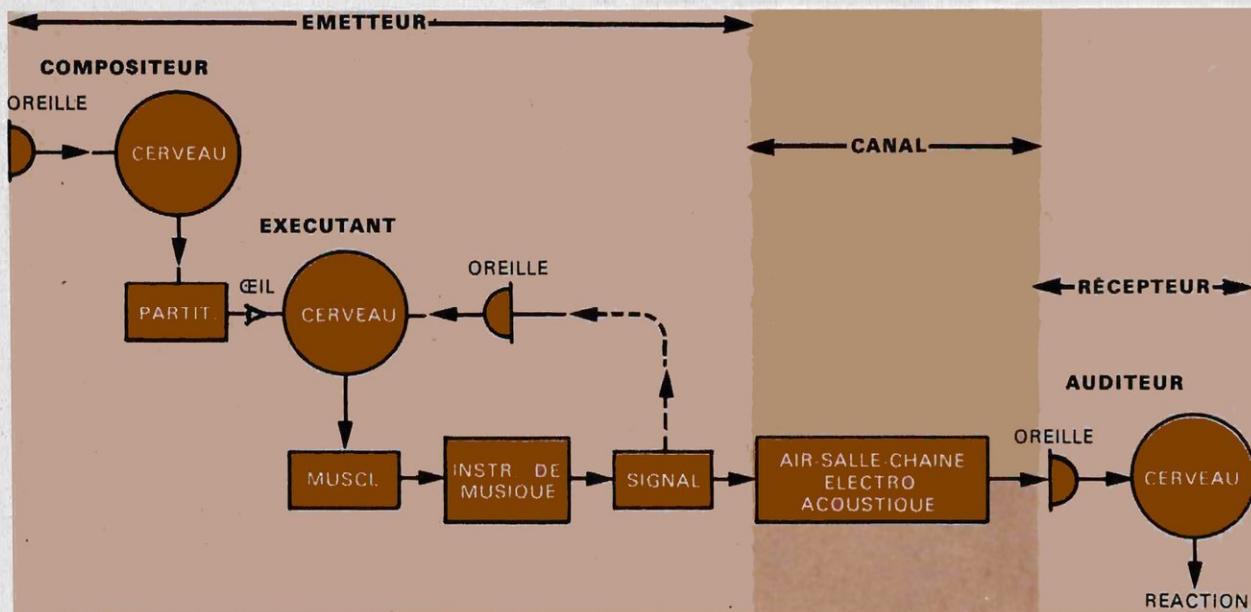
nombre, et « le nombre est l'âme du monde ». Ses démonstrations se faisaient à l'aide du sonomètre à corde, où, effectivement, les rapports des longueurs vibrantes correspondent aux divers intervalles musicaux et fournissent les rapports numériques désirés.

Les idées de Pythagore, de ses disciples directs, et d'autres acousticiens des temps anciens, plus ou moins teintées de cosmogonie et de métaphysique, furent enseignées largement au Moyen Age. La Renaissance les reprit avec une passion qu'attestent les disputes qui opposèrent le compositeur Vincenzo Galilei (père de l'illustre Galilée) à son émule Gioseffo Zarlino. Jusqu'à l'orée du 18^e siècle, l'acoustique musicale resta ainsi le domaine de spéculations numérologiques sur les gammes, mêlées de tentatives variées pour justifier le fait musical. Avec Sauveur, en 1700, apparaissent les premiers signes d'une acoustique musicale expérimentale, rejoignant la physique. Au début du 19^e siècle, des scientifiques, comme F. Savart, firent quelque peu avancer la question. Toute une pléiade de chercheurs s'intéressa dès

lors à l'acoustique musicale. Le plus illustre reste sans contredit Helmholtz, qui publia, en 1862, la première édition de son ouvrage célèbre, dont la cinquième édition (1896) prit ce titre significatif : *La science des sensations sonores comme base de la théorie de la musique*. Helmholtz était physicien, mathématicien, physiologiste : avec lui l'acoustique musicale devenait une science exacte.

Elle est restée cependant stagnante, presque jusqu'à nos jours.

Les causes de cette longue immobilité sont nombreuses. La principale tient certainement à la nature même des phénomènes étudiés. Un son, musical en particulier, est un phénomène fluctuant, insaisissable, qui disparaît sitôt produit. Longtemps on n'a disposé d aucun moyen pour le fixer, le matérialiser, le visualiser sur un document qui permette de l'observer à loisir, de le mesurer. On ne pouvait que décrire les sons à travers les traces qu'ils laissent dans la mémoire, après leur passage dans le système auditif. Or, nous savons maintenant que notre système auditif n'est pas, contrairement à ce



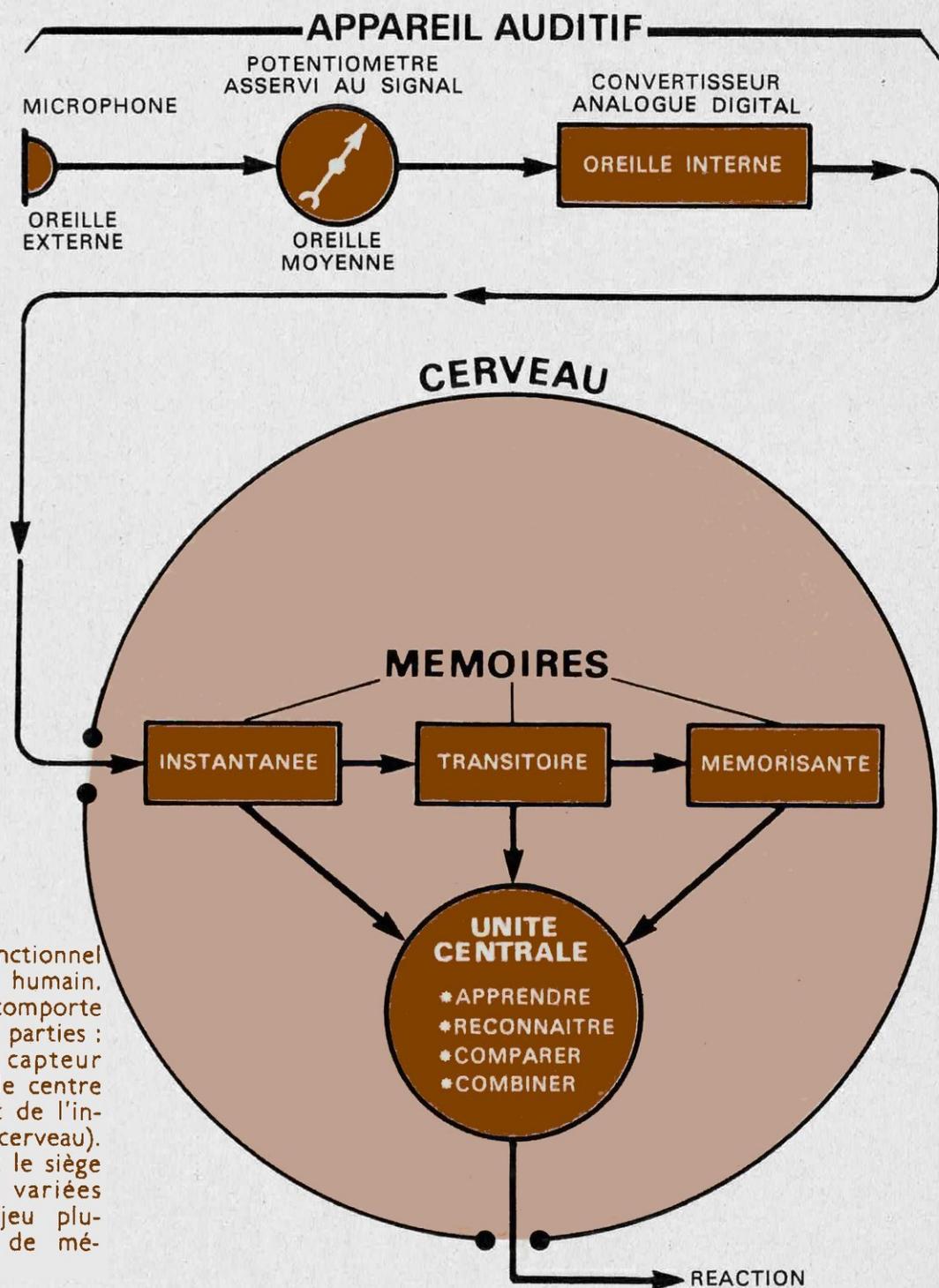
Les trois éléments fondamentaux de la chaîne de transmission se décomposent en de nom-

breux maillons, mais il est illusoire de vouloir saisir la musique en les étudiant un à un.

que l'on a longtemps soutenu, un appareil de mesure de fréquences, de niveaux sonores ou de temps. Personne au monde n'est capable, en entendant un son musical, de dire : « Ce son a une fréquence fondamentale de 534 Hz, une intensité de 76 décibels, une durée de 148 millisecondes, il comporte 37 harmoniques dont voici les fréquences et les intensités relatives... »

On peut dès lors se demander comment l'homme réussit à décrypter le monde sonore qui

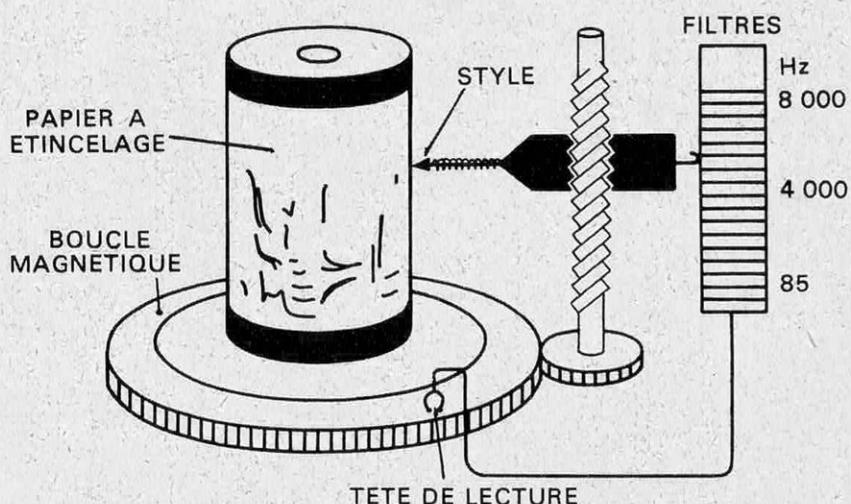
l'environne en se servant uniquement de son oreille. Car il n'est pas douteux, l'expérience le montre, qu'un musicien, par exemple, est capable de repérer dans un son compliqué et évolutif des nuances parfois si fines que nos appareils les plus modernes ne réussissent pas à les mettre en évidence. Pour expliquer ce fait, il suffit de considérer que les problèmes d'audition ne sont pas des problèmes de mesure, mais des problèmes de *reconnaissance de formes*. Pour reconnaître un individu, nous n'avons nul be-



Un modèle fonctionnel du récepteur humain. Celui-ci comporte deux grandes parties : le système capteur (l'oreille) et le centre de traitement de l'information (le cerveau). Ce centre est le siège d'opérations variées mettant en jeu plusieurs types de mémoires.



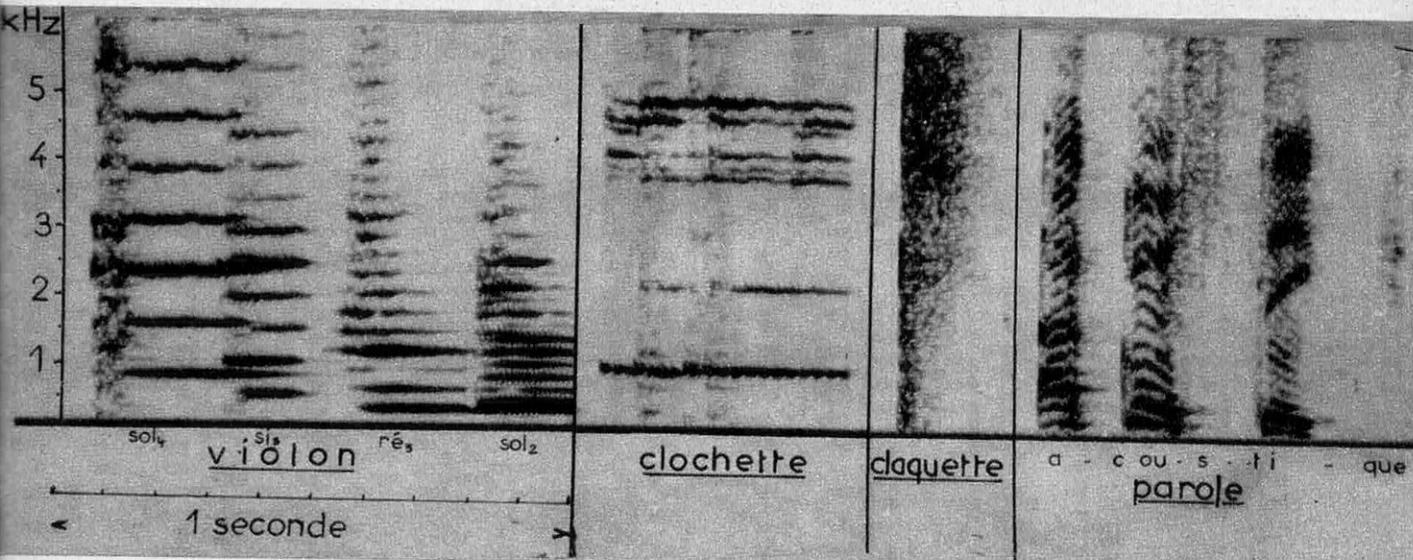
Le sonographe est l'appareil de base de l'acousticien musical. Une séquence musicale, par exemple, est enregistrée sur une boucle magnétique « sans fin », explorée du grave vers l'aigu grâce à une série de filtres. Lorsqu'une fréquence déterminée se trouve ainsi détectée, une étincelle inscrit un point sur le papier enroulé autour du cylindre. L'ensemble des points réalise une « image » acoustique de la séquence musicale considérée.



soin de connaître sa taille, la composition spectrale de la couleur de ses cheveux, son tour de poitrine. Il suffit d'en avoir enregistré quelque part en mémoire l'image globale. Dès lors, si le même individu revient dans notre champ visuel, nous allons comparer l'image qu'il produit avec celle qui est en mémoire et apprécier le nombre de points communs : nous allons faire de la *corrélation*. Un taux de corrélation de 100 % nous permet de dire : « c'est lui » ; un taux un peu plus faible : « c'est quelqu'un qui lui ressemble ». Un taux de corrélation nul : « ce n'est pas lui ». Il en est

exactement de même pour les « images sonores ». Si nous en avons mémorisé beaucoup, nous allons pouvoir les reconnaître, faire entre elles de la combinatoire, sans passer par des mesures. On comprend dès lors pourquoi les recherches de physique proprement dite n'ont jamais pu trancher les problèmes de l'acoustique musicale et ceux de l'acoustique tout court. Il faut penser non point physique, mais *informatique*.

Nous insistons dès le départ sur ces mécanismes que nous avons tenté de mettre en lumière au cours de ces dernières années. En



Des «sonagrammes» obtenus à l'aide, successivement, d'un violon, d'une clochette, d'une claquette, et d'une phrase. Les images, à chaque fois différentes, sont très caractéristiques. Le Sol du violon comporte un crachement à l'attaque; le son proprement dit com-

porte au moins sept harmoniques dont l'intensité est fonction de la grosseur du trait. Les harmoniques sont ici équidistants, contrairement aux «partiels» de la clochette. La parole, quant à elle, est un signal très évolutif et d'une grande complexité.

tout cas, retenons qu'il a été impossible de progresser en acoustique tant qu'on n'a pas su d'abord concrétiser, visualiser les sons sous l'aspect *d'images*.

L'apport de l'électroacoustique

Pour atteindre ce but, il a fallu l'apparition de la lampe amplificatrice, puis celle du magnétophone, puis celle des analyseurs instantanés du type sonagraph (dont nous parlerons plus loin) et de tous les appareillages électroacoustiques modernes. Il ne suffit pas cependant, pour faire progresser une science, de disposer d'appareils de mesure et d'enregistrement. Encore faut-il mettre au point des méthodes adéquates pour en utiliser et exploiter les possibilités, ce qui suppose l'existence préalable de bases théoriques. Celles-ci nous ont heureusement été fournies au bon moment par les spécialistes de la théorie de l'information, et, plus récemment, par ceux de l'informatique. Tout cela ne date pas d'un quart de siècle. Une autre difficulté, et non des moindres, réside dans la diversité des connaissances requises : l'acoustique musicale est par définition une science interdisciplinaire. Le spécialiste devrait au moins posséder la terminologie et les connaissances fondamentales dans les domaines les plus variés : physique, mécanique, facture instrumentale, jeu instrumental, psycho-physiologie perceptive, sociologie,

ethnologie, musique (bien entendu), acoustique des salles, électroacoustique, informatique... La tâche s'avère difficile ; et, pour le comprendre mieux encore, il n'est que de considérer la chaîne de communication d'un message musical.

La chaîne de communication

La musique est un message, c'est-à-dire une information qu'un homme (l'émetteur) veut communiquer à un autre (le récepteur). Un message ne peut atteindre son but que s'il existe entre l'émetteur et le récepteur une convention réciproque et une possibilité matérielle de représenter ce qu'on veut signifier par un signal objectif quelconque. Ce signal, en musique, est une «forme acoustique», une «image» sonore, sur laquelle nous reviendrons. Il passe nécessairement dans *un canal*, placé entre l'émetteur et le récepteur, et dont on sait d'avance qu'il va être la cause de déformations variées, ainsi que de l'adjonction d'un bruit de fond. L'important est que le signal atteigne le récepteur en assez bon état pour être reconnu, sinon la réaction prévue n'a pas lieu. Cette réaction peut être physiologique, musculaire ou psychologique. Si nous détaillons cette chaîne de communication, en intercalant les maillons intermédiaires les plus importants, nous mettons en évidence tous les problèmes que le spécialiste en acous-

tique musicale verra se dresser devant lui. Car on ne saurait comprendre la réaction finale du récepteur en ne s'intéressant qu'à un seul ou à quelques maillons isolés de la chaîne.

1) *L'émetteur* comporte lui-même plusieurs maillons. Il y a d'abord le compositeur. Celui-ci ne peut transmettre un message que s'il a lui-même stocké dans sa mémoire des sons organisés qu'il sait reconnaître, et des règles d'assemblage et d'exclusion de ces sons, règles connues également du récepteur qui, sans cela, serait incapable de déchiffrer le message. Le compositeur matérialise son message à l'aide de signes graphiques arbitraires qu'il a appris, et que le musicien exécutant doit savoir décoder. Pour celui-ci la partition ne représente jamais qu'un programme de mouvements musculaires complexes. Les forces développées par ses muscles agissent sur une machine à fabriquer des sons, l'instrument de musique, qui émet un signal acoustique. Ce signal suit normalement deux chemins. Une voie retourne vers l'oreille de l'exécutant, lui permettant de régler son jeu, l'autre entre dans le « canal ».

2) *Le canal*. Dans le cas le plus simple, c'est le canal aérien. Les vibrations de l'instrument se communiquent de proche en proche jusqu'à l'oreille du récepteur. Le canal aérien filtre les sons de façon variable, selon la distance entre instrument et récepteur, et aussi selon la structure fréquentielle des sons. Il y ajoute son propre bruit de fond, susceptible de masquer plus ou moins le signal, mais le canal aérien peut être limité par des parois (comme c'est le cas dans une salle). Tout devient dès lors beaucoup plus compliqué, car il se produit sur ces parois des réflexions variées, qui brouillent le message.

A la place du canal aérien direct, on peut

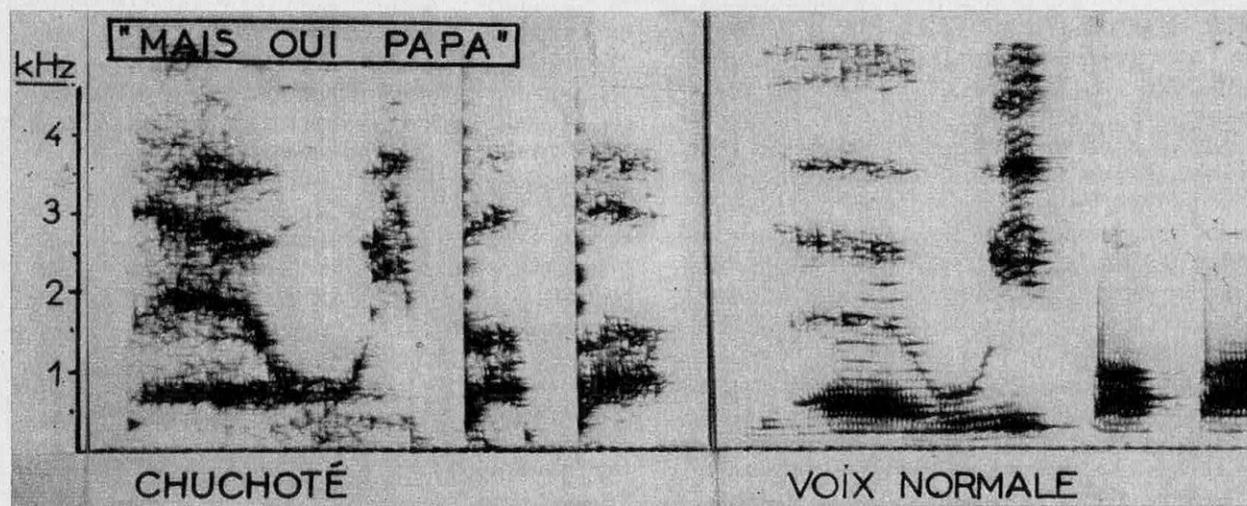
intercaler divers canaux électroacoustiques, spatiaux ou temporels. Un canal spatial se compose, par exemple, d'un microphone captant le signal rayonné par l'instrument et d'un émetteur le transformant en ondes hertziennes, captées et retransformées en signaux acoustiques par un poste radiophonique. Un canal temporel peut être une bande magnétique ou un disque, qui restituent en différé le message acoustique qu'ils contiennent. Le récepteur, dans ces deux cas, est un auditeur. Mais on peut aussi imaginer que le signal entre dans un analyseur qui fournit un diagramme : l'audition n'intervient plus. Que le récepteur soit un auditeur ou une machine, les distorsions et le masquage par bruit de fond sont le lot commun du message.

3) *Le récepteur*. Ordinairement, c'est l'homme qui capte le message grâce à son système auditif et en exploite l'information dans le « centre de traitement » que constitue son cerveau. Ce traitement aboutit à la réaction. Or, pour un même signal, pour un même message, la réaction varie du tout au tout d'un individu à l'autre.

Il est pourtant indispensable de comprendre ce que l'on observe. La psychophysiologie classique ne nous en donne pas encore le moyen. Le seul recours est donc d'imaginer un modèle fonctionnel du système auditif humain. Voici l'essentiel de celui que nous avons été conduits à imaginer.

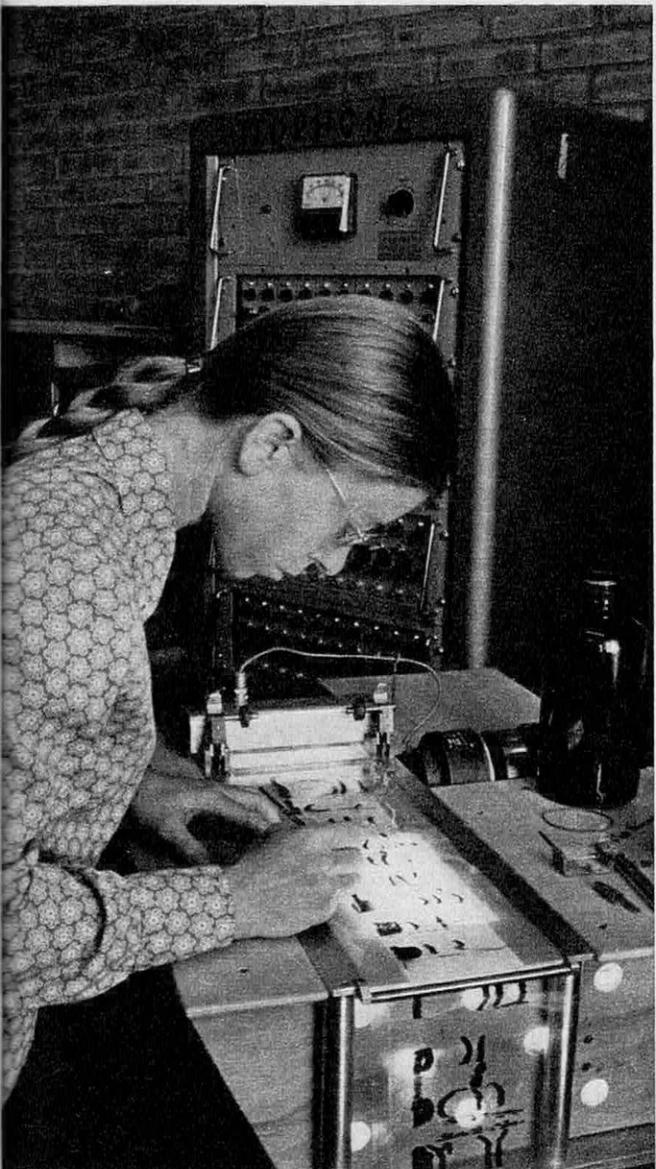
Le modèle fonctionnel

On a d'abord le « microphone », le système capteur de l'oreille externe et moyenne, système particulier puisqu'il s'adapte automatiquement au niveau du signal. Puis vient le « convertisseur analogique-digital », l'oreille interne,



Autre exemple, les sonagrammes de la parole chuchotée et de la parole normale. La phrase

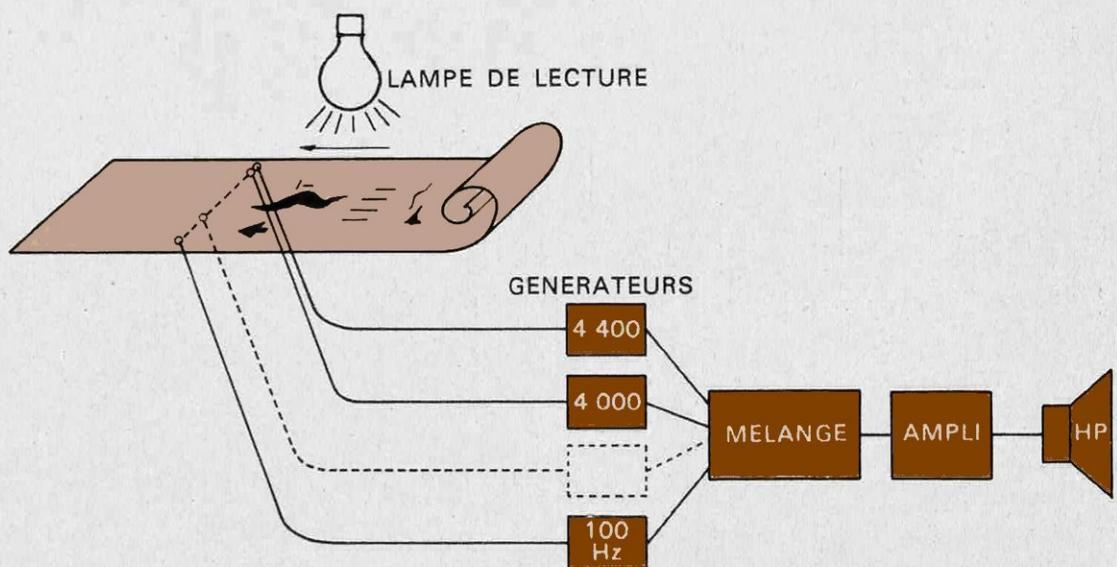
chuchotée suffit à mettre en évidence le squelette informatif de la parole.



qui transforme le signal en volées d'impulsions électriques codées, susceptibles d'être acheminées plus loin et inscrites sur une « mémoire instantanée » où défile continuellement l'image de notre environnement acoustique. S'il s'y présente quelque chose d'intéressant, nous pouvons le stocker provisoirement dans une « mémoire transitoire » comportant des séries d'« ardoises magiques », effaçables à volonté et réutilisables indéfiniment. Ici, l'on peut « retenir » ce que l'on vient d'entendre. Si telle « image » s'avère, par la suite, importante pour l'individu, il la stocke enfin dans une « mémoire mémorisante », non effaçable.

Les informations et données contenues dans ces mémoires, ainsi que les programmes de traitement (apris) expliquent toutes les réactions de l'homme. Il peut ainsi « apprendre » des messages acoustiques, les reconnaître, porter sur eux des jugements comparatifs, les combiner de mille manières (c'est-à-dire composer). On comprend aisément que le contenu des mémoires est déterminé d'abord par les propriétés du système capteur et du convertisseur analogique, véritables filtres d'information placés à l'entrée, et dont les caractéristiques varient à l'extrême d'un individu à l'autre. La réaction finale dépendra encore du contenu de la mémoire transitoire et de la mémoire mémorisante.

L'Icophone du laboratoire d'Acoustique de la Faculté des Sciences de Paris peut servir à la relecture des sonagrammes. Chacune de ses 44 cellules photoélectriques déclenche un son simple, sinusoïdal, lorsqu'elle est cachée par un point du graphisme. Un haut-parleur reconstitue, par mélange des sons sinusoïdaux, une image acoustique.



te, dont les « cartes perforées » servent de référence pour juger ce qui apparaît sur la mémoire instantanée. C'est pourquoi des individus conditionnés différemment, ne possédant donc pas les mêmes références, manifestent des réactions diverses, voire opposées. Ce modèle fonctionnel lève les innombrables paradoxes où s'engluent généralement les musicologues et les acousticiens. Il constitue un précieux « outil à penser », dont l'efficacité nous a été maintes fois prouvée lors de nos recherches en acoustique musicale. Il permet de reprendre avec fruit l'étude des mécanismes de fonctionnement et de rayonnement des instruments de musique et celle de la structure physique du message musical.

Qu'est-ce qu'un instrument de musique ?

Les instruments traditionnels sont des machines destinées à transformer de l'énergie mécanique, fournie en général par le musicien lui-même, en vibrations aériennes. L'idéal est d'obtenir le maximum d'effet avec le minimum d'énergie. Les facteurs d'instruments exploitent les propriétés très particulières de l'oreille, dont on sait que le maximum de sensibilité est situé au voisinage de 2 000 à 3 000 Hz. A cette fréquence, nous percevons un son pour des amplitudes de vibrations voisines, sinon inférieures, au diamètre d'une molécule d'hydrogène... Lorsqu'on observe soigneusement les instruments traditionnels, arrivés à une espèce d'optimum fonctionnel à la suite de longs tâtonnements empiriques, on remarque que la zone qui se trouve de part et d'autre du maximum de sensibilité de l'oreille est généralement exploitée au mieux. Les propriétés du système auditif, cerveau compris, sont en quelque sorte inscrites dans ces instruments. Si on veut les étudier du point de vue physique, tout semble paradoxal ; tout devient évident si l'on tient compte des particularités du récepteur. Quand il relève la « courbe de réponse » d'un violon ou d'une guitare, un technicien de la haute fidélité serait tenté de penser qu'il s'agit là d'une bien piètre réalisation, car la courbe est très loin d'être « plate » ; elle présente d'énormes « trous » et « bosses ». De même, en considérant l'allure d'une certaine famille de tuyaux d'orgues, on pourrait croire que tout cela n'est pas très rationnel. Or, l'expérimentation a vite fait de montrer à quel point les facteurs d'instruments ont raison de faire ce qu'ils font, et non de décider des dimensions, formes et particularités de leurs réalisations à partir de lois purement physiques. Un instrument de musique n'est pas un instrument de physique destiné, telle une sirène, à produire des sons stéréotypés dont on modifie à volonté la fréquence fondamentale. Il doit permettre

de produire des sons de hauteur variable, mais dont chacun puisse aussi être modifié à volonté en intensité et en « couleur », en timbre, dans une large mesure. Il doit laisser au musicien de larges « champs de liberté », lui permettant de modeler à son gré la forme des sons et de les enchaîner les uns aux autres de façon agréable ou efficace pour l'oreille. Mais que veut dire « agréable » ou « efficace » ? Pour le savoir, le spécialiste d'acoustique musicale doit d'abord déterminer ce qu'est physiquement un son musical. C'est aujourd'hui possible.

Qu'est-ce qu'un son musical ?

Dès l'apparition des premiers appareillages électroacoustiques d'analyse, on vit s'élaborer l'ébauche d'une théorie. On montra d'abord qu'un son ne pouvait avoir que trois dimensions physiques, que l'on savait désormais mesurer : l'intensité (en décibels), la fréquence (en hertz) et enfin la durée (en millisecondes). Le timbre, qui résulte de la présence éventuelle d'harmoniques ou de partiels, pouvait être aisément défini, puisqu'on savait mesurer la fréquence et l'intensité relative de chaque composante. On disposait enfin des données quantitatives que l'on espérait depuis si longtemps. De plus, des enregistreurs permettaient de relever l'évolution dans le temps de l'intensité ou de la fréquence, et de définir le « spectre ». Pour décrire un son, il suffisait de faire trois projections sur les plans d'un trièdre, dont les axes portent respectivement l'intensité en décibels, la fréquence en hertz et la durée en millisecondes. En isolant les trois plans, on obtient, en trois diagrammes, une description exhaustive du son.

Cette méthode, facile à utiliser, est tout à fait valable pour des sons stables. Malheureusement, si le spectre comporte plusieurs composantes, il faudra non un plan dB/Hz, mais autant de plans qu'il y a de composantes. Avec un son de 30 harmoniques, courant en musique, on se trouve devant 30 diagrammes, qu'on a le plus grand mal à dépouiller. Il est pratiquement impossible d'en réaliser visuellement une synthèse et de raccorder ces enregistrements avec les jugements émis par les sujets auxquels on fait entendre le son.

Une véritable révolution s'est faite en acoustique musicale lorsqu'apparut sur le marché le *sonagraph*. Destiné au départ à des recherches sur la parole, cet appareil est maintenant bien connu. On enregistre une séquence musicale (ou parlée) sur une « boucle » magnétique disposée sur un disque, et que l'on peut donc répéter indéfiniment. Un cylindre, solidaire du disque, est recouvert d'une feuille de papier revêtue d'une couche électrorésistante (papier

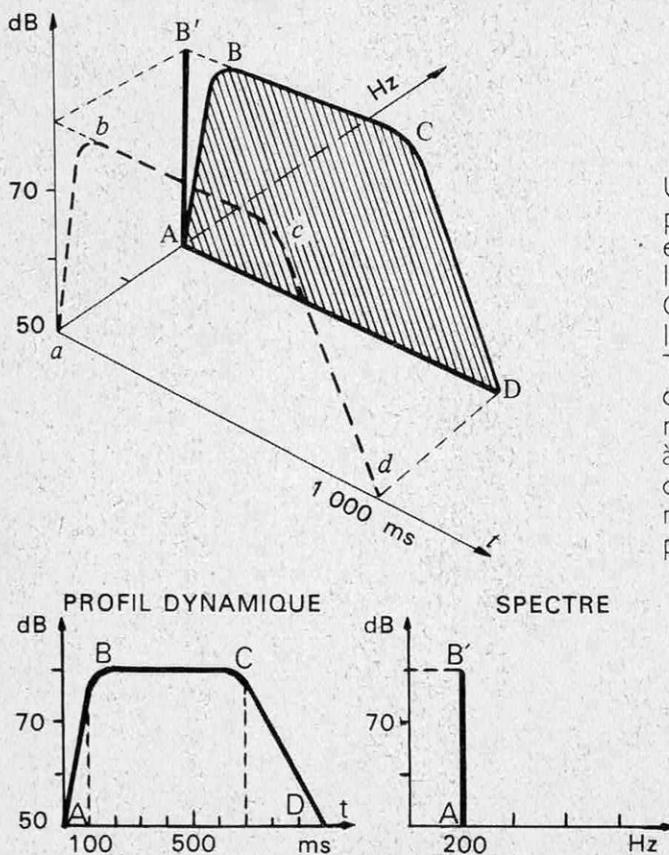
à étincelage). Si l'on fait éclater une étincelle entre un style et le cylindre, on torréfie localement le papier : on a inscrit un point. On monte donc une vis qui entraîne graduellement le style de bas en haut, lorsque le disque tourne. Le bloc porte-style comporte également un contact avec un dispositif assimilable à une série de filtres passe-bande (largeur de bande 100 Hz ou 300 Hz, au choix) allant, selon les modèles, de quelque 80 à 12 000 Hz. La tête de lecture enverra donc le signal global à la série de filtres. S'il existe dans ce signal, en un point donné de la boucle, une composante de 4 500 Hz, par exemple, celle-ci excitera le filtre et provoquera une étincelle sur le papier au point considéré. Lorsqu'on déroule ce papier, en fin d'opération, après avoir ainsi exploré toute la séquence du grave à l'aigu, on a une véritable photographie, ou plutôt une séquence cinématographique de la séquence acoustique enregistrée au départ.

Accessoirement le sonagraphe permet aussi, en cas de besoin, à l'aide de dispositifs un peu différents, d'extraire des spectres en dB/Hz, ou encore de réaliser la courbe de niveau globale, traduisant l'évolution de l'intensité en fonction du temps. Le document fondamental reste cependant le sonagramme en fréquence-temps (Hz/millisecondes). Une longue expérience nous a montré que ces images

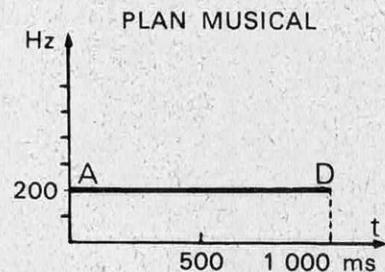
pouvaient être mises en corrélation, moyen-nant apprentissage, avec les jugements portés par les sujets qui entendent les sons correspondants. Leur dépouillement permet d'avoir une impression visuelle globale du phénomène, tout comme nous éprouvons une sensation globale en écoutant la séquence musicale correspondante.

Nous avons donc à notre disposition un moyen puissant pour étudier ce que font les musiciens lors de leurs exécutions réelles. On n'observe plus, ici, des artefacts de laboratoire, mais la réalité sonore, exprimée par un document objectif sur lequel on peut effectuer éventuellement des mesures, avec toute la précision requise.

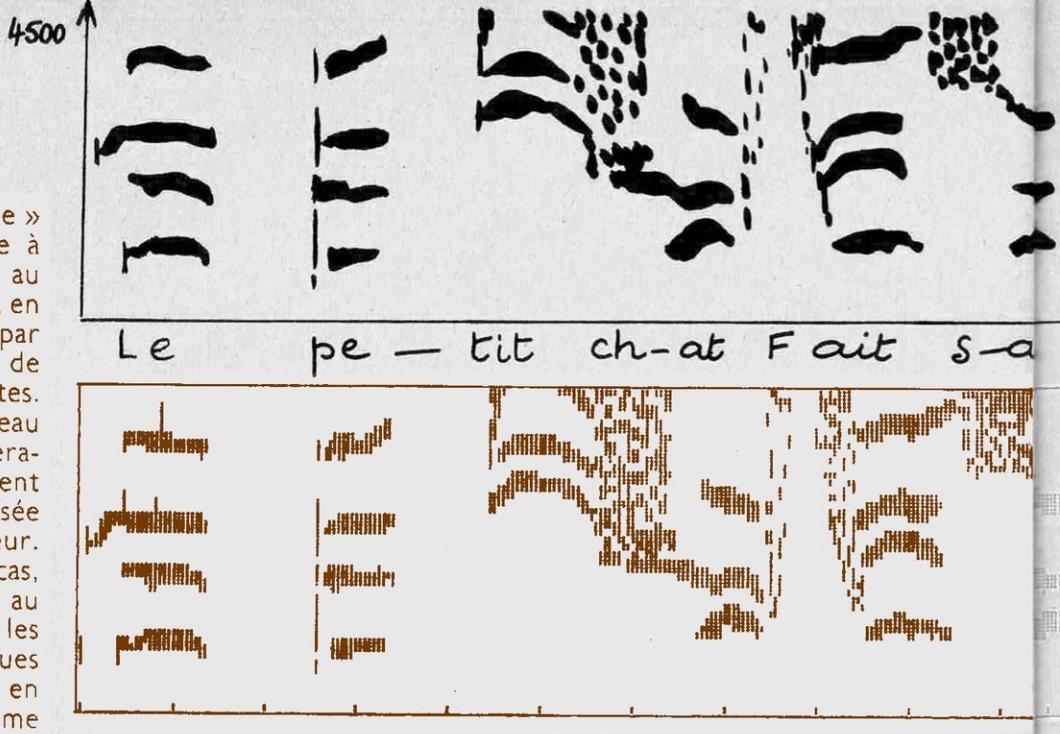
Le sonagraphe nous a permis de faire une étude systématique de la structure des sons musicaux. Il nous est rapidement apparu que la notion d'« objet sonore », valable pour des sons périodiques ou quasi périodiques, n'était plus recevable en acoustique musicale. Un son musical n'est pas un objet : c'est un être vivant qui naît, évolue, meurt. Il vit dans une société : un son musical isolé n'a pas de sens. Il y joue son rôle, tout comme un acteur joue sur la scène. L'important n'est plus, dès lors, la structure physique, le timbre du son, pas plus que l'important chez un acteur n'est sa taille ou la couleur de ses vêtements. L'important



Un son simple peut être décrit de façon exhaustive par ses projections sur les trois plans d'un trièdre. On obtient ainsi les diagrammes ci-dessous. Toutefois, cette représentation n'est pas applicable à l'étude des phénomènes musicaux normaux, nettement plus complexes.



La «super-forme» d'une phrase, établie à partir de l'analyse au sonagraphpe peut être, en vue de sa relecture par l'icophone, préparée de deux manières suivantes. Soit dessinée au pinceau (ce que faisait l'opératrice dans le document page 25), soit réalisée à l'aide d'un ordinateur. Dans ce dernier cas, en bas, on appelle au moyen d'un clavier les éléments phonétiques préalablement mis en mémoire sous forme quantifiée.



LE PETIT CHAT FAIT SA TOILETTE

n'est pas ce que *sont* ces «êtres», mais ce qu'ils *font*. Bref, une notion nouvelle est apparue en acoustique musicale, qui se relie d'ailleurs à ce que nous a appris la théorie de l'information : l'information en musique réside dans ce qui change. Ces changements se traduisent par des fluctuations du taux de corrélation du signal avec lui-même (auto-corrélation) ; or nous avons vu que le système auditif est organisé pour traiter l'information acoustique par des procédés de corrélation et d'auto-corrélation.

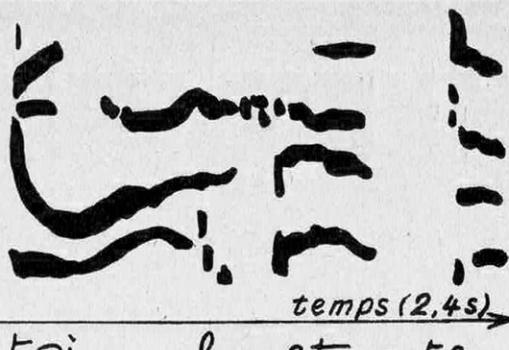
Bref, les études réalisées à l'aide du sonagraphpe (et d'autres appareillages classiques d'acoustique) nous ont permis d'établir petit à petit, à partir de la musique, les éléments d'une doctrine tout à fait générale sur la structure physique et perceptive de sons. En fait, il s'est avéré que les problèmes que nous étudions étaient strictement les mêmes que ceux d'autres branches de l'acoustique où interviennent le récepteur humain et ses propriétés. Nous sommes donc venus tout naturellement à nous intéresser à diverses questions extramusicales, mais qui relèvent des méthodes et des appareillages de l'acoustique musicale.

Quelques problèmes extramusicaux

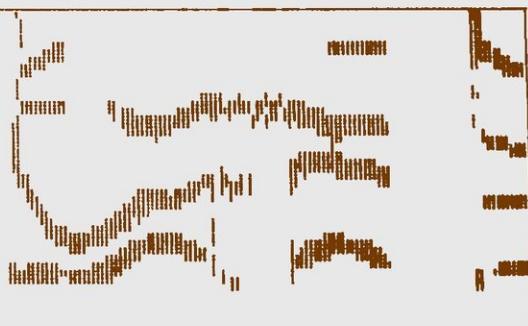
Nos efforts pour mettre au point un modèle fonctionnel de l'audition ne devraient pas rester sans échos chez les spécialistes de la psychophysiologie auditive, science qui pourrait, sur ces bases, repenser quelques-uns de ses problèmes mal résolus. A la lumière des techniques de l'informatique, on vérifierait sans doute que le système auditif humain est bien

un appareillage organisé pour capter, coder et traiter l'information acoustique. Le problème fondamental n'est donc pas un problème de mesure d'amplitudes, de durées et de fréquence, mais un *problème de reconnaissance et de traitement de formes* codées dès le départ. Cela pourrait valoir aussi pour l'étude du bruit : on se perd en raffinements sur des mesures physiques à peu près impossibles à raccorder avec la réalité des plaintes émises par les victimes du bruit. Dès lors que l'on admet que le bruit est une «forme acoustique» non désirée, et qu'on considère le système auditif comme un centre de traitement capable de reconnaître des formes, bien des questions deviennent claires.

Les problèmes de la parole ne diffèrent en rien de ceux de la musique. Tout ce que l'on peut dire d'un violon ou d'un orgue et de leur musique se retrouve dans les problèmes de la parole. Ainsi, en étudiant la structure physique de la parole, sommes-nous rapidement arrivés à la conviction qu'il s'agissait de trouver, dans les signaux de parole, le «secret» de certaines formes, perçues et décodées lorsque nous écoutons le langage parlé. Une étude systématique de la parole chuchotée nous a montré que le message vocal est supporté par un «squelette sémantique» relativement simple, comparativement à la parole normale, et se traduisant sur les sonagrammes par des graphismes faciles à saisir d'emblée. Ainsi peut-on reconnaître chaque mot aisément, dès qu'on l'a «appris» ; et on vérifie que tous les éléments de ces formes s'enchaînent normalement, comme dans l'écriture manuelle. Pour montrer que ces formes véhiculaient effecti-



toi - l - et - te



vement l'information sémantique de la parole, le sens des mots, le laboratoire d'électronique du laboratoire de Mécanique de la Faculté des Sciences de Paris, dont nous sommes un département, nous a construit un « *lecteur de sonagrammes* », l'*Icophone*. Le principe en est simple. On réalise des graphismes quelconques sur une bande de plastique (mylar) transparente. Des cellules photoélectriques relisent ensuite ces formes pendant le défilement de la bande. Les diverses voies sont mélangées et envoyées sur un haut-parleur. Si l'on dessine n'importe quoi, on entend un bruit quelconque, sans signification. Si, par contre, on dessine un spectre de raies, on entend un son musical. Si les graphismes correspondent aux formes sémantiques de la parole, telles que nous les avons définies à partir de la parole chuchotée, on entend distinctement parler. Si l'on veut vraiment faire la synthèse des formes sémantiques relatives à chaque mot, il suffit de définir les quelque 500 « éléments phonétiques », véritables signes sténographiques élémentaires, à partir desquels on peut dessiner la « super-forme » de n'importe quel mot.

Cette méthode simple de synthèse de parole découle directement de nos recherches en acoustique musicale. Avantage non négligeable, la méthode est facile à « mettre en machine ». Il suffit de quantifier chaque élément phonétique, et l'on peut produire une parole synthétique économique à l'aide d'un ordinateur. C'est ce qui a été réalisé en collaboration avec le CNRS.

Les idées que nous avons déduites de nos recherches sur la musique nous ont permis d'étudier avec fruit quelques autres problèmes

relatifs à la parole, comme celui de l'intelligibilité. Celui-ci s'éclaire singulièrement si l'on admet que l'intelligibilité relève en dernière analyse du problème général de la reconnaissance des formes. Nous avons ainsi entrepris des recherches sur l'intelligibilité de la parole dans des salles de conférence ; nous avons pu montrer le bien-fondé de nombreuses observations de musiciens quant au chant lyrique, en particulier au sujet des voix de femme dans les registres aigus. On pourrait multiplier les exemples montrant combien les acousticiens ont eu tort de négliger les recherches d'acoustique musicale.

Conclusions

L'acoustique musicale fut, dans l'Antiquité, la « Science des Sciences ». Elle perdit cependant petit à petit tout son prestige, au point d'être considérée par beaucoup comme un aimable passe-temps de gens qui n'avaient rien à faire de mieux que de calculer des gammes et de justifier quelques aspects particuliers de la structure mélodique ou harmonique de notre musique occidentale. Un travail intéressant avait bien été réalisé au siècle dernier par les spécialistes qui s'occupaient des problèmes de perception des sons en montant des expériences souvent de grand intérêt. Cependant les observations restaient disparates ou contradictoires. Le renouveau de l'acoustique musicale s'est amorcé dès que l'électroacoustique nous eut fourni des moyens d'investigation adéquats. Mais de tels moyens ne sont rien si l'on ne dispose au préalable d'une doctrine suffisante sur la structure physique et la perception des sons. Nous l'avons cherchée auprès des musiciens et des facteurs d'instruments, dont les pratiques recèlent bien des « secrets » dénotant une connaissance empirique des lois relatives aux sons réels. Ces lois, l'acoustique musicale se propose précisément de les mettre en évidence. Au fur et à mesure qu'on les découvre, on voit s'éclairer des domaines restés obscurs en psychophysiologie auditive : bruit, analyse et synthèse de parole, etc.

L'acoustique musicale n'est rien d'autre que l'acoustique tout court, dans la mesure où l'on entend par là la science des sons réels perçus par l'homme. Seule particularité : l'acoustique musicale tire ses enseignements et ses observations non d'expériences de laboratoire faites sur des artefacts, dans des conditions anomalies ; elle les extrait de la réalité sonore, et, en particulier, de la musique. Car celle-ci est le seul domaine où nous disposons d'une expérience séculaire de la chose sonore, empirique certes, mais longuement éprouvée, et dont l'étude aboutit souvent à des résultats directement transposables à d'autres domaines.

E. LEIPP

L'AUDITION ET SES

Classiquement, on divise l'oreille en trois parties dont le rôle et le fonctionnement sont différents : l'*oreille externe*, qui comprend le pavillon et le conduit auditif externe ; l'*oreille moyenne*, constituée par la caisse du tympan et la chaîne tympan-osselets ; enfin l'*oreille interne*, située dans l'os du rocher et qui contient le véritable récepteur sensoriel de l'audition, l'organe de Corti.

L'oreille externe et l'oreille moyenne trans-

mettent les ondes sonores vers l'oreille interne. Celle-ci constituée par le limaçon ou *cochlée*, est le siège d'une analyse mécanique des fréquences acoustiques, et aussi de la transformation des signaux acoustiques en messages nerveux. Ces messages sont transmis par les influx qui parcourent le tronc du nerf auditif et se propagent le long des voies auditives jusqu'au cortex. L'oreille doit donc être considérée comme un transducteur qui transforme

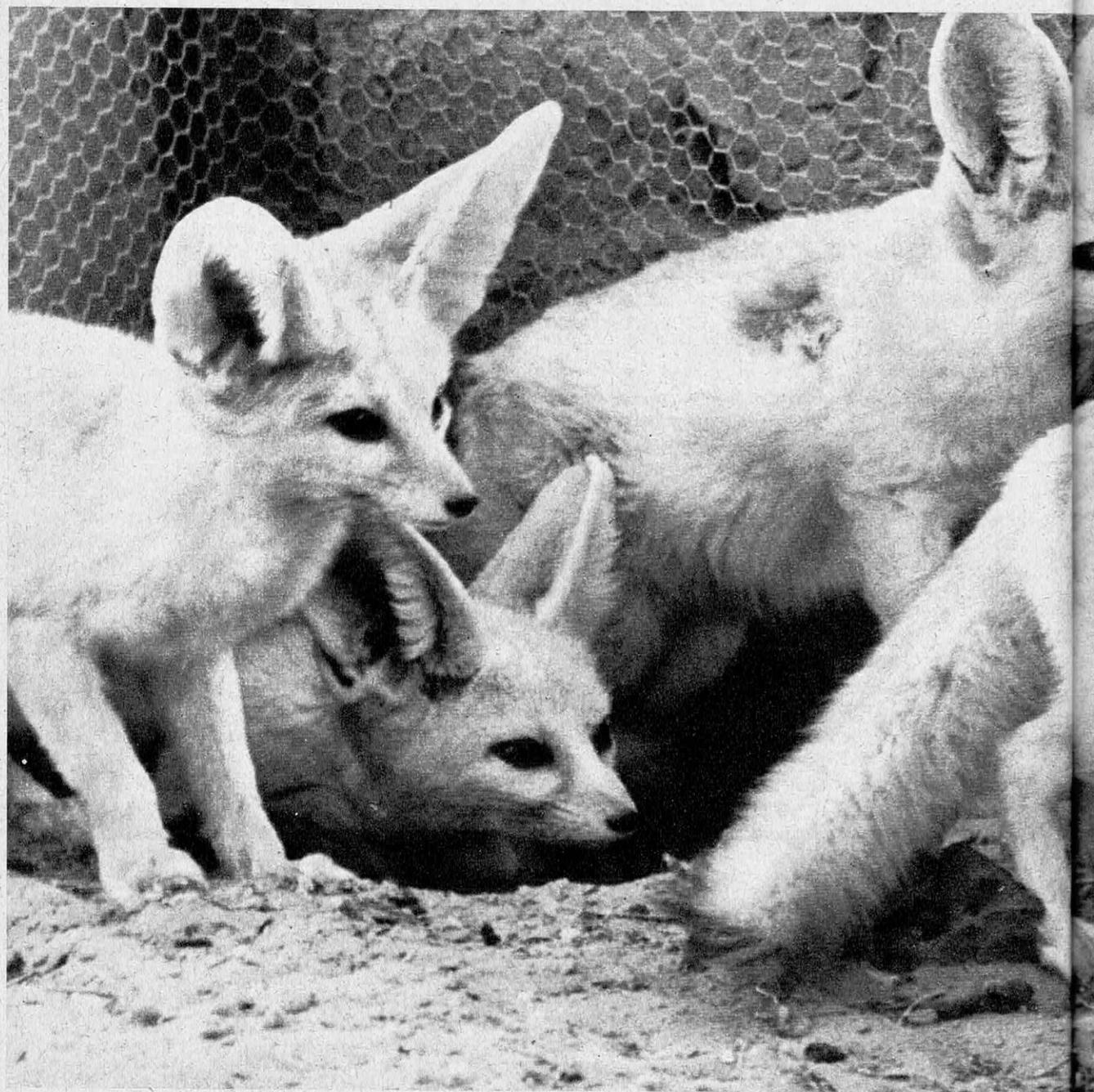


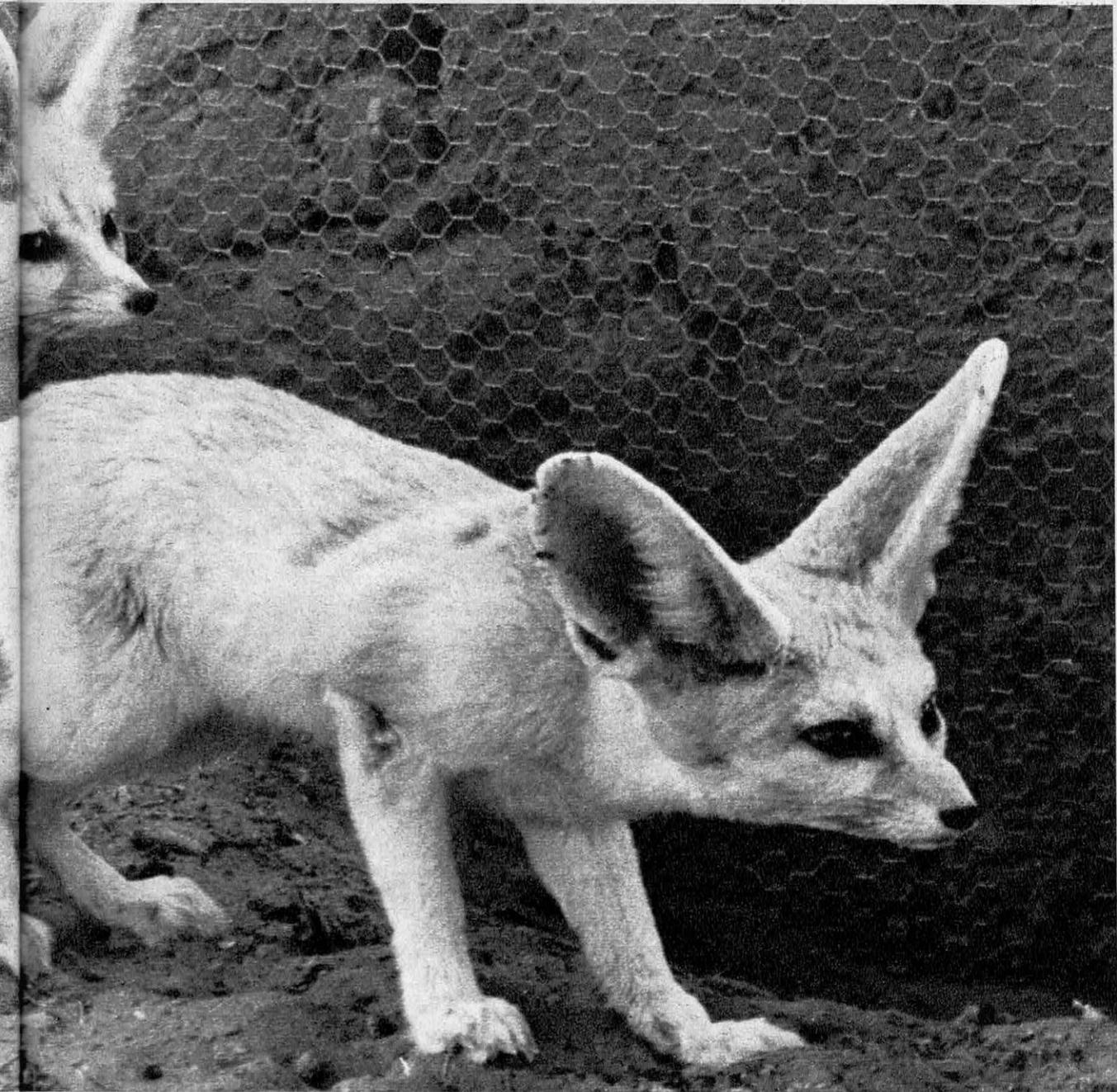
Photo Miltos Toscas

Le pavillon de l'oreille externe est plus ou moins développé selon les espèces. Chez certains

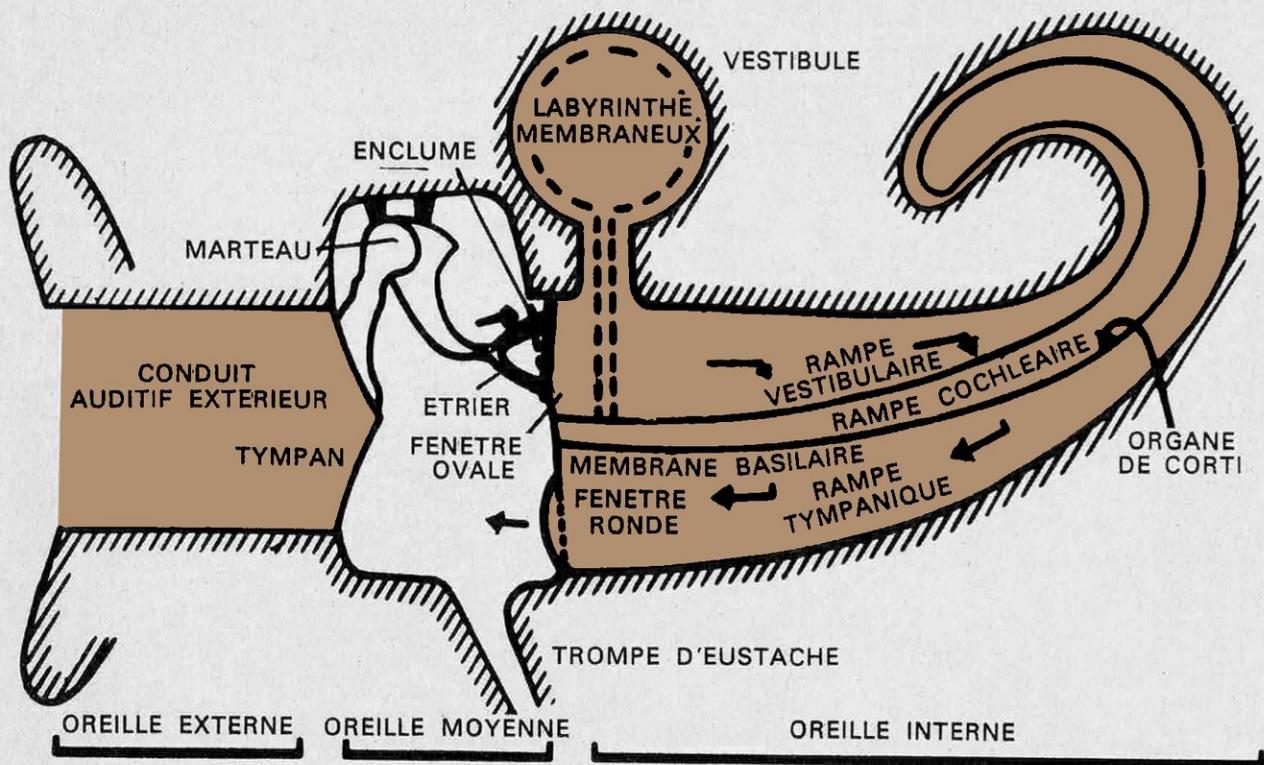
S MECANISMES

l'énergie acoustique en énergie électrique et qui, surtout, opère un codage du signal sous forme de trains d'impulsions nerveuses. Quant à la perception proprement dite, c'est un phénomène complexe d'ordre psychologique, qui se produit dans les centres nerveux supérieurs. Le pavillon de l'oreille externe a pour rôle de capter les ondes sonores. Le conduit auditif externe est un tube fermé du côté interne par la membrane du tympan. En raison de

sa forme et de ses dimensions, il renforce légèrement, par un phénomène de résonance, les fréquences situées autour de 3 000 Hz. L'oreille moyenne est formée de la caisse du tympan. Elle contient les éléments de la chaîne des osselets. L'air atmosphérique peut pénétrer à l'intérieur de cette cavité grâce à la trompe d'Eustache. Le premier osselet, ou *marteau*, est attaché à la membrane tympanique et transmet ses mouvements aux deux autres



parmi les mammifères tels que le fennec, il joue un rôle dans la localisation des sources sonores.



Ce schéma général de l'oreille en révèle les trois parties principales : oreille externe, qui capte les ondes sonores; oreille moyenne, dont le rôle principal est d'amplifier les vibrations; oreille interne, le véritable récepteur. La cochlée est présentée en partie déroulée.

Cette coupe montre la section des spires de la cochlée humaine. Au centre le tronc du nerf auditif (NA), dont les fibres atteignent l'organe de Corti (OC). On distingue la rampe cochléaire (RC), entre la rampe vestibulaire (RV) et la rampe tympanique (RT).

osselets, l'*enclume* et l'*étrier*. Ce dernier, par sa platine, transmet les vibrations à l'oreille interne. Au niveau de l'oreille moyenne, la transmission, jusque-là aérienne, devient donc ossiculaire.

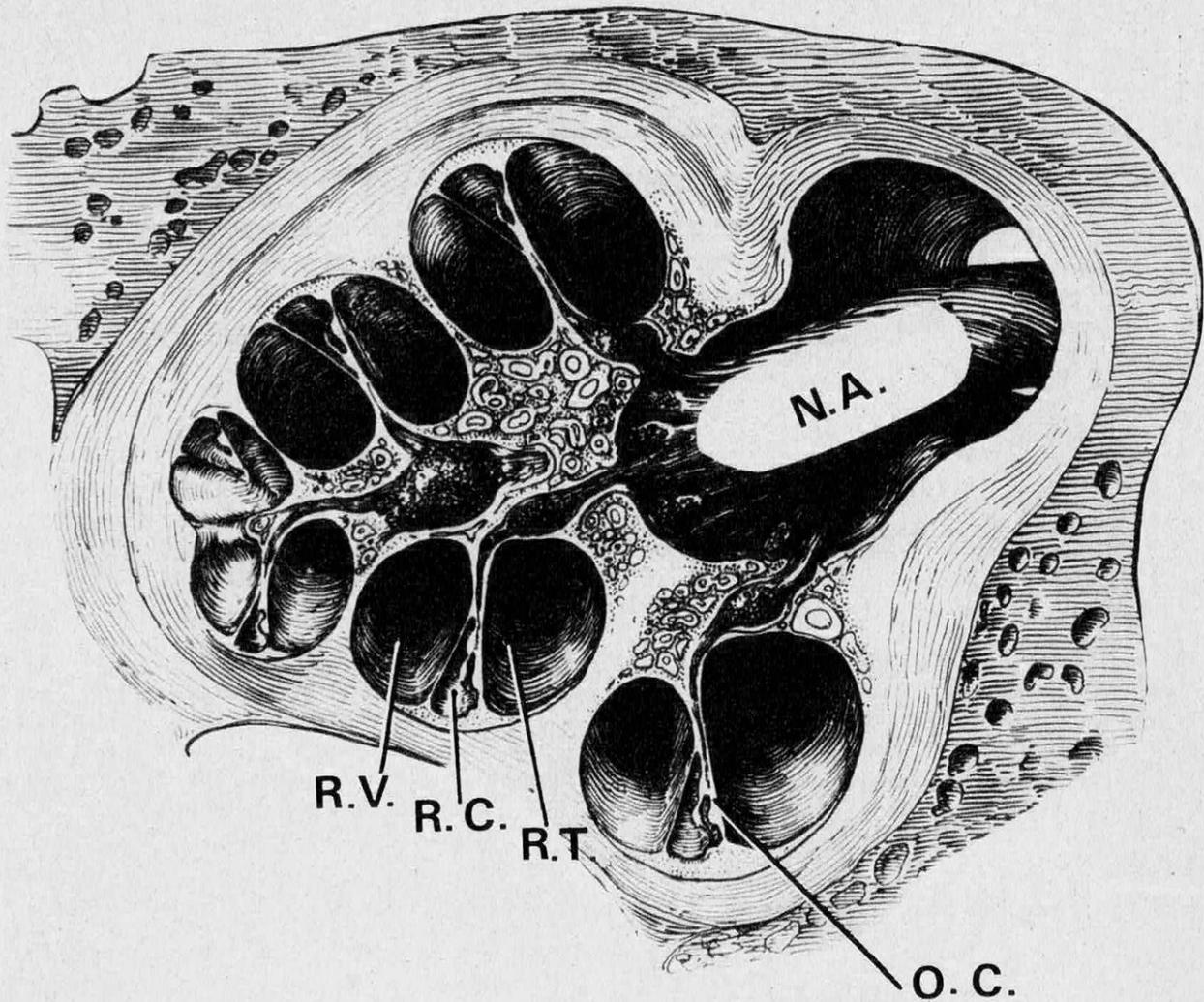
Le mécanisme de la transmission ossiculaire est complexe. Ce n'est qu'à une époque relativement récente que l'on a pu le préciser, grâce, en particulier, au perfectionnement des appareils d'exploration (microscopes, oscillateurs, etc.).

Les osselets sont attachés aux parois de la caisse du tympan grâce à de petits ligaments et aussi à des muscles qui, dans certaines circonstances, peuvent limiter les mouvements. L'amplitude des déplacements des osselets est très faible. Au seuil, pour la fréquence de 3 000 Hz, elle est de l'ordre de 10^{-8} cm. D'une manière schématique, on peut considérer que les trois osselets se déplacent sous l'influence des vibrations sonores comme si leurs articulations étaient soudées. Pour des intensités assez fortes, ils pivotent autour d'un

axe antéro-postérieur qui passe par la tête du marteau. Ils forment alors un levier du premier genre, le bras le plus court étant du côté de l'*étrier*. Il en résulte une légère amplification de la pression sonore du côté de l'oreille interne. Une amplification plus forte résulte du fait que la platine de l'*étrier* présente une surface vingt fois (chez l'homme) plus petite que la surface du tympan. La pression est par conséquent multipliée par vingt. Cette amplification est nécessaire, car les vibrations qui se propagent en milieu aérien se transmettraient difficilement aux liquides de l'oreille interne dont la résistance mécanique (ou plus exactement l'impédance) est plus forte. La chaîne tympano-ossiculaire constitue donc un adaptateur d'impédance.

L'oreille interne

L'*oreille interne* constitue le véritable organe récepteur de l'audition. Sa structure est complexe. Elle comporte d'ailleurs, en plus des organes auditifs, les organes dits vestibulaires,



qui sont des récepteurs sensibles aux variations d'équilibre. Les organes auditifs et vestibulaires ont une origine embryologique commune, ce qui explique leurs relations anatomiques. Ils sont logés dans des cavités creusées dans l'os du rocher. C'est le labyrinthe osseux.

A l'intérieur du labyrinthe osseux se trouve le labyrinthe membraneux, rempli d'endolymphe et qui contient les organes sensoriels.

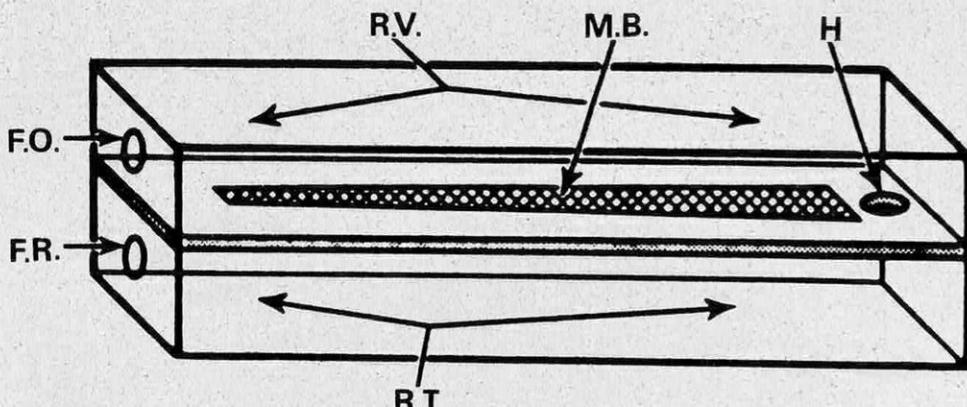
Entre les labyrinthes osseux et membraneux se trouve un autre liquide, la périlymphe.

La partie auditive du labyrinthe est la *cochlée*, ou limacon, formée d'un tube osseux enroulé en spirale, d'où son nom. Lorsqu'on fait une section transversale de ce tube, on distingue un canal central, la *rampe cochléaire*. Celle-ci correspond au labyrinthe membraneux rempli d'endolymphe. Deux membranes délimitent cette rampe : la *membrane de Reissner* et la *membrane basilaire*. De part et d'autre, sont situés deux autres canaux, la *rampe vestibulaire* et la *rampe tympanique*.

La membrane basilaire est la plus importante en ce qui concerne la mécanique cochléaire. C'est elle qui, à l'intérieur de la rampe cochléaire, supporte l'organe de Corti ; celui-ci s'étend sur toute la longueur de la cochlée.

On remarque que les dimensions de la rampe cochléaire augmentent progressivement de la base à l'extrémité (ou *apex*). Il en résulte que les propriétés mécaniques locales (élasticité, inertie) présentent une gradation correspondante.

Les vibrations sonores pénètrent dans la rampe vestibulaire par une ouverture, la *fenêtre ovale*, obturée par la platine de l'étrier. Lorsqu'on pousse lentement la platine de l'étrier dans la fenêtre ovale, le liquide subit une surpression qui se transmet vers l'apex, puis à la rampe tympanique par un petit canal situé tout à fait à l'extrémité, l'*hélicotrème*. La rampe tympanique possède, à la base, une fenêtre symétrique de la fenêtre ovale, la *fenêtre ronde*, obturée par une simple membrane. Quand l'étrier s'enfonce, la membrane



Von Békésy, prix Nobel 1961, a fait réaliser de grands progrès dans la connaissance des mécanismes de l'audition en utilisant un modèle physique de la cochlée. Ce modèle, ci-dessus, comporte une membrane de caout-

chouc à la place de la membrane basilaire (MB). Dans les espaces représentant la rampe tympanique (RT) et la rampe vestibulaire (RV), de l'eau remplace le liquide normal, la « périlymph ». A noter la fenêtre ovale (FO), la fenêtre ronde (FR), et l'hélicotrème (H).

de la fenêtre ronde bombe vers l'extérieur, jouant un peu le rôle de soupape de sûreté. Lorsque l'étrier transmet des vibrations acoustiques de fréquences variées, les phénomènes qui se passent à l'intérieur de la cochlée sont beaucoup plus complexes. Ils aboutissent à la localisation des vibrations en divers endroits, selon les fréquences.

L'analyse des fréquences

Depuis fort longtemps, des chercheurs ont supposé qu'il existait à l'intérieur de la cochlée des résonateurs capables de vibrer sélectivement pour certaines fréquences. On trouve déjà cette idée dans les ouvrages de du Verney, médecin de Louis XIV. Du Verney pensait cependant que les vibrations se localisaient au niveau de la lame spirale osseuse servant d'attache à la membrane basilaire. Il supposait aussi que les fréquences aiguës agissaient à l'apex et les graves à la base, contrairement à ce que l'on sait maintenant.

Cette idée de résonance prit une forme beaucoup plus précise dans la célèbre théorie de Helmholtz (1863), dont le point de départ était que la membrane basilaire comporterait des fibres plus ou moins tendues, capables de vibrer chacune sélectivement pour une fréquence particulière. Cette théorie influença profondément tous les travaux concernant l'audition.

Ce n'est pourtant qu'à une époque relativement récente, en grande partie grâce aux travaux de Georg von Békésy (prix Nobel de Médecine 1961), que l'on a pu vérifier expérimentalement le phénomène d'analyse des fréquences. Les techniques utilisées par cet auteur ont consisté principalement à observer

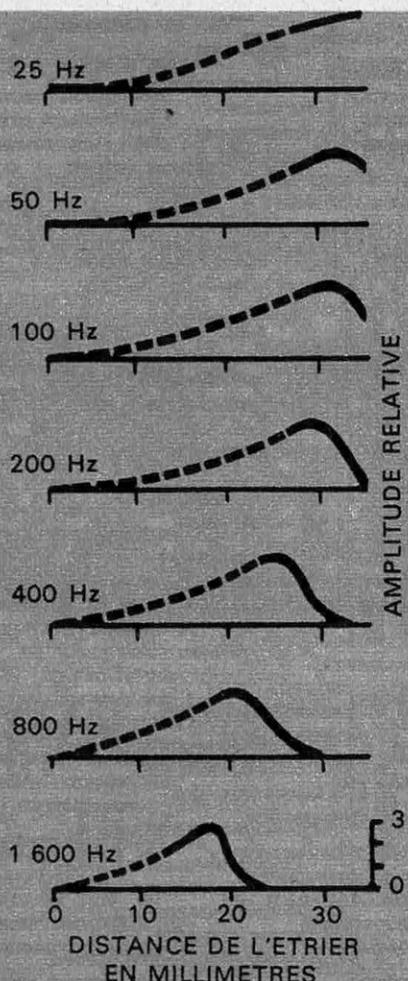
les vibrations sur des cochlées fraîchement disséquées, à l'aide de microscopes et d'éclairages stroboscopiques. Il a ensuite étudié les mécanismes de localisation des fréquences sur des modèles réalisés au moyen de tubes remplis de liquides, où la membrane basilaire était représentée par une membrane de caoutchouc.

Les résultats de Georg von Békésy ont été confirmés par quantité d'autres travaux, de sorte que le phénomène de localisation apparaît comme bien établi. Il reste à préciser certains aspects de cette analyse. Par exemple, la sélectivité des filtres cochléaires n'est pas encore parfaitement connue.

Le phénomène de localisation peut être schématisé de la manière suivante : lorsque la platine de l'étrier transmet une vibration de très basse fréquence, la pression correspondante est transmise par le liquide à toutes les régions de la cochlée, donc à l'ensemble de la rampe cochléaire, en particulier à la membrane basilaire, qui est ainsi mise en vibration. Quand la fréquence est élevée, on constate que les parties situées vers le sommet de la cochlée se mettent au repos ; seules les parties basales continuent de vibrer. Lorsque la fréquence s'élève, les vibrations se cantonnent dans une région de plus en plus limitée, à proximité de l'étrier.

De plus, chaque fréquence détermine, en un endroit précis de sa zone d'action, un maximum d'amplitude vibratoire. Ce maximum traduit l'existence d'une résonance, en fait assez atténuée, ce qui est différent de ce que pensait Helmholtz.

Une des conséquences de cette localisation est que les stimulations excessives (les trauma-



Von Békésy a établi le principe de la séparation spatiale des fréquences sonores le long de la membrane basilaire de la cochlée. Les différentes fréquences provoquent un maximum d'amplitude vibratoire en différents points de la membrane. Les graves se localisent vers le sommet de la cochlée, les aigus vers la base.

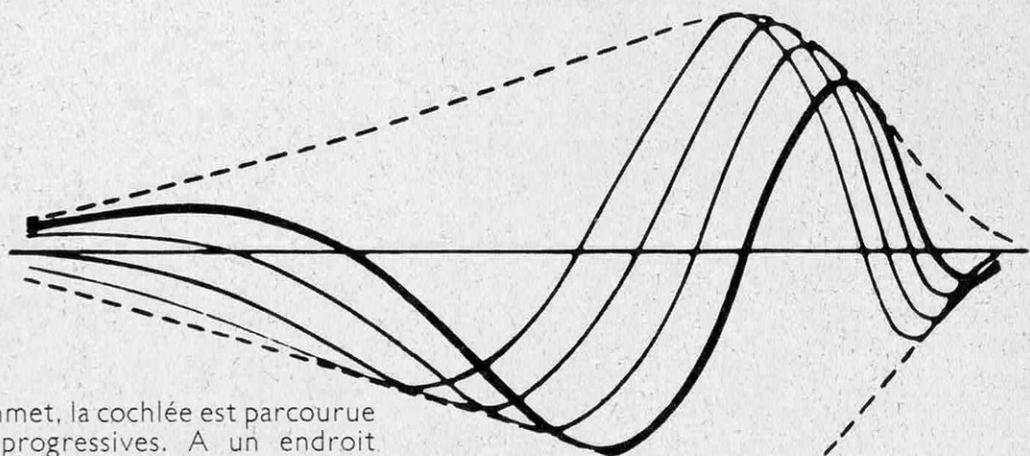
tismes acoustiques) créent des lésions dans la région correspondant à la fréquence du stimulus. Le plus souvent, toutefois, les sons traumatisants sont des bruits industriels complexes, qui entraînent une lésion dans une zone moyenne de la cochlée.

L'excitation du nerf auditif

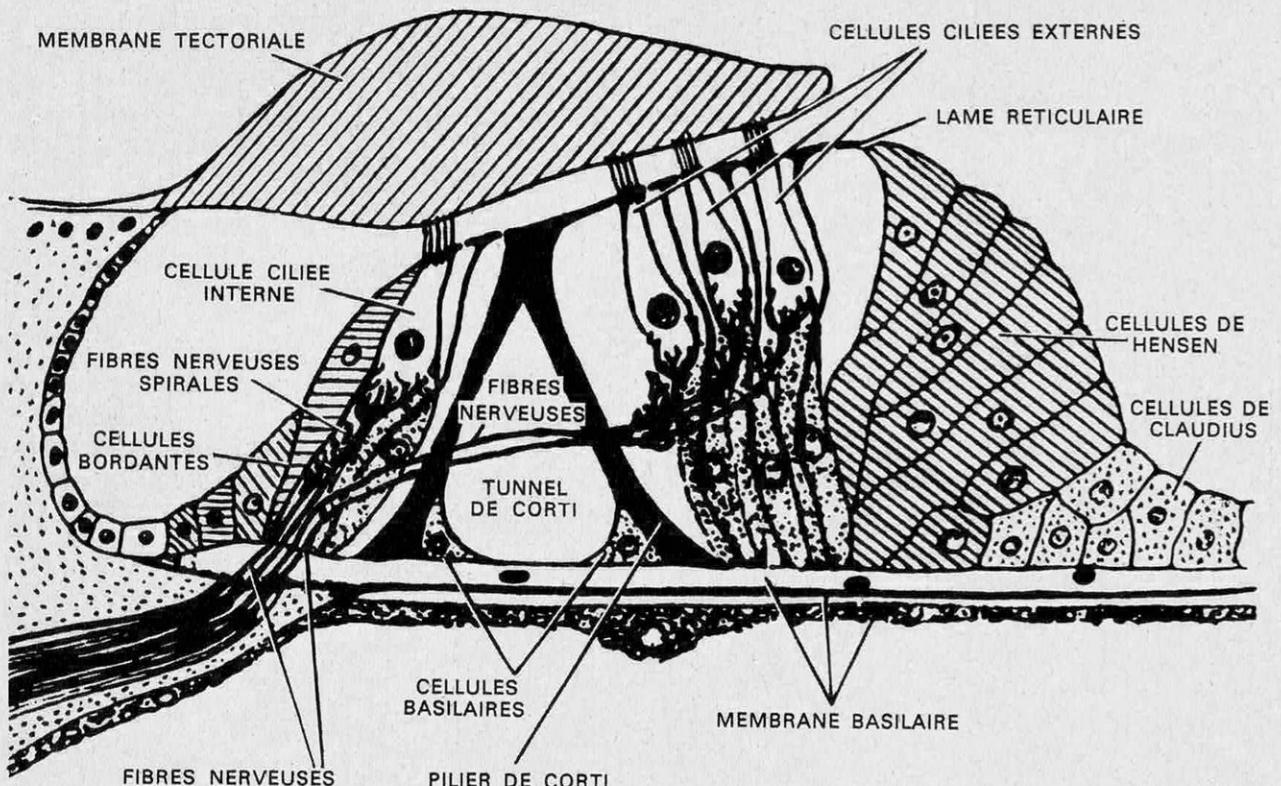
Le véritable organe récepteur de l'audition est *l'organe de Corti*, constitué de cellules sensorielles, les cellules ciliées, sur lesquelles viennent en contact les fines terminaisons du nerf auditif. Ces cellules sont disposées en plusieurs rangées réparties au-dessus de la membrane basilaire tout le long de la spirale cochléaire. Au-dessus d'elles se trouve une membrane de structure gélatineuse, la *membrane tectoriale*. Celle-ci vient appuyer contre les cils des cellules. Les mouvements complexes de la membrane basilaire provoquent des tiraillements des cils et de légères déformations des cellules ciliées. Celles-ci se comportent alors comme des transducteurs qui produisent des différences de potentiel électrique sous l'effet de déformations mécaniques. Ces variations de potentiel constituent le *potentiel microphonique*. On peut l'enregistrer en plusieurs points de la spirale cochléaire ; il donne des informations précieuses sur les mouvements qui animent la membrane basilaire.

Ce sont en définitive, les déformations des cellules ciliées qui provoquent l'excitation des fibres du nerf auditif, mais on ne sait pas avec certitude par quel mécanisme. Il est possible que le potentiel microphonique joue un rôle dans cette excitation.

Certaines fibres nerveuses sont en contact avec de très petits groupes de cellules ciliées et ne sont excitées que si la fréquence du signal acoustique se localise à l'endroit où elles sont situées. On peut donc considérer que



De la base au sommet, la cochlée est parcourue par des ondes progressives. À un endroit donné, fonction de la fréquence du stimulus, se développe un maximum d'amplitude.



L'organe de Corti surmonte la membrane basilaire. Ses cellules ciliées transforment les vibrations de la membrane basilaire en potentiels « microphoniques », transmis aux termi-

naisons du nerf auditif. Les cils des cellules sensorielles s'appuient sur la membrane tectoriale, qui joue un rôle important dans la genèse des potentiels microphoniques.

l'analyse mécanique cochléaire aboutit à trier les fréquences pour les diriger vers des voies nerveuses spécifiques.

D'autres fibres nerveuses ont une répartition trop diffuse pour pouvoir être sélectivement excitées par une fréquence précise. Elles joueraient un rôle dans la discrimination des intensités.

En conclusion, l'organe de Corti est un système assez complexe qui joue d'abord le rôle de transducteur en transformant le signal sonore en un signal électrique (potentiel microphonique) qui reproduit assez exactement la forme de l'onde sonore. Il transforme ensuite ce signal analogique en messages nerveux codés, constitués par les influx (ou potentiels d'action), assez comparables aux signaux binaires utilisés dans les calculateurs électriques.

Les influx nerveux

Les influx déclenchés dans l'organe de Corti ne sont pas différents de ceux qui parcourent tous les nerfs de l'organisme. Ils résultent d'un petit courant électrique qui circule entre l'intérieur et l'extérieur de la fibre à travers sa membrane. Ce courant réexcite, de proche en proche, les points voisins, d'où propagation à une vitesse de 10 mètres/seconde environ.

Le tronc du nerf auditif est très court (1 cm chez l'homme). Il est constitué de quelque 30 000 fibres. Il véhicule la totalité des messages qui transmettent au cerveau les informations concernant les sons.

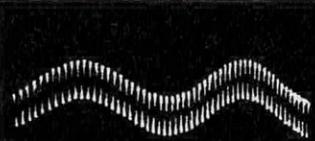
Les influx sont déclenchés dans l'organe de Corti chaque fois que la membrane basilaire se déplace dans la direction de la rampe vestibulaire. Il en résulte une synchronisation précise de chaque influx avec la vibration qui l'a provoqué. Cette synchronisation cesse pour les fréquences élevées, car les fibres ne peuvent pas transmettre plus de 1 000 influx par seconde. Cependant, elles peuvent émettre des influx une fois sur deux ou une fois sur trois et certaines fibres fonctionnent pendant la période de silence des voisines, de sorte que la fréquence se maintient grâce à l'activité d'un ensemble de fibres. Ce fonctionnement alterné des unités nerveuses est souvent appelé *mécanisme de la volée*, désignation due à l'Américain Wever, qui a été un des premiers à en souligner le rôle. On peut admettre que la synchronisation des influx avec le son peut se produire jusqu'à 4 000 Hz.

Dans toutes les voies auditives, on retrouve des propriétés semblables, c'est-à-dire qu'il existe une spécialisation des fibres pour les

Hz

8000
et
250

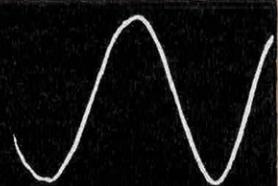
Tour basal



2^e tour



Tour apical



L'enregistrement des potentiels microphoniques en trois points de la cochlée (de cobaye) démontre encore l'analyse en fré-

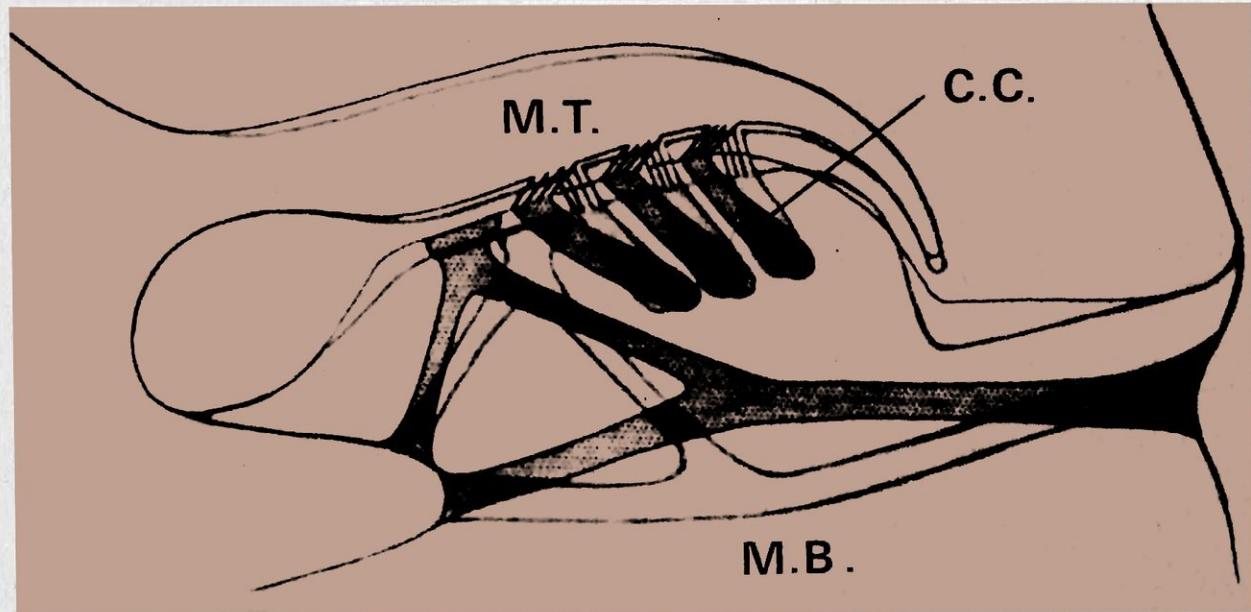
quence effectuée à ce niveau essentiel. Le stimulus est ici un mélange de deux fréquences. A la base agissent surtout les aigus.

fréquences, et une synchronisation. Toutefois, la synchronisation tend à être moins bonne lorsque les influx se rapprochent du cortex cérébral, en raison des délais de parcours et des temps nécessaires pour franchir les connexions entre neurones (synapses).

Les influx en provenance du nerf auditif abouissent à des centres bulbaires, les noyaux cochléaires, d'où part un nouveau système de fibres assez complexe qui se dirige vers les noyaux centraux auditifs (noyaux de la région olivaire, tubercules quadrijumeaux postérieurs, corps genouillés médians). De ces noyaux part un faisceau de fibres important qui rejoint le cortex auditif.

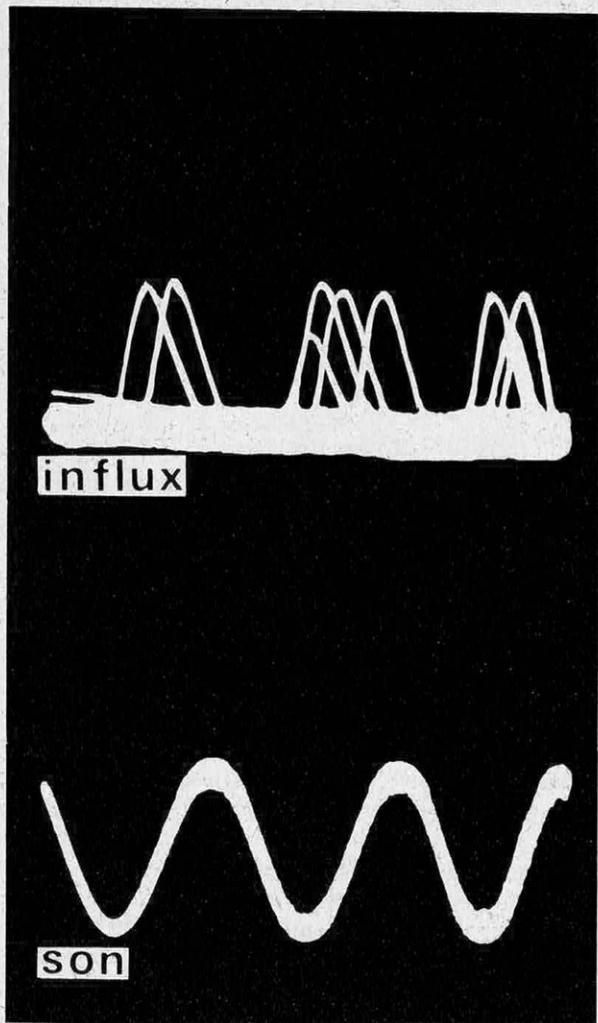
Pour chacune des oreilles, il existe des fibres qui se dirigent vers l'hémisphère du côté opposé ; elles sont en majorité. Il existe également des fibres qui se dirigent du même côté.

Les influx mettent un centième de seconde pour aboutir au niveau du cortex cérébral. Ils atteignent alors des zones de « projection auditive » où se retrouve une répartition ordonnée des cellules selon les fréquences auxquelles elles répondent. Cette localisation rappelle celle de la cochlée. Elle est cependant moins précise qu'on ne l'a cru naguère. Autour de ces zones de projection sont situées des zones dites « associatives » qui reçoivent des influx non seulement auditifs, mais aussi visuels, tactiles, etc. Elles sont le siège des mécanismes de reconnaissance des sons et de leur interprétation (reconnaissance du langage, de la musique, etc.). Beaucoup de recherches actuelles tendent à élucider les mécanismes de transfert d'information sous forme d'influx et de décodage dans les centres. Le problème est extrêmement complexe.



Les potentiels microphoniques sont engendrés au cours du déplacement relatif des cellules ciliées (CC) et de la membrane tectoriale

(MT). Le schéma montre le cisaillement des cils au cours du déplacement, par suite du pivotement de la membrane basilaire (MB).



A l'aide d'une microélectrode, on peut, lors de l'application d'un stimulus sonore, recueillir des influx nerveux au niveau d'une fibre isolée du nerf auditif. Dans le cas représenté ici, on a superposé plusieurs enregistrements. Les messages nerveux codés sur le nerf auditif sont issus de la transformation des signaux analogiques que sont les potentiels microphoniques cochléaires.

L'orientation auditive

Les oreilles ont une disposition symétrique et les voies nerveuses qui en sont issues se dirigent des deux côtés du cerveau. Certains noyaux centraux reçoivent donc des fibres des deux côtés. Cette disposition anatomique joue un rôle important pour l'orientation auditive. Quand une source sonore est placée dans le plan de symétrie du crâne, les deux oreilles reçoivent exactement le même son. Lorsque la source n'est plus dans le plan médian, l'oreille la plus proche reçoit un son plus fort et elle le reçoit avant l'oreille la plus

éloignée. Ceci permet de déterminer la position de la source, tout au moins dans le plan horizontal.

Les recherches neurophysiologiques ont montré que les influx nerveux provenant des deux oreilles présentaient des décalages dans le temps correspondant à ceux des sons qui parviennent aux deux oreilles. Ces décalages apportent aux centres une information sur la position de la source, au moins lorsqu'il s'agit d'un son bref. Dans le cas d'un son continu, un son pur par exemple, c'est plus difficile. Les retards de phase des sons qui arrivent à l'oreille la plus éloignée peuvent procurer la même information, mais il y a parfois ambiguïté : le son étant continu, il n'y a pas de point de repère pour savoir sur quelle oreille il est en avance ou en retard.

Pour les fréquences élevées, nous l'avons dit, la synchronisation des influx avec le son est mauvaise. Seule la différence d'intensité peut alors apporter la notion de position de la source.

Certains travaux récents tendraient à montrer que les cellules excitées ont dans les centres une répartition géométrique qui correspond à la position de la source sonore dans l'espace. Cette propriété expliquerait que l'on puisse avoir une impression d'espace ou de relief sonore particulièrement nette dans le cas d'une stimulation binaurale, par exemple en stéréophonie.

La sensibilité aux déplacements angulaires des sources sonores est très grande. Elle est de l'ordre de 3 degrés. Cette particularité a été utilisée dans certains systèmes de repérage acoustique des avions avant l'utilisation des radars.

Les théories de l'audition

Les théories de l'audition se proposent d'expliquer par quels mécanismes les divers caractères des sons sont perçus par le cerveau. Historiquement, de nombreuses théories ont été avancées, la plupart étant destinées à expliquer la perception de la hauteur, c'est-à-dire de la fréquence.

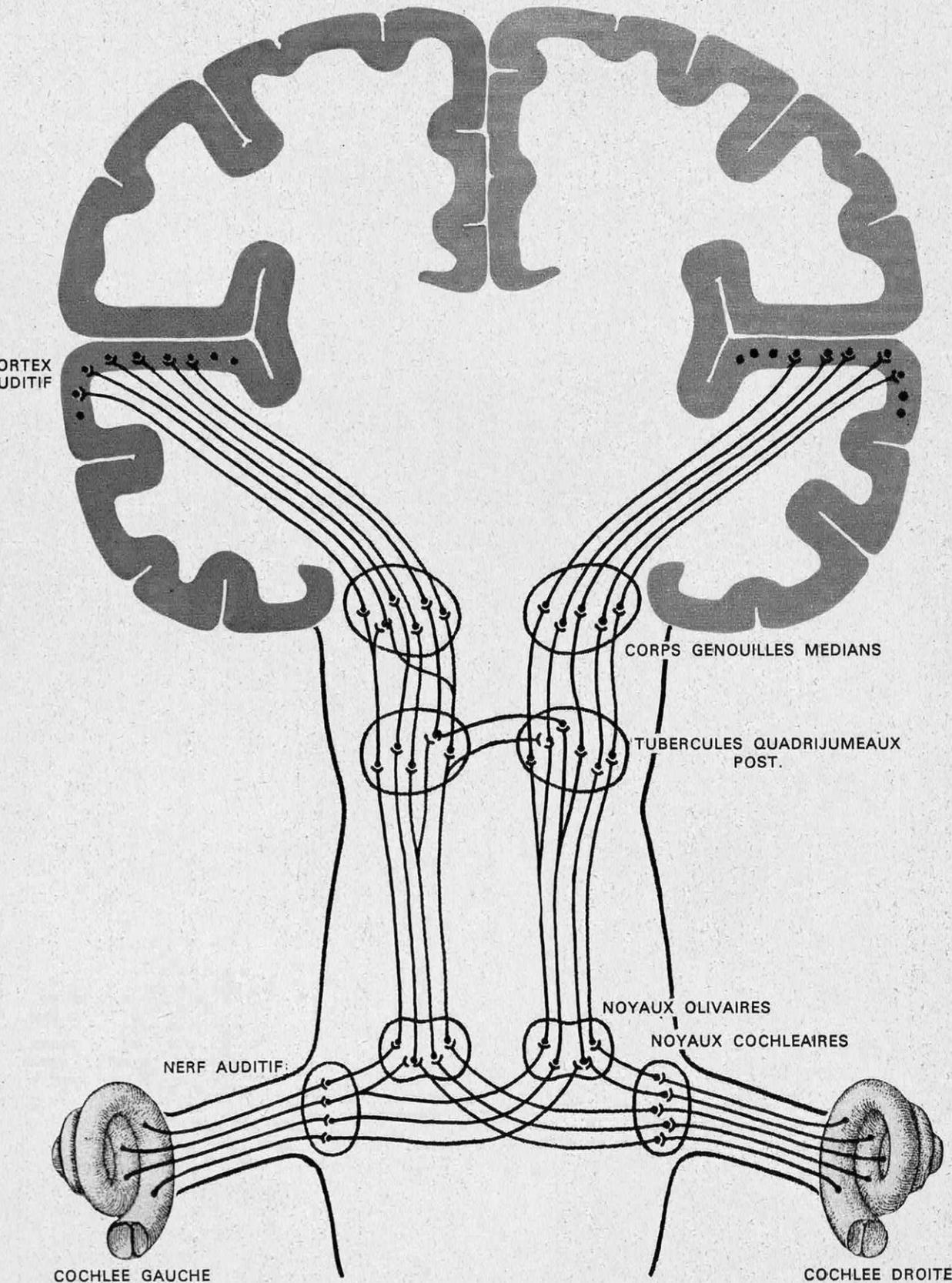
On peut classer ces théories en deux groupes. Dans le premier, on admet que la reconnaissance des fréquences découle de l'analyse de Fourier que réalise la cochlée. Ces théories font donc intervenir la localisation. La plus importante est la théorie de la résonance de Helmholtz. Dans l'autre groupe, on considère que c'est le rythme des influx nerveux qui traduit la fréquence du stimulus. Ces théories sont dites « téléphoniques ».

Actuellement, les données de la physiologie confirment, au moins en partie, ces deux phénomènes de localisation et de synchronisation des influx, de sorte que la plupart des

HEMISPHERES CEREBRAUX

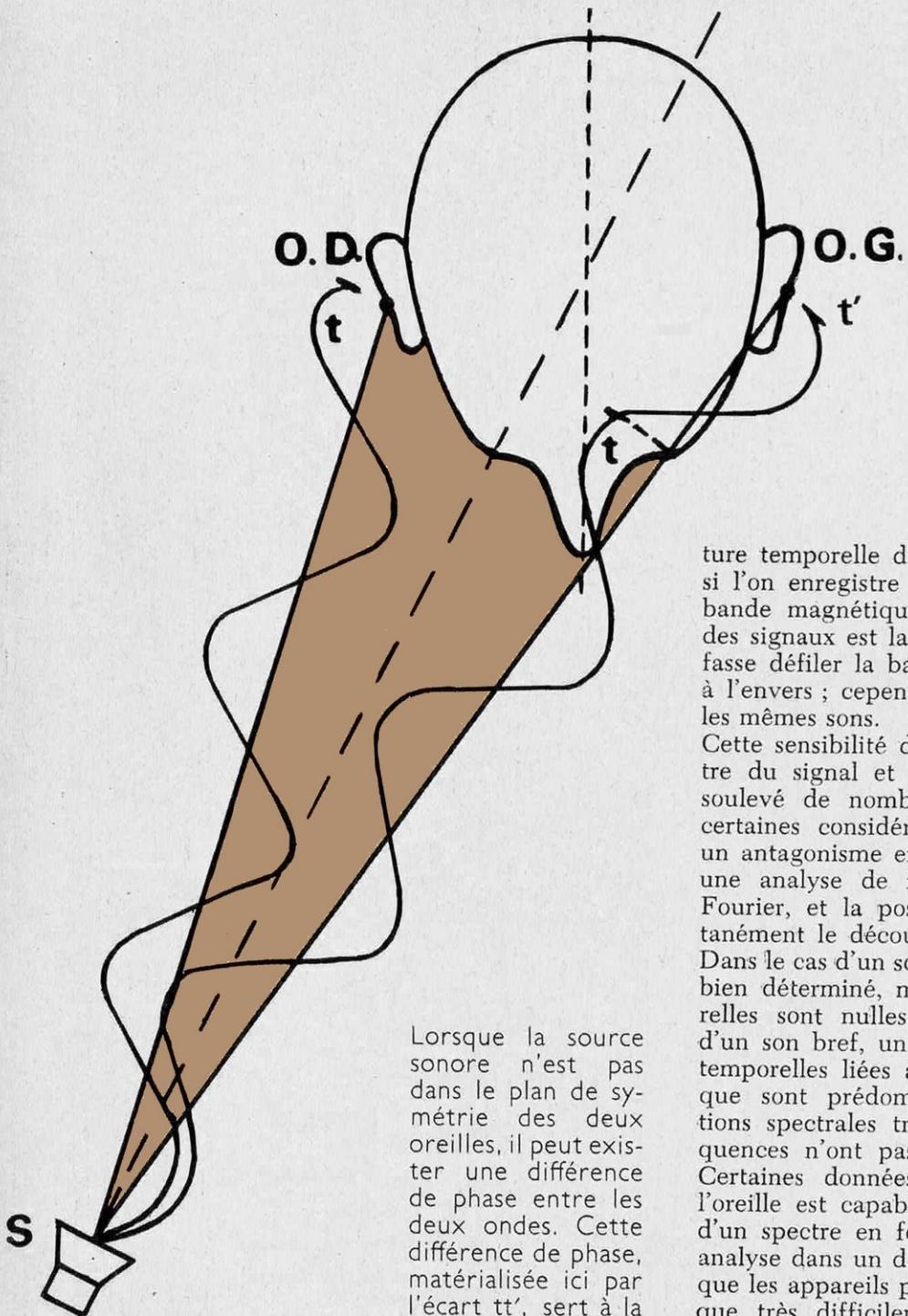
CERVEAU MOYEN

BULBE



Les fibres nerveuses issues des divers niveaux de la cochlée se groupent pour former le nerf auditif, qui aboutit à des noyaux situés dans le bulbe rachidien. Au-delà, les voies audi-

tives, qui rejoignent le cortex cérébral, sont assez complexes. Les influx mettent à peu près un centième de seconde pour parvenir au cortex auditif



Lorsque la source sonore n'est pas dans le plan de symétrie des deux oreilles, il peut exister une différence de phase entre les deux ondes. Cette différence de phase, matérialisée ici par l'écart $t-t'$, sert à la localisation du son.

auteurs tendent à admettre une théorie mixte. Cette dualité du codage auditif a suscité de nombreuses controverses. En effet, Ohm (1843) et Helmholtz (1863) considéraient la cochlée comme un système de résonateurs relativement sélectifs, capable de trier et de séparer les fréquences, mais, par contre, insensible aux décalages de phase. Cette conception ne correspond pas tout à fait à la réalité. L'oreille est en fait assez sensible à la struc-

ture temporelle des sons. On peut le montrer si l'on enregistre des notes de piano sur une bande magnétique. La composition spectrale des signaux est la même à la lecture, que l'on fasse défiler la bande dans le sens normal ou à l'envers ; cependant, l'oreille ne perçoit pas les mêmes sons.

Cette sensibilité de l'oreille à la fois au spectre du signal et à sa structure temporelle a soulevé de nombreuses questions. En effet, certaines considérations théoriques indiquent un antagonisme entre la possibilité de réaliser une analyse de fréquence, type analyse de Fourier, et la possibilité de connaître simultanément le décours dans le temps du signal. Dans le cas d'un son pur, continu, le spectre est bien déterminé, mais les informations temporales sont nulles. Inversement, dans le cas d'un son bref, un transitoire, les informations temporales liées à la forme de l'onde d'attaque sont prédominantes, mais les informations spectrales très limitées puisque les fréquences n'ont pas eu le temps d'apparaître. Certaines données montrent cependant que l'oreille est capable de tirer des informations d'un spectre en formation, et de réaliser une analyse dans un délai relativement court, alors que les appareils physiques ne peuvent le faire que très difficilement (analyseurs en temps réel).

Ainsi, les centres nerveux auditifs reçoivent des messages constitués par des trains d'flux dans lesquels sont codés à la fois la fréquence des signaux et leur décours dans le temps. Ces deux sortes d'informations permettent au cerveau de reconstituer des images sonores correspondantes. Actuellement, un grand nombre de travaux sont consacrés à définir les limites de l'analyse cochléaire et à préciser le rôle des centres nerveux dans le déchiffrage des messages.

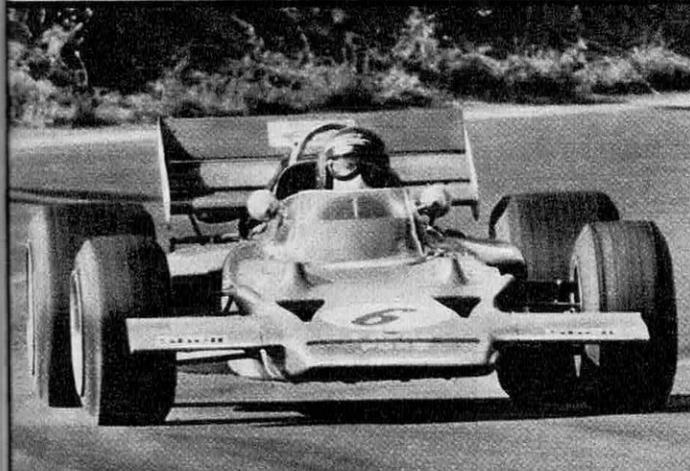
J. P. LEGOUIX

moteurs

LE N° 5 F

32, BOULEVARD HENRI IV - PARIS IV^e

1 AN - 11 NUMÉROS



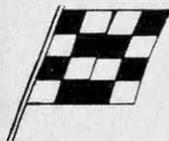
Moteurs à ses lecteurs,

A l'occasion de ce 1^{er} numéro mensuel, MOTEURS vous donne la possibilité de vous constituer la première Encyclopédie de la Compétition Automobile et de la Voiture de Sport.

Réservez vos 11 prochains numéros pour 44 F seulement.

Soit une économie de 11 F sur le prix normal de 55 F, en nous renvoyant dès aujourd'hui, votre bulletin d'abonnement.

Ne joignez pas votre paiement ! Nous ne vous facturerons, la somme de 44 F, qu'après l'envoi de votre 1^{er} numéro daté du 1^{er} février 1971.



PRENEZ LE DÉPART

**Postez dès aujourd'hui
votre bulletin d'abonnement
complété et signé.**

**Vous recevrez
votre premier numéro
daté du 1^{er} février 1971**

11 n°s

moteurs

44 F

OUI Je désire me constituer la 1^{re} Encyclopédie de la Compétition Automobile et de la Voiture de Sport.

Je recevrai les 11 prochains numéros pour 44 F seulement

NOM _____ PRÉNOM _____

ADRESSE (complète) _____

SIGNATURE

Surtout ne joignez pas votre paiement ! Vous ne recevrez la facture de 44 F, qu'après l'envoi de votre premier numéro.

AU DELA
DES FRÉQUENCES
AUDIBLES

LES ULTRASONS



Ce document, réalisé au laboratoire des ultrasons du C.N.R.S., à Marseille, met en évidence les propriétés mécaniques des ul-

trasons de forte puissance. A la surface de séparation eau-air se forme ici un véritable geyser.

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques, c'est-à-dire des vibrations des particules de matière, d'une fréquence bien supérieure au maximum, d'environ 15 000 Hz, que l'oreille humaine perçoit. Comme les ondes acoustiques, les vibrations ultrasonores obéissent aux lois générales de la propagation ; elles se réfléchissent, sont réfractées, sont diffractées, elles interfèrent.

Elles se propagent bien dans les solides et les liquides, plus difficilement dans les milieux gazeux et les fluides visqueux. On distingue deux modes principaux de propagation : par ondes longitudinales, où la vibration des particules du milieu s'effectue parallèlement à la direction de propagation, et par ondes transversales, où la vibration des particules s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation. Ces deux modes se combinent de manière plus ou moins complexe pour produire à la limite de séparation de deux milieux (solide — gaz), des ondes de torsion ou des ondes de flexion. Seules les ondes longitudinales se propagent dans les fluides et les gaz. Aux puissances élevées, l'action mécanique des ondes ultrasonores permet d'agir sur le milieu de propagation en modifiant plus ou moins profondément ses propriétés. De là résultent des applications industrielles importantes.

D'un autre côté, la petitesse des longueurs d'ondes ultrasonores confère à celles-ci certaines propriétés des ondes électromagnétiques ou lumineuses, les rendant aptes au contrôle non destructif des matériaux, à la détection sous-marine ou à l'analyse structurale de la matière.

Les générateurs ultrasonores

Les premières ondes ultrasonores furent obtenues au moyen de générateurs mécaniques. En 1883, Galton construisit un sifflet capable de produire dans l'air des sons de fréquences supérieures à 20 000 Hz.

Bien que les générateurs mécaniques soient toujours utilisés, la préférence va maintenant

à des dispositifs « traducteurs » qui, fonctionnant comme générateurs d'ondes, transforment directement l'énergie électrique en énergie mécanique. Réciproquement, ces mêmes « traducteurs » peuvent transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Ils servent alors de récepteurs d'ondes. Les traducteurs sont donc des dispositifs réversibles. Les générateurs piézoélectriques (introduits par Langevin en 1917) et les générateurs à magnétostriction appartiennent à cette catégorie. Les premiers permettent d'obtenir des fréquences ultrasonores très élevées, jusqu'à 100 MHz environ (10^8 oscillations par seconde). Les seconds, beaucoup plus robustes, peuvent fournir des puissances considérables mises à profit dans les applications industrielles.

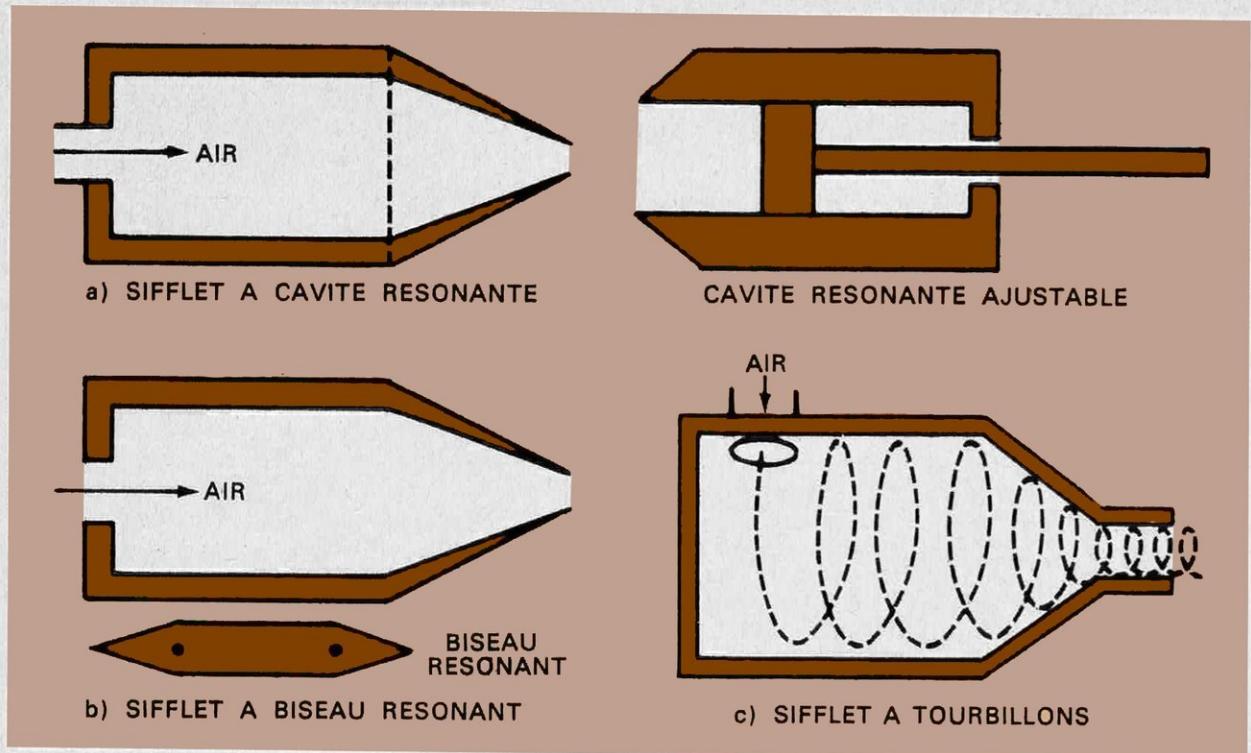
Depuis une dizaine d'années, on sait produire des oscillations de l'ordre de 1 000 MHz (10^9 Hz) avec des semi-conducteurs piézoélectriques déposés sous forme de couches minces dans des cavités électromagnétiques. Ces oscillations mécaniques de très hautes fréquences ont reçu le nom d'hypersons.

Nous décrirons trois types de générateurs communément employés de nos jours : les générateurs mécaniques, piézoélectriques et à magnétostriction.

Les générateurs mécaniques, sifflets ou sirènes, mis au point à la fin du XIX^e siècle, furent les premières sources ultrasonores.

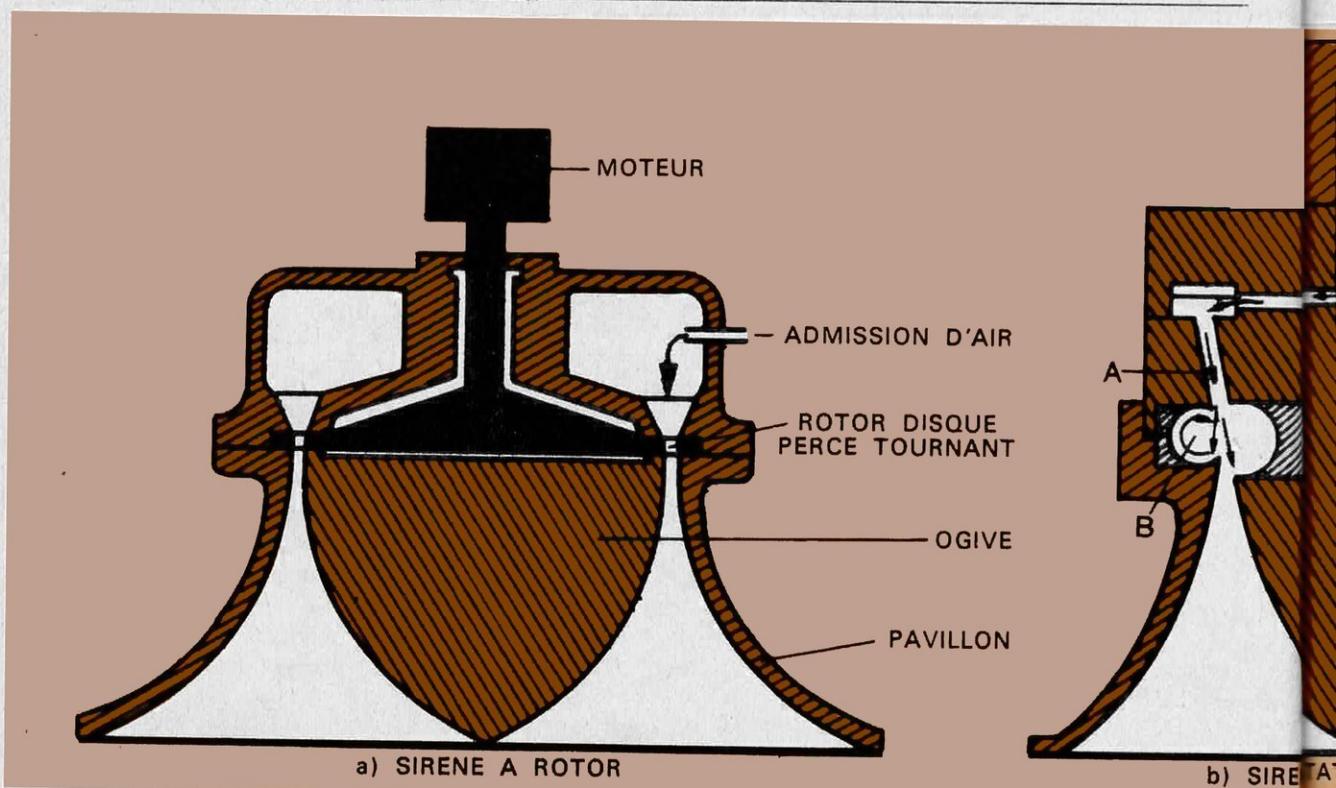
Les sifflets utilisent le fait que l'écoulement à grande vitesse d'une veine fluide engendre des tourbillons qui produisent dans le milieu environnant des oscillations mécaniques à des fréquences sonores ou ultrasonores. Suivant le mode de production des tourbillons, nous trouvons diverses classes de sifflets.

Les sirènes produisent des impulsions de gaz à haute pression. Elles sont constituées d'une chambre cylindrique qui reçoit le gaz sous pression (en général de l'air). Une des parois circulaires de la chambre (le stator) est percée d'un grand nombre d'orifices. Un disque tournant (le rotor), percé du même nombre d'orifices, est placé en face du stator dont il masque et découvre alternativement chaque orifice,



Les plus anciens générateurs d'ultrasons sont mécaniques ; il en existe deux grands types : siffllets et sirènes. Les siffllets utilisent un

gaz ou un liquide. A signaler, le sifflet de Galton à cavité résonante, le sifflet à biseau de Pohlmann, le sifflet à tourbillon de Vonnegut.



Dans la sirène à rotor, les ultrasons sont produits par modulation d'un jet d'air comprimé

au niveau d'un disque tournant percé de nombreux orifices. La sirène statique Levavasseur

modulant ainsi le jet d'air. Les fréquences ultrasonores dépendent de la vitesse de rotation du rotor et du nombre d'orifices.

Il existe également des sirènes statiques n'ayant pas d'éléments mobiles. Dans la sirène Levavasseur, la modulation du jet d'air est obtenue par un jet secondaire. Une fraction du jet principal issu d'une tuyère A est déviée vers une cavité toroïdale B. Le jet secondaire ainsi obtenu décrit un cercle à l'intérieur de la cavité et frappe le jet principal à la sortie de la tuyère, provoquant son interruption périodique. Les fréquences obtenues dépendent de la section de la cavité.

Les générateurs mécaniques émettent des puissances ultrasonores considérables ; aussi sont-ils très employés dans l'industrie. Une sirène industrielle peut produire environ 200 W acoustiques à la fréquence de 22 kHz. La sirène Levavasseur donne environ 1 kW acoustique.

Les générateurs piézoélectriques. Dans le domaine des fréquences élevées, les générateurs mécaniques sont entièrement supplantis par les générateurs piézoélectriques qui offrent aussi l'avantage de pouvoir fonctionner en récepteur.

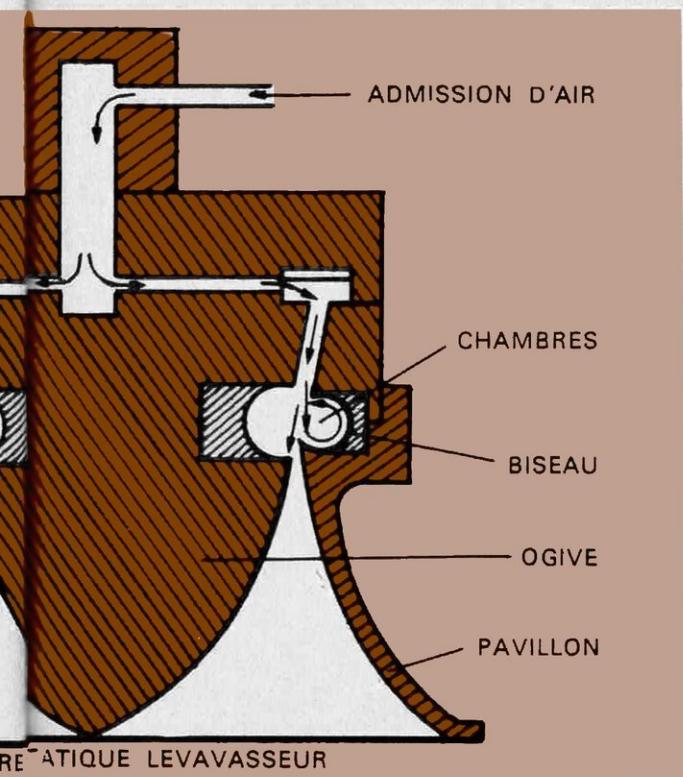
L'effet piézoélectrique est une propriété de certains cristaux présentant une dissymétrie de structure convenable, comme le cristal de

quartz par exemple. Il a l'aspect présenté sur la figure page 46, où l'on distingue les axes cristallographiques X, Y et Z. Nous avons figuré, à l'intérieur du cristal, une lame de coupe X, c'est-à-dire une lame dont les faces parallèles sont taillées perpendiculairement à l'axe X. Si l'on exerce sur cette lame une pression parallèlement à l'axe X, il apparaît sur les faces opposées des charges électriques de signes contraires. C'est l'effet piézoélectrique direct, mis en évidence pour la première fois en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie. Inversement, une lame piézoélectrique plongée dans un champ électrique parallèle à l'axe X subit des variations d'épaisseur. Grâce à cette dernière propriété, Paul Langevin a pu obtenir en 1917 la première émission ultrasonore avec une lame de quartz placée entre les armatures d'un condensateur. Si l'on applique aux bornes du condensateur une tension électrique de haute fréquence, la lame de quartz entre en vibration. Ces vibrations sont communiquées au fluide qui entoure la lame. Le maximum d'énergie ultrasonore est obtenu si la fréquence d'excitation correspond à la fréquence de résonance mécanique de la lame. Outre le quartz, qui est un cristal naturel, il faut citer des cristaux obtenus artificiellement, comme les monophosphates d'ammonium et de potassium. Mais ces derniers, très fragiles, sont remplacés maintenant par des céramiques ferroélectriques.

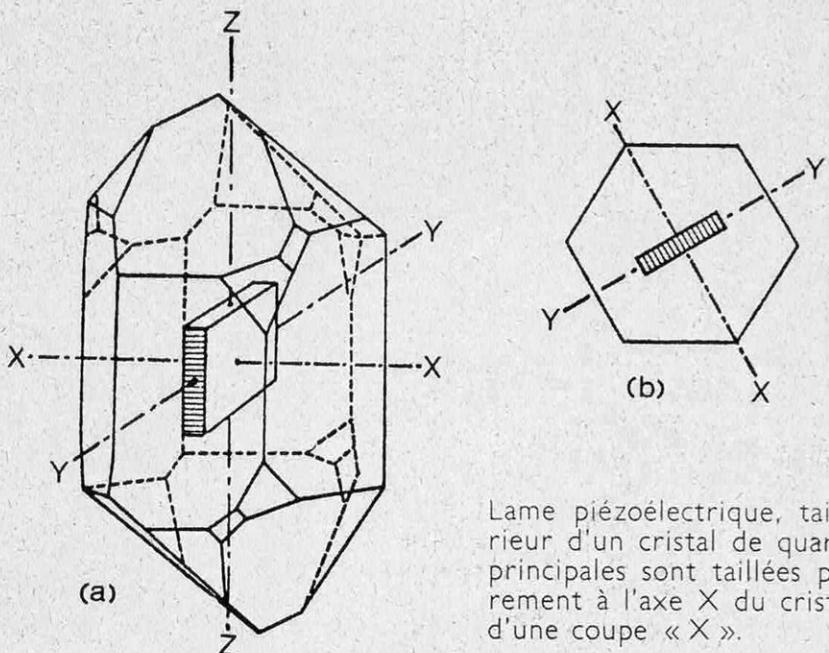
Les céramiques ferroélectriques sont des substances diélectriques (isolants) présentant le phénomène de l'électrostriction : plongées dans un champ électrique, elles se déforment. Convenablement polarisées, elles se comportent comme les cristaux piézoélectriques classiques. Les céramiques les plus utilisées (titanate de baryum, zirconate de plomb) s'obtiennent sous forme mouillée et frittée, ce qui permet de leur donner les formes les plus variées.

Les générateurs piézoélectriques sont très répandus dans les matériaux de détection sous-marine, de contrôle et de mesures par ultrasons. Ils fonctionnent dans une gamme de fréquences de 100 kHz à 100 MHz. De plus, en collant une céramique entre deux lames métalliques d'épaisseur convenable, on peut obtenir des fréquences de fonctionnement inférieures à 100 kHz et aussi augmenter l'intensité sonore émise.

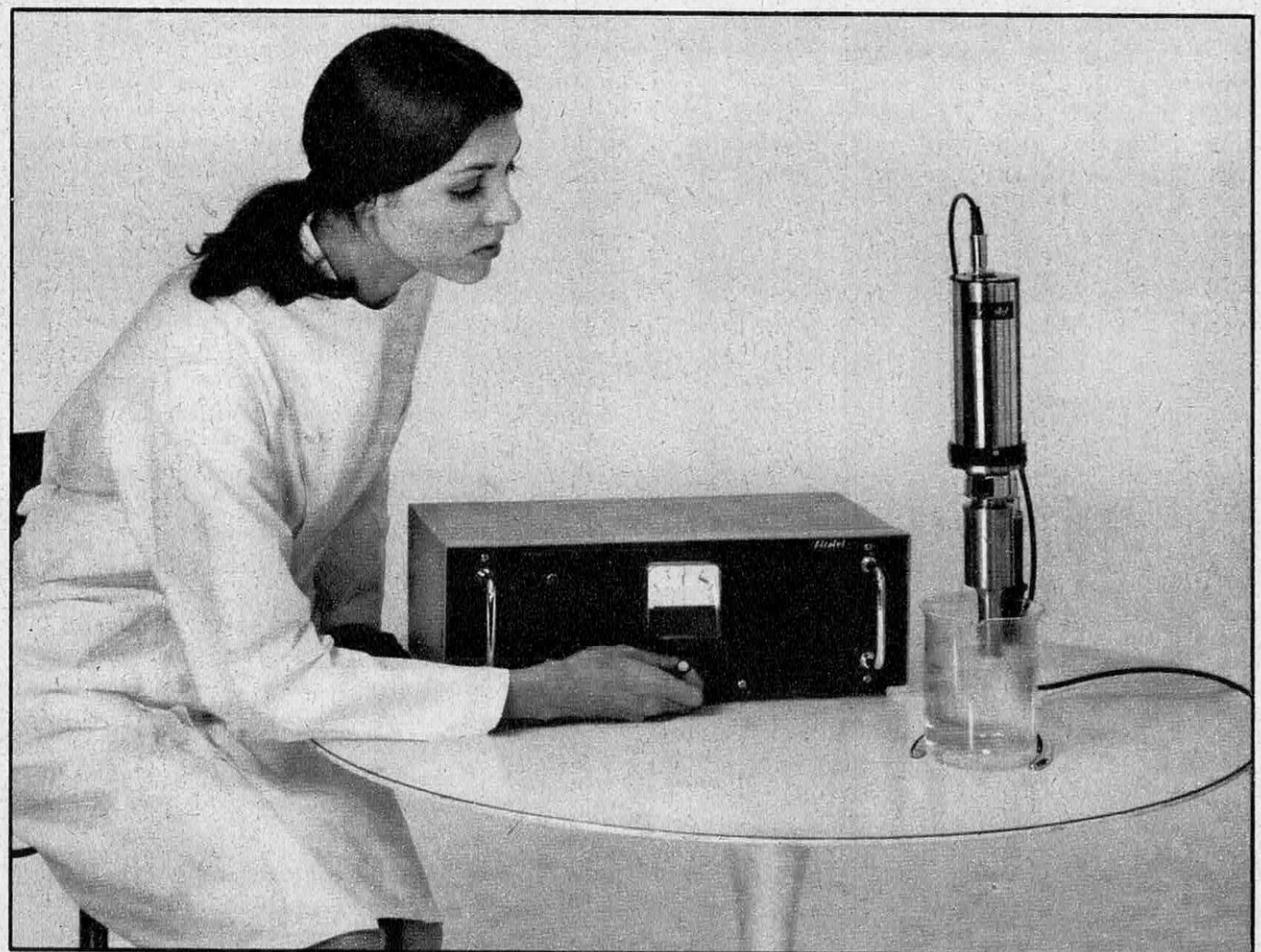
Les générateurs à magnétostiction. Les matériaux ferromagnétiques possèdent des propriétés semblables à celles des céramiques ferroélectriques. Un barreau ferromagnétique plongé dans un champ magnétique subit des variations de longueur. C'est le phénomène de magnétostiction, que présentent le fer, le nickel ou le cobalt, les alliages fer-cobalt (com-



utilise un jet d'air secondaire pour la modulation du jet principal.

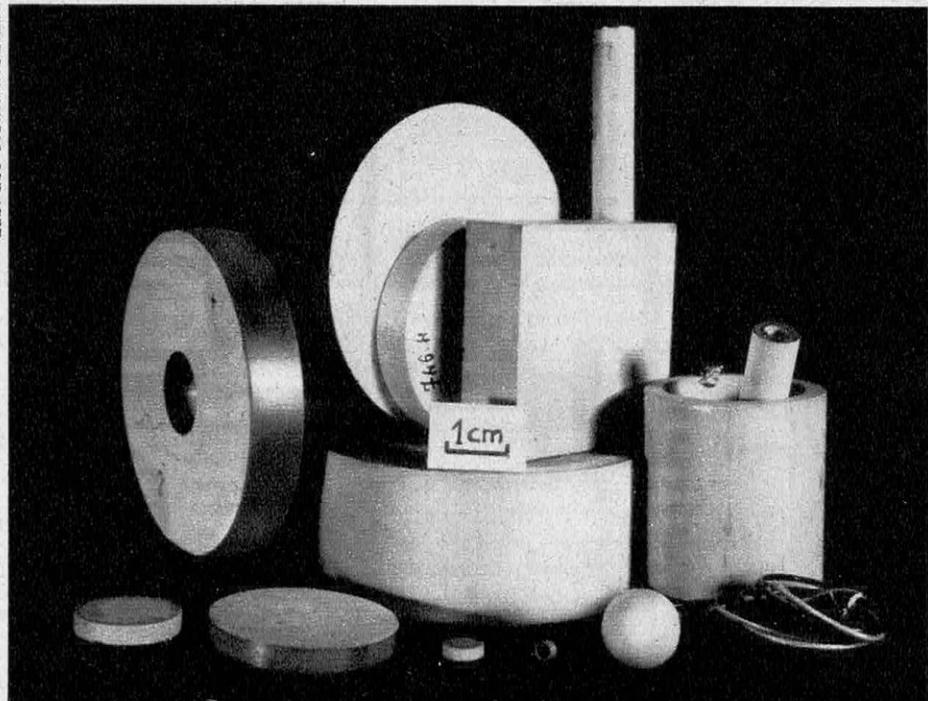


Lame piézoélectrique, taillée à l'intérieur d'un cristal de quartz. Les faces principales sont taillées perpendiculairement à l'axe X du cristal ; on parle d'une coupe « X ».



Des céramiques ferroélectriques serties entre deux masses métalliques, un plongeur en titane, un générateur 20 kHz; l'ensemble cons-

titue un équipement d'homogénéisation et émulsification par ultrasons pour laboratoires de chimie et de biologie.



Les céramiques à propriétés ferroélectriques sont moulées sous les formes les plus diverses : disques, tubes, sphères, etc., pour la construction des générateurs d'ultrasons.

me le permendur) ou fer-aluminium (comme l'alfénol).

Certaines ferrites possèdent des propriétés magnétostrictives marquées. On les produit sous forme de céramiques ferromagnétiques non métalliques connues sous le nom de « ferroxcube ». Le ferroxcube 7, ferrite de nickel, cuivre et cobalt, convient particulièrement pour la production d'ondes ultrasonores.

Les générateurs à magnétostriction, très robustes, peuvent fournir des intensités ultrasonores de 7 à 10 W par centimètre carré. Ils fonctionnent dans une gamme de fréquences de 10 à 200 kHz environ. On les emploie dans certaines machines-outils pour percer ou pour souder par ultrasons.

La détection des ultrasons

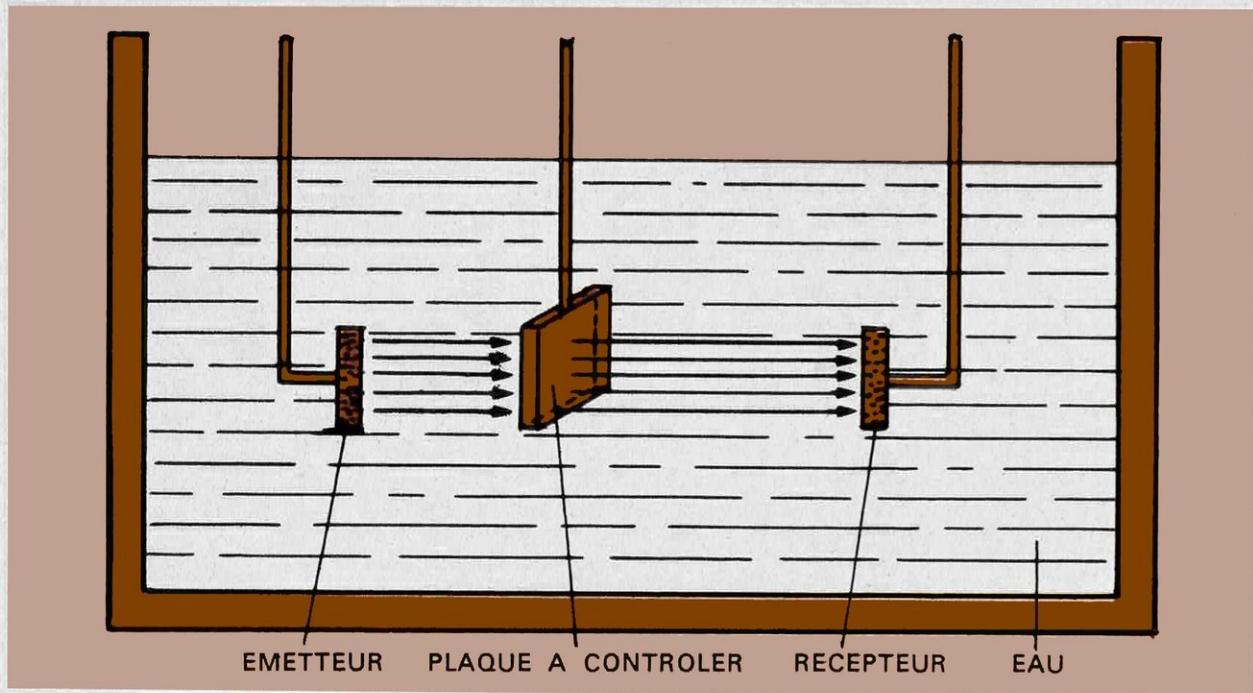
Les détecteurs ultrasonores décèlent la présence ou l'absence d'ultrasons dans un milieu donné, mais ils permettent avant tout de mesurer les grandeurs qui caractérisent l'émission (énergie rayonnée, fréquence d'émission) ou la propagation dans un milieu donné (vitesse, amortissement, coefficients de réflexion, etc.).

Les détecteurs électriques sont de loin les plus utilisés. Ils utilisent le fait que le quartz ou les matériaux ferroélectriques et magnétostrictifs transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Sur les armatures d'un cristal plongé dans un champ ultrasonore apparaît une tension électrique de même fréquence que celle des ultrasons et proportionnelle à leur pression instantanée. Cette tension conve-

nablement amplifiée peut être aisément observée sur l'écran d'un oscilloscopie cathodique. Ces détecteurs peuvent être très petits (on réalise des sphères de quelques millimètres de diamètre) afin de ne pas perturber le champ ultrasonore dans lequel on les plonge. Les mesures dans les milieux solides sont plus délicates. On peut appliquer directement le détecteur sur une des faces du solide à étudier ou bien immerger le solide et le détecteur dans une cuve contenant de l'eau.

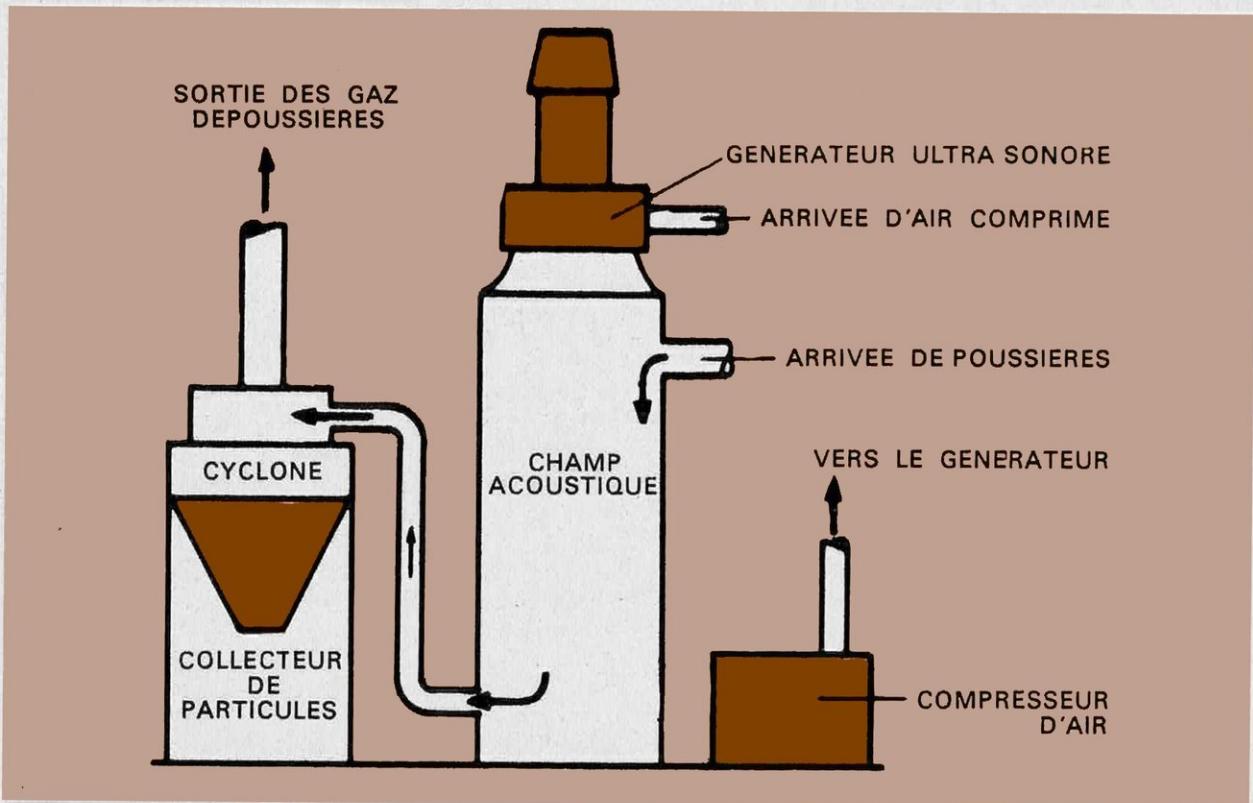
Les détecteurs mécaniques furent les premiers utilisés dans les milieux fluides. Ils comportent un obstacle, généralement métallique, que l'on plonge dans le champ ultrasonore à étudier. Sous l'effet de la pression de radiation, cet obstacle se déplace. La mesure du déplacement permet le calcul de l'intensité ultrasonore rayonnée. L'obstacle peut être un disque suspendu à un fil de torsion (disque de Rayleigh), un réflecteur conique suspendu au plateau d'une balance (radiomètre à balance), ou encore, si l'on ne veut pas troubler le champ ultrasonore, une sphère de petites dimensions suspendue à une tige de verre (pendule de pression de radiation). Ce dernier dispositif est très sensible : une sphère de laiton de 3,5 mm de diamètre permet de mesurer des intensités de l'ordre de 10^{-3} W/cm² (un millième de watt par centimètre carré).

Beaucoup moins courants, **les détecteurs thermiques** sont constitués d'une enceinte calorimétrique soumise au rayonnement ultrasonore. L'augmentation par unité de temps de la température du calorimètre est proportionnelle à l'intensité ultrasonore. Ces variations de tem-



Les détecteurs d'ultrasons les plus utilisés transforment l'énergie mécanique en énergie électrique par effet piézoélectrique. Ils servent,

par exemple, au contrôle « non destructif » de pièces métalliques, en association avec un émetteur.



Un générateur mécanique d'ultrasons crée un champ acoustique au sein duquel des particules solides en suspension dans un gaz s'aggron-

mèrent aux « nœuds » de vibration. Le principe est applicable à l'épuration des fumées industrielles.

pératures sont mesurées à l'aide d'un thermocouple.

Les effets mécaniques des ultrasons

On sait aujourd'hui produire des énergies ultrasonores considérables. Une onde ultrasonore de 10 kHz, d'une intensité de 10 W/cm², qui se propage dans l'eau, communique aux particules du milieu une accélération de 2 300 g (g représente l'accélération de la pesanteur). L'amplitude de vibration de ces particules reste faible, de l'ordre de 5,8.10⁻⁴ cm, mais la pression ultrasonore est de ± 5 atmosphères. On conçoit donc que les ultrasons de grandes énergies produisent des actions très variées à l'intérieur des fluides.

Précipitation et agglomération de particules. Des ultrasons de basse fréquence permettent de précipiter et d'agglomérer des particules en suspension dans un gaz ; cette propriété est applicable au dépoussiérage des fumées industrielles.

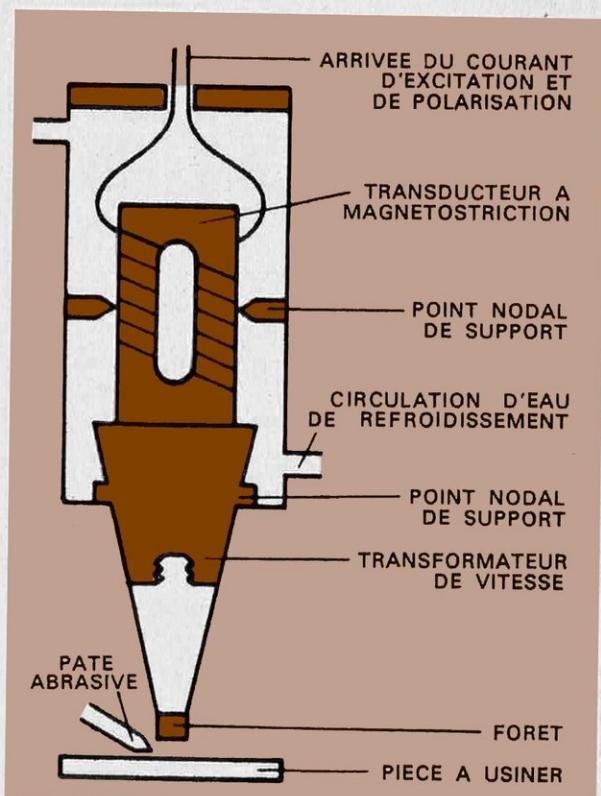
Dans ce cas, un sifflet ou une sirène produit l'énergie acoustique nécessaire pour obtenir une agglomération satisfaisante. La chambre de traitement doit être en résonance avec la fréquence acoustique. En fait, tout se passe comme si l'on avait affaire à un immense tube de Kundt où les particules en suspension dans les fumées s'agglomèrent aux nœuds de pression. Une puissance de 60 kW acoustiques peut traiter un courant gazeux de 2 500 m³ par minute.

Dans les liquides, au contraire, on obtient des effets d'émulsification et de dispersion, comme les émulsions huile-eau, la dispersion de particules solides dans un liquide (pigments dans un bain de teinture, pigments colorés dans les peintures...).

Cavitation des liquides. Dans les liquides, les effets des ultrasons sont essentiellement dus à la cavitation. On désigne par ce terme la formation, suivie d'un rapide écrasement, de cavités de gaz (bulles) au sein d'un liquide. Ces cavités prennent naissance en des points du liquide soumis à des pressions négatives ou, ce qui revient au même, à des forces de traction élevées. La cavitation se produit aussi au voisinage d'obstacles en rotation rapide comme les hélices d'un navire ou les pales des turbines hydroélectriques (écume). Avec une onde ultrasonore, la cavitation dans l'eau apparaît pour une intensité de 0,33 W par centimètre carré, qui correspond à une pression négative de 1 atmosphère. La cavitation peut être favorisée en des points appelés « germes de cavitation » qui préexistent dans le

liquide sous forme de microbulles de vapeur ou de gaz, ou de particules solides en suspension.

Les bulles de cavitation contiennent du gaz primitivement dissous dans le liquide ou de la vapeur de ce liquide; au moment où la pression ultrasonore devient positive, les bulles subissent un écrasement violent (implosion) qui donne naissance à une onde de choc. Lors de cet écrasement, la pression et la température à l'intérieur de la bulle prennent des valeurs considérables, de l'ordre de 1 000 atmosphères et 10 000 °C. Cette énergie emmagasinée dans un faible volume provoque



Le perçage par ultrasons met en œuvre un générateur à magnétostriction dont les vibrations sont amplifiées avant d'être communiquées au foret. Cette technique permet l'usinage précis de matériaux très durs.

l'érosion rapide des surfaces, excite la luminescence de certains liquides et peut déclencher des réactions chimiques. Le nettoyage par ultrasons utilise l'effet corrosif de la cavitation, qui produit un arrachement violent des particules au niveau des surfaces à nettoyer.

Usinage par ultrasons. Pour le perçage par ultrasons, on fixe un foret sur un générateur à magnétostriction. Le mouvement de va-et-vient de l'outil produit une usure rapide de la surface à usiner. On peut de cette façon per-

cer des trous de forme quelconque, et parfois très petits, dans des verres ou des céramiques. Afin d'augmenter la vitesse de coupe de l'outil, celui-ci est fixé sur l'émetteur à magnétostriction par l'intermédiaire d'une pièce métallique appelée transformateur de vitesse. Le transformateur de vitesse a pour but d'augmenter l'amplitude des vibrations imprimées à l'outil par l'émetteur à magnétostriction, donc d'augmenter la vitesse de coupe. Un principe analogue est mis en œuvre dans les fers à souder par ultrasons : la panne soumise aux vibrations d'un émetteur magnétostrictif a une action décapante rapide. Dans certains cas, le soudage se fait à froid par diffusion des deux milieux. C'est ainsi que l'on peut souder des fils d'aluminium sur du verre ou des céramiques. Ce dernier procédé se développe rapidement dans l'industrie de la microélectronique.

Diffraction de la lumière par les ultrasons. Parfois les ultrasons modifient seulement certaines propriétés du milieu sans l'altérer. C'est le cas d'une onde ultrasonore qui se propage dans un milieu transparent : elle provoque localement, par les variations de pression, des variations de l'indice de réfraction. Le milieu, traversé par un faisceau lumineux perpendiculaire au faisceau d'ultrasons, provoque alors la diffraction de la lumière tout comme un réseau ligné de l'optique. Cet effet a été décrit pour la première fois en 1932 par les physiciens français R. Lucas et P. Biquard. On dispose ainsi d'un véritable détecteur optique des ultrasons, qui permet des mesures de vitesse de propagation et de coefficient d'amortissement.

Si la largeur du faisceau lumineux est inférieure à la longueur d'onde ultrasonore, le phénomène est différent. On obtient alors une réfraction périodique du faisceau lumineux. Celui-ci se déplace alternativement de part et d'autre de sa direction initiale, opérant un véritable balayage optique de l'espace. Cette propriété a été employée dans des dispositifs de balayage de télévision utilisant un laser comme source lumineuse. Sous certaines conditions de lumière convergente, on peut même obtenir une véritable visualisation du champ sonore. Les photographies obtenues par F. Canac au laboratoire de Marseille illustrent de manière saisissante les possibilités de cette méthode connue sous le nom de stroboscopie.

Effets liés à l'aspect ondulatoire des ultrasons

Les actions mécaniques violentes des ultrasons ne sont bien marquées qu'à des puissances élevées. Aux puissances faibles ou aux fré-

quences élevées s'ouvre le domaine de la mesure, du contrôle et de l'analyse par ultrasons. Les ondes ultrasonores se propagent alors en faisceaux rectilignes peu divergents et pénètrent facilement les milieux conducteurs.

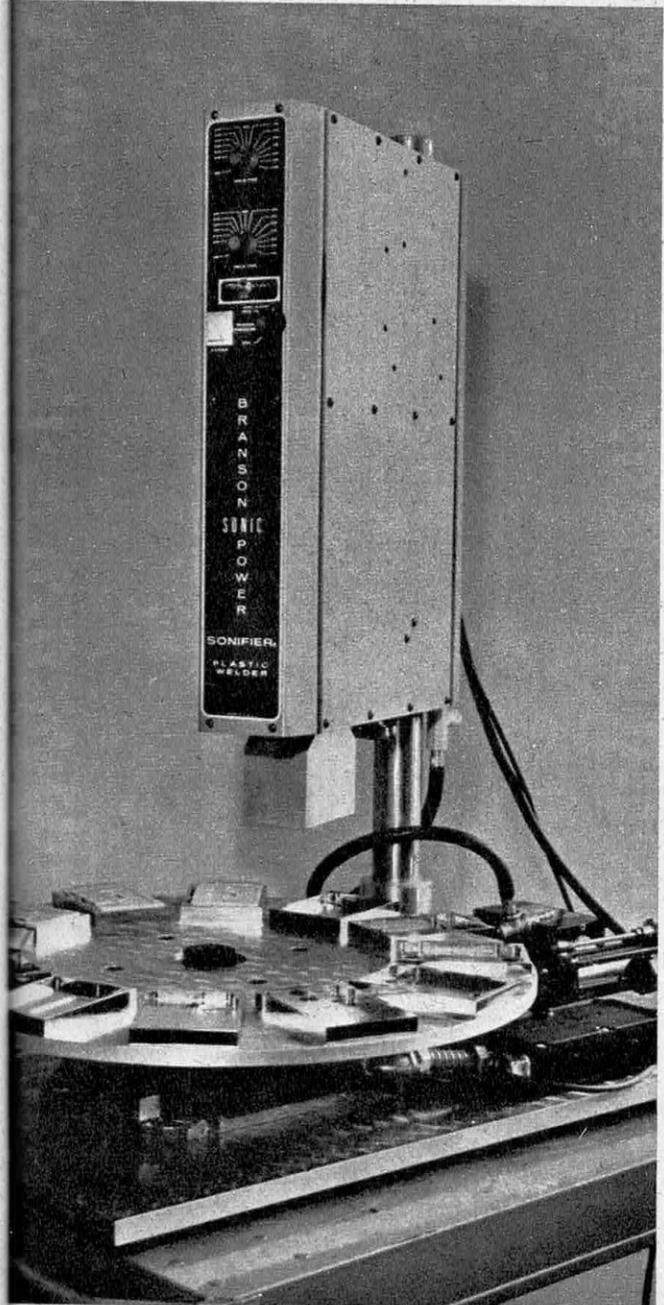
Directivité des sources ultrasonores. Pour le sondage et le contrôle, il est nécessaire de disposer d'un faisceau ultrasonore peu ouvert qui permet de localiser facilement la direction des cibles ou l'emplacement des défauts à l'intérieur d'une pièce métallique.

La directivité d'un faisceau est d'autant meilleure que le rapport longueur d'onde/diamètre de l'émetteur est petit. En effet si les dimensions de la source sont petites devant la longueur d'onde, les ondes en provenance de deux points extrêmes A et B (considérés comme des sources élémentaires) arriveront toujours en un point quelconque M de l'espace en concordance de phase, donnant une onde résultante non nulle. La différence de trajet entre les ondes émises par les points A et B étant toujours petite devant la longueur d'onde, la source est peu directive. Par contre, si le diamètre est grand devant la longueur d'onde, les ondes élémentaires issues des points homologues A et O, A₁ et O₁, etc. auront au point M de l'espace une différence de trajet égale à une demi-longueur d'onde (opposition de phase) donnant une onde résultante nulle. Le point M ne reçoit rien. L'émission est localisée suivant la normale à la source.

Une source de 6 cm de diamètre émettant dans l'eau à une fréquence de 600 kHz a un angle d'ouverture de 2,5° environ ; cette même source émettant sur 150 kHz a par contre un angle d'ouverture de 10°.

On remarque qu'il est plus facile d'obtenir une bonne directivité avec des sources de fréquences élevées. Pour les fréquences relativement basses, on conserve une bonne directivité en donnant aux sources des dimensions importantes. Par exemple, pour une émission dans l'eau à 10 000 Hz, si l'on veut conserver une ouverture de 10°, il faut prendre une source de 1 mètre de diamètre environ. De telles sources existent en acoustique sous-marine ; on les appelle « bases » ou encore « projecteurs » ; elles sont constituées d'un grand nombre d'émetteurs piézoélectriques de petites dimensions qui jouent le rôle des sources élémentaires A et O.

Contrôle non destructif des matériaux. Les sources ultrasonores très directives se prêtent bien au contrôle non destructif des matériaux. L'appareillage de contrôle par ultrasons fonctionne sur un principe identique à celui du radar hertzien : on émet une onde brève ou un train d'ondes qui, après réflexion sur une paroi, un défaut, une cible quelconque, donne



Branson Sonic Power.

A l'échelon industriel, la soudure par ultrasons est une application récente; on voit ici une machine automatique pour l'assemblage de « cassettes » pour bandes magnétiques. La machine produit 2 000 cassettes à l'heure.

un écho. Reçu par un récepteur piézoélectrique, et après amplification, cet écho apparaît sous la forme d'un top sur l'écran d'un oscilloscope cathodique. Une méthode semblable s'applique aussi en médecine pour la localisation de certaines tumeurs, l'examen de l'abdomen, etc.

La figure en bas de la p. 52 montre les échos

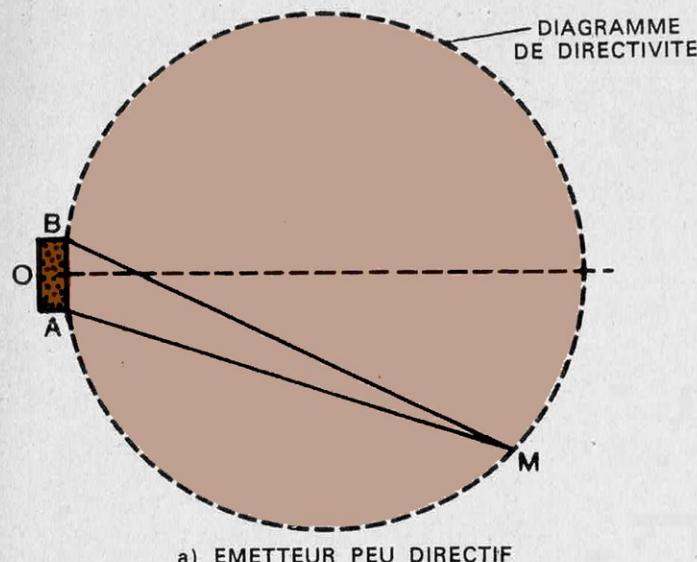
successifs reçus sur l'oscilloscope. Le premier correspond à un aller-retour. Si on connaît la vitesse de propagation dans le milieu, on pourra calculer la distance à laquelle se trouve le défaut ayant produit l'écho. Réciproquement, dans une pièce sans défaut, on observe un écho envoyé par la paroi de la pièce; on peut donc déduire la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans le milieu considéré. La vitesse de propagation est liée aux constantes élastiques du milieu : module d'Young, coefficient de compressibilité,... On a donc là un moyen simple pour déterminer ces coefficients.

Anomalies d'absorption — Relaxation. La figure montre aussi une succession d'échos ayant parcouru plusieurs aller-retour et d'amplitudes décroissantes. Cela provient des pertes d'énergie au cours de la propagation de l'onde, pertes qui dépendent du milieu de propagation. On les chiffre par un coefficient d'amortissement qui caractérise le milieu.

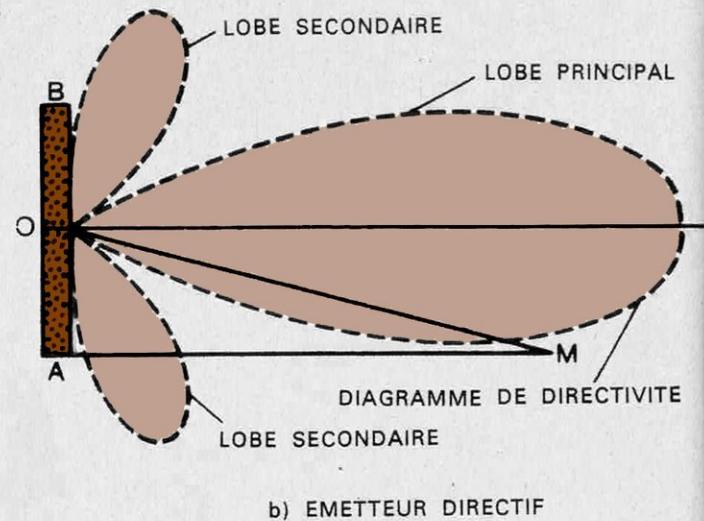
Théoriquement ce coefficient varie comme le carré de la fréquence ultrasonore. Pratiquement, dans certains milieux, en particulier les liquides organiques et les matières plastiques, ce coefficient passe par un ou plusieurs maximums prononcés à une fréquence bien déterminée.

Ce phénomène, connu sous le nom de relaxation, peut s'expliquer si on suppose que les molécules du milieu peuvent exister dans des états différents correspondant à des niveaux d'énergie différents, par exemple un niveau fondamental et un niveau excité. Le passage d'un niveau à l'autre demande un temps fini mesurable. Si ce mécanisme peut fonctionner durant une période de l'onde ultrasonore, le coefficient d'amortissement que l'on calcule est bien celui prévu par la théorie ; le milieu se comporte comme un système en état d'équilibre. Si l'on augmente la fréquence, donc si l'on réduit la période des oscillations ultrasonores, l'équilibre entre les deux niveaux énergétiques n'a plus le temps de se réaliser et on observe des anomalies d'absorption. Le coefficient d'amortissement passe alors par un maximum prononcé correspondant à une fréquence ultrasonore appelée fréquence de relaxation. L'étude de la relaxation ultrasonore renseigne sur les propriétés thermodynamiques et sur la structure interne de la matière. On parle même à ce propos d'une véritable spectroscopie acoustique.

Les techniques ultrasonores bénéficient des progrès constants de l'électronique. On trouve sur le marché, tant étranger que français, un choix important de matériels mettant en œuvre les ultrasons. Les progrès sont surtout sensibles dans les appareils de contrôle non destructif des matériaux, dans les appareils de mesures



a) EMETTEUR PEU DIRECTIF



b) EMETTEUR DIRECTIF

La directivité d'un faisceau ultrasonore, indispensable pour la localisation précise d'un défaut dans une pièce métallique, par exemple,

est d'autant meilleure, pour une même longueur d'onde, que la taille de l'émetteur est plus importante.

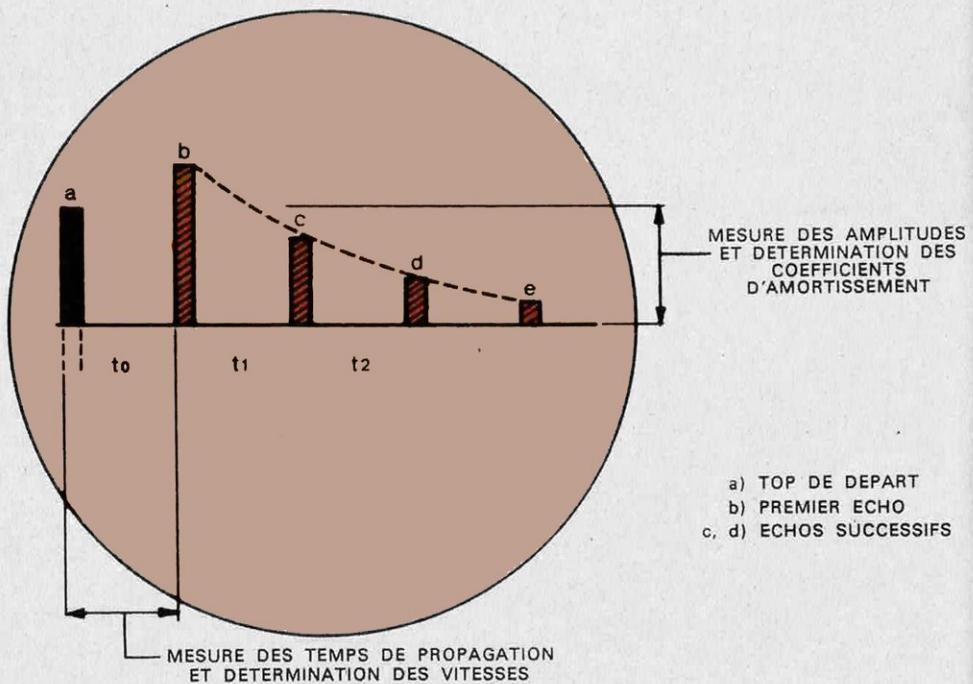
de débit, de niveaux ou d'épaisseurs. Là, les informations reçues par les capteurs sont traitées numériquement, le résultat des mesures affiché automatiquement.

Pour les fortes puissances, les appareils d'usage par ultrasons possèdent maintenant des performances poussées ; le soudage à froid nécessité par les besoins de la microélectronique illustre bien ce que l'on peut attendre de ces techniques.

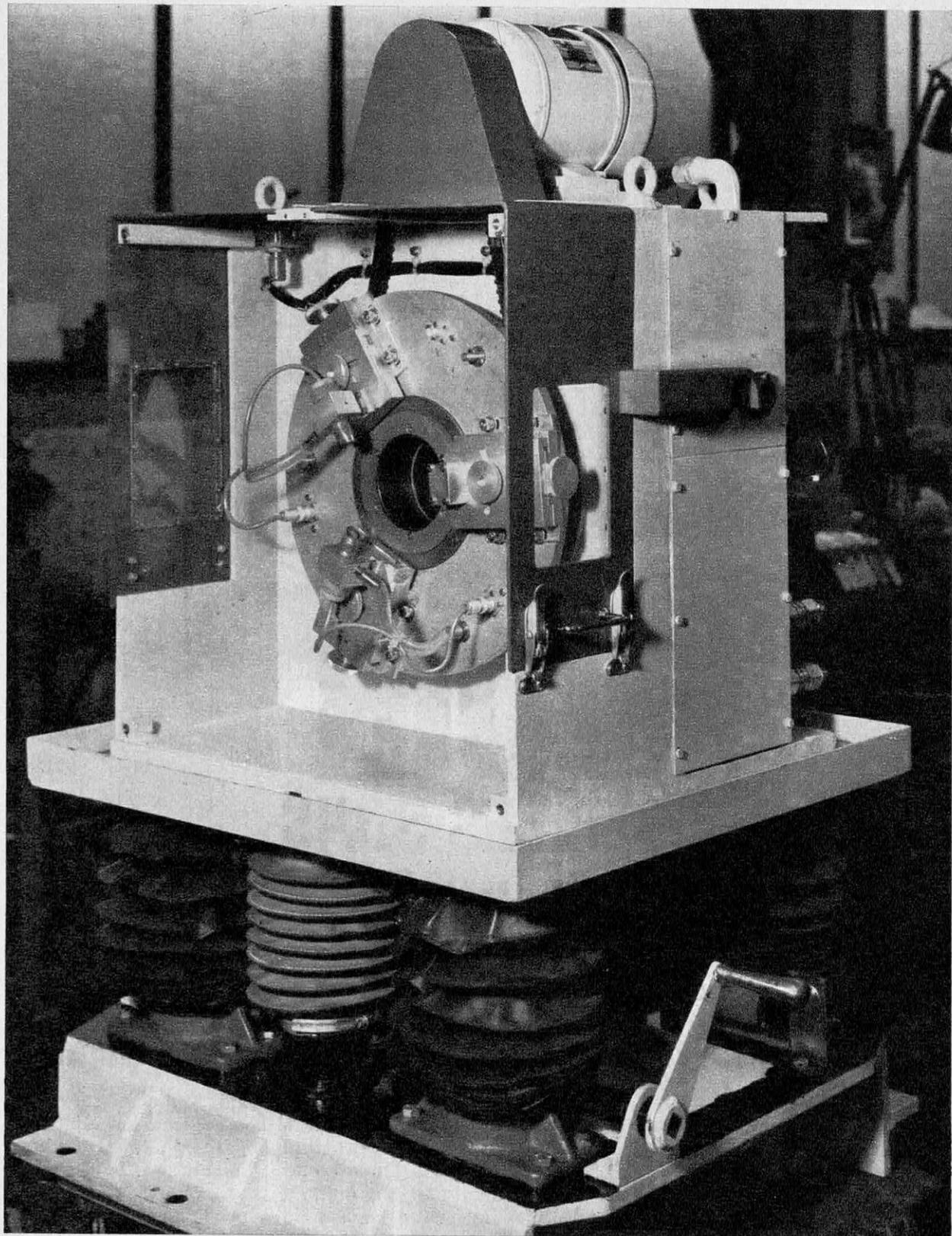
Par contre, les applications analytiques, les applications chimiques, etc., restent encore dans l'ensemble au stade du laboratoire. Il est vrai que le mécanisme intime des actions physiques ou chimiques des ultrasons est loin d'être entièrement connu, et que les rendements que l'on obtient restent faibles pour des applications industrielles rentables.

Claude GAZANHES

Pour le contrôle non destructif des matériaux, on émet une brève impulsion ultrasonore qui donne un écho sur une paroi ou sur un défaut. Après réception et amplification, cet écho est présenté sur l'écran d'un oscilloscopie cathodique. Si on connaît la vitesse de propagation dans le milieu, on peut calculer la distance à laquelle se trouve le défaut ainsi détecté.



a) TOP DE DÉPART
b) PREMIER ECHO
c, d) ECHOS SUCCESSIONS



Ce dispositif permet l'inspection en continu, dans l'usine de production même, de canalisations métalliques. Celles-ci défilent dans la lumière centrale. A la périphérie, le plateau circulaire qui porte les trois émetteurs ultra-

sonores est, en cours d'opération, animé d'un mouvement de rotation. Les échos, qui peuvent révéler un défaut de fabrication, sont présentés sur un écran cathodique.

C'est à l'aide d'ultrasons de fréquence 8 MHz que l'on a obtenu cette image (page de droite) d'un modèle réduit d'avion.



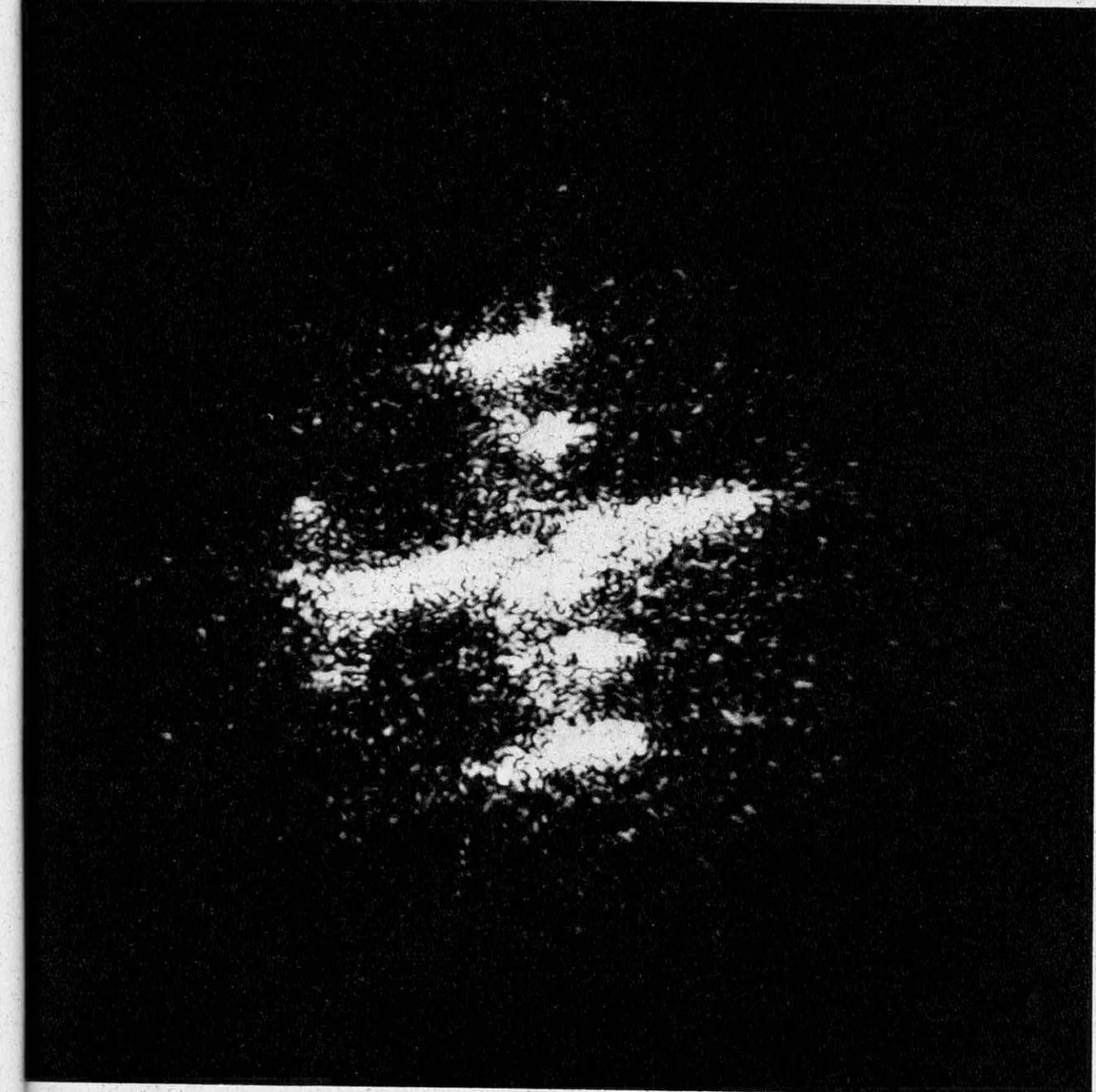
VOIR AVEC LES SONS... LES HOLOGRAMMES ACOUSTIQUES

Les possibilités du laser dans le domaine de la photographie en relief intégral, de l'*holographie*, sont maintenant bien connues. On sait que cette technique d'enregistrement et de reproduction des vibrations lumineuses émises par un objet matériel est due aux travaux de Dennis Gabor, en Angleterre. A l'époque, en 1947, les travaux de Gabor ne purent guère se matérialiser. On ne disposait pas de sources puissantes de lumière cohérente propres à former des hologrammes.

C'est seulement à partir de 1960, avec la mise au point du laser, que l'holographie allait se développer.

Hologrammes optiques et relief intégral

La technique des hologrammes optiques consiste, au stade de l'enregistrement, à fixer sur une émulsion photographique des phénomènes d'interférences lumineuses. Ces interférences sont produites dans le plan de l'émulsion entre un flux de lumière émis par un laser à gaz et sur le trajet duquel est placé l'objet à « holographier », et un faisceau « de référence » envoyé directement sur l'émulsion. Le faisceau lumineux émis par le laser est donc scindé en deux parties par un système optique approprié ; l'une constitue le faisceau « objet », l'autre le faisceau de référence.



A la sortie du laser, toutes les vibrations lumineuses sont de même amplitude et de même phase. Le faisceau est dit *cohérent*. Au niveau de l'émulsion photographique, le faisceau de référence conserve ces caractéristiques de cohérence. Il n'en est pas de même pour l'autre partie du faisceau, celle qui a rencontré l'objet. L'objet en question, ou au moins sa surface, est constitué d'une infinité de points matériels. Chacun de ces points renvoie une partie de la lumière qu'il reçoit. L'amplitude des vibrations lumineuses est donc modifiée. De plus, la diffusion s'opère dans l'espace, par ondes sphériques centrées sur le point-objet considéré. Les vibrations lumineuses ne sont plus en phase.

La lumière diffusée ou réfléchie par l'objet entier n'est donc plus cohérente. Toutefois, le système complexe d'ondes sphériques développé dans l'espace à partir de l'objet est riche d'informations : informations de luminosité (l'amplitude des vibrations) et informations relatives à la situation spatiale des points qui leur ont donné naissance (le déphasage des vibrations). Enregistrer sur l'émulsion l'amplitude des vibrations ne pose pas de problème. C'est ce que l'on réalise dans la photographie traditionnelle où l'intensité lumineuse (le carré de l'amplitude) est traduite en variations d'opacité de l'émulsion. Le problème est plus complexe pour l'information de phase. Pour

l'enregistrer, il faudra la convertir en variations d'intensité lumineuse. C'est ici qu'intervient le faisceau de référence.

Dans la technique d'enregistrement holographique, les trains d'ondes sphériques émis par la surface de l'objet vont, chacun pour son propre compte, produire sur l'émulsion des figures d'interférences avec l'onde de référence. En certains points de l'écran, les deux ondes arrivent en phase. Leurs amplitudes s'additionnent et il se forme une frange claire. Lorsque les ondes sont en opposition de phase, il y a interférence « destructive » et formation d'une frange sombre.

L'espacement des franges dépend de l'angle d'incidence de l'onde sphérique. Il rendra compte du déphasage des ondes lumineuses renvoyées par l'objet. Le contraste entre franges claires et sombres varie d'un point à un autre et traduit l'intensité du signal objet, autrement dit l'amplitude des vibrations lumineuses.

A la surface de l'émulsion développée, les divers systèmes de franges concentriques s'enchevêtront au point de devenir indistincts. Un hologramme optique ne présente qu'une mosaïque de points et de taches de densité optique variée. Pourtant, si on éclaire l'émulsion à l'aide du faisceau laser utilisé pour l'enregistrement, l'hologramme se conduit comme un réseau de diffraction modulant la lumière cohérente et la chargeant des informations de phase et d'amplitude enregistrées sur l'émulsion. En avant de l'hologramme se développe un système d'ondes sphériques absolument identique à celui fourni par l'objet lors de l'enregistrement.

En fait, il se forme dans ces conditions non pas un, mais deux systèmes d'ondes sphériques. L'un diverge à partir du plan de l'hologramme et semble émaner de l'emplacement qu'occupait l'objet lors de l'enregistrement. Il se forme en ce point, dans les montages les plus simples, une image virtuelle. L'autre système est identique, mais ses courbures sont inversées et son trajet convergent. Il produit en avant de l'hologramme une image réelle qui peut être recueillie sur une plaque photographique.

Ces images constituent des répliques tridimensionnelles de l'objet, d'une extraordinaire fidélité. Elles présentent toutes les caractéristiques de perspective et de parallaxe propres à l'objet lui-même. Si l'observateur déplace la tête, il découvrira un aspect de l'image qui lui était caché jusque-là.

Aussi intéressante que soit l'holographie optique, elle n'est évidemment pas utilisable dans les milieux opaques ou qui absorbent trop rapidement les ondes lumineuses. Les ondes sonores et ultrasonores ont, au contraire, de

bonnes caractéristiques de transmission dans les corps homogènes solides ou liquides. Pour cette raison, on a depuis longtemps utilisé les ultrasons pour former des images à deux dimensions de l'intérieur des matériaux, des structures sous-marines ou, plus récemment, des organes internes. Les échos recueillis, transformés en tensions électriques, commandent le déplacement d'un stylet sur une bande enregistreuse ou d'un spot lumineux sur un écran cathodique.

Toute onde peut former des hologrammes

L'holographie n'est, fondamentalement, autre que l'enregistrement d'un front d'ondes. Elle est donc applicable à n'importe quel type d'onde, électromagnétiques, électriques et, pourquoi pas, sonores. Réaliser un hologramme acoustique peut, à condition que nous sachions en tirer une image visible, nous donner la troisième dimension, qui fait défaut aux méthodes d'échosondage et de visualisation acoustique plus traditionnelles.

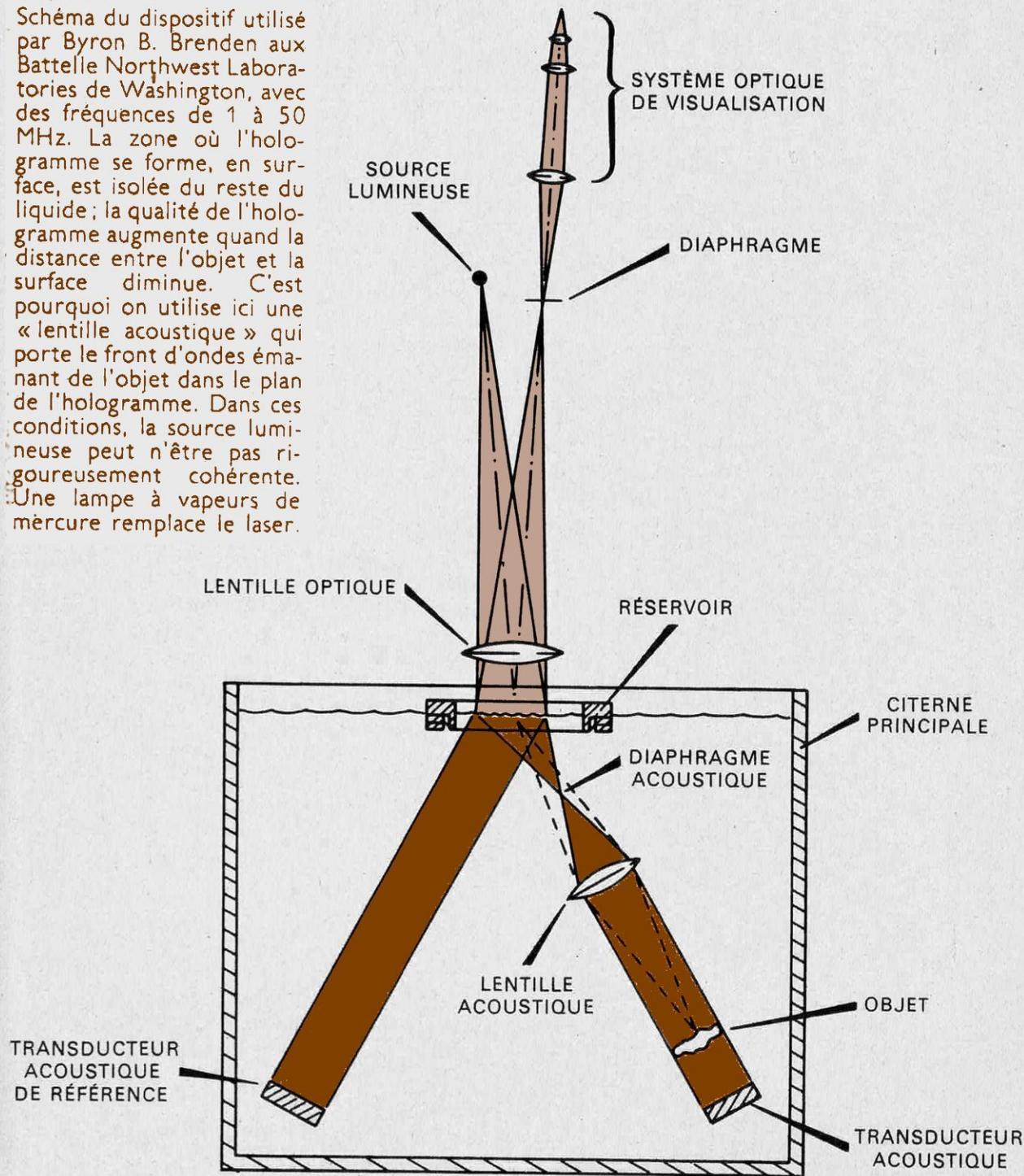
Les émetteurs ultrasonores du type piézoélectrique ou à magnétostriction constituent des sources parfaitement cohérentes. En « éclairant » l'objet avec un faisceau d'ultrasons fournis par un tel émetteur, on produira, comme en holographie optique, un front d'ondes sphériques. Ces ondes seront amenées à produire des interférences avec un faisceau ultrasonore de référence. L'enregistrement de ces phénomènes pose, comme nous le verrons, de nombreux problèmes.

Une première méthode pour former des hologrammes acoustiques consiste à immerger au fond d'une citerne deux émetteurs d'ultrasons, de fréquence 5 MHz par exemple. Leurs émissions sont dirigées vers la surface et l'objet à « holographier » est placé sur le trajet d'un des deux faisceaux. En surface, la pression acoustique soulève l'eau et les phénomènes d'interférences entre le faisceau objet et le faisceau de référence se traduisent par des ridelles et des vaguelettes immobiles dont l'ensemble constitue l'hologramme acoustique. Il reste à « lire » cet hologramme. Pour cela, on utilise, comme en holographie optique, un faisceau laser. A l'égard des vibrations lumineuses cohérentes, les « creux » et les « bosses » formés à la surface de l'eau se comportent comme un réseau de diffraction codé. Le flux lumineux renvoyé par la surface de l'eau est chargé d'informations et on voit, en particulier, se former une image au-dessous de la surface. Cette image, bien que tridimensionnelle, est déformée (sauf pour un objet plan) et beaucoup plus éloignée que n'était l'objet. Ce double phénomène, très important en

holographie acoustique, est provoqué par la différence des longueurs d'ondes d'enregistrement et de lecture. Le rapport des longueurs d'ondes acoustiques aux longueurs d'ondes optiques utilisées est de 300, 400 ou même 500. A l'enregistrement, l'espacement des franges d'un hologramme, qu'il soit optique ou acoustique, est directement lié à la longueur d'onde. Au stade de « reconstruction », l'angle de diffraction du faisceau laser varie comme le rapport de sa longueur d'onde à

l'espacement des franges. Dans le cas d'un hologramme acoustique « lu » par un faisceau laser, l'angle de diffraction sera donc de beaucoup réduit par rapport à ce qu'il serait pour un hologramme optique. Dans ces conditions, les images se formeront plus loin par rapport au plan de l'hologramme (l'éloignement est égal au rapport des longueurs d'onde). Pour un objet complexe, il y aura même un effet de distorsion longitudinale. On est, ainsi, généralement conduit à exami-

Schéma du dispositif utilisé par Byron B. Brenden aux Battelle Northwest Laboratories de Washington, avec des fréquences de 1 à 50 MHz. La zone où l'hologramme se forme, en surface, est isolée du reste du liquide; la qualité de l'hologramme augmente quand la distance entre l'objet et la surface diminue. C'est pourquoi on utilise ici une « lentille acoustique » qui porte le front d'ondes émanant de l'objet dans le plan de l'hologramme. Dans ces conditions, la source lumineuse peut n'être pas rigoureusement cohérente. Une lampe à vapeurs de mercure remplace le laser.



ner l'image au moyen d'une lunette. La résolution de cette image n'est d'ailleurs pas très bonne, en raison des longueurs d'ondes acoustiques utilisées pour former l'hologramme.

La lecture directe de l'hologramme acoustique au moyen d'un laser peut être qualifiée de méthode « temps réel ». On peut utiliser aussi une méthode « temps différé », consistant à photographier l'hologramme acoustique. On obtient alors, sous forme de diapositive, un équivalent optique de l'hologramme acoustique. Par réduction photographique de la diapositive dans le rapport des longueurs d'ondes, on pourra obtenir une reconstruction laser sans éloignement ni distorsion longitudinale. Mais le rapport de réduction idéal rendrait la solution peu commode et la résolution très mauvaise. Pour cette raison, on adopte généralement un rapport plus faible. La méthode utilisant la surface de l'eau pour former un hologramme acoustique n'est d'ailleurs pas sans inconvénients. La surface est très sensible aux vibrations parasites, lesquelles sont difficiles à éliminer. De plus, si les deux émetteurs d'ultrasons ne vibrent pas exactement à la même amplitude, des courants de surface vont apparaître qui tendent à disloquer l'hologramme. On est tout de même parvenu à améliorer la technique en plaçant en surface une fine membrane de plastique Mylar, elle-même recouverte d'une pellicule d'huile. L'hologramme se forme à la surface de l'huile, moins étroitement soumise aux phénomènes perturbateurs. La faible tension superficielle de l'huile donne d'ailleurs un hologramme acoustique plus « fouillé » que ne fait l'eau pure. Nous avons vu utiliser cette méthode par les chercheurs du centre de Corbeville de la Thomson-CSF.

Où l'électronique intervient

Pour se soustraire aux phénomènes parasites développés en surface, on peut enregistrer les phénomènes d'interférence au sein même de l'eau. A ce niveau, aucun phénomène visible ne se produit et la détection se fera acoustiquement, par balayage. Un détecteur recueillera les variations de pression acoustique dans un plan situé sous la surface de liquide. Le signal électrique produit à la sortie du détecteur sera utilisé de façon variable suivant le type de balayage utilisé.

Dans tous les cas, la détection acoustique fait apparaître une possibilité du plus haut intérêt. Le détecteur fournit un signal électrique. Or, à l'autre extrémité du dispositif, nous avons aussi un signal électrique : le signal envoyé par le générateur commun aux deux émetteurs d'ultrasons. Le signal de sortie, quant à lui, est affecté d'un déphasage et d'une

atténuation (caractéristiques d'un point à la surface de l'objet) par rapport à ce signal d'entrée. On peut alors se contenter de comparer signal d'entrée et signal de sortie, en supprimant l'onde de référence. On évite par là les problèmes liés à l'existence de deux faisceaux d'ultrasons dans la cuve et l'on dispose d'une référence de bien meilleure qualité.

La « simulation » de l'onde de référence est ainsi utilisée dans les divers types de méthodes à balayage.

Le balayage mécanique utilise un hydrophone dont la tension de sortie est ajoutée à la tension de référence dans un amplificateur mélangeur, la tension résultante modulant le flux lumineux d'une ampoule électrique entraînée par le dispositif de balayage. L'ampoule se déplace devant un appareil photographique dont l'obturateur est laissé ouvert. Sur l'émulsion se forme, point par point, un hologramme optique. Cette méthode a l'inconvénient de prendre beaucoup de temps, et d'autant plus que le balayage est plus fin. La qualité de ce dernier est de toute façon limitée par la taille du détecteur. On n'enregistre qu'un échantillonnage assez grossier des fronts d'ondes et la qualité des images s'en ressent.

Le balayage électronique est beaucoup plus rapide. Il utilise le tube de Sokolow, véritable caméra de télévision à détecteur piézoélectrique capable de convertir des pressions acoustiques en images visibles. La caméra est maintenue fixe sur le trajet du faisceau ultrasonore « éclairant » l'objet. Chaque point du cristal piézoélectrique entre en vibration sous l'effet de l'onde ultrasonore diffusée et il s'y développe une tension électrique. Au niveau du cristal se forme donc une image électrique. Cette image est balayée par un faisceau d'électrons. L'hologramme se forme sur un écran cathodique. Il suffit de le photographier pour obtenir un hologramme optique utilisable par un faisceau laser. Toutefois, le tube de Sokolow présente certains inconvénients. La pression de l'eau sur la face externe du cristal (dont l'autre face est soumise au vide), en particulier, engendre des déformations qui nuisent à la qualité de l'hologramme.

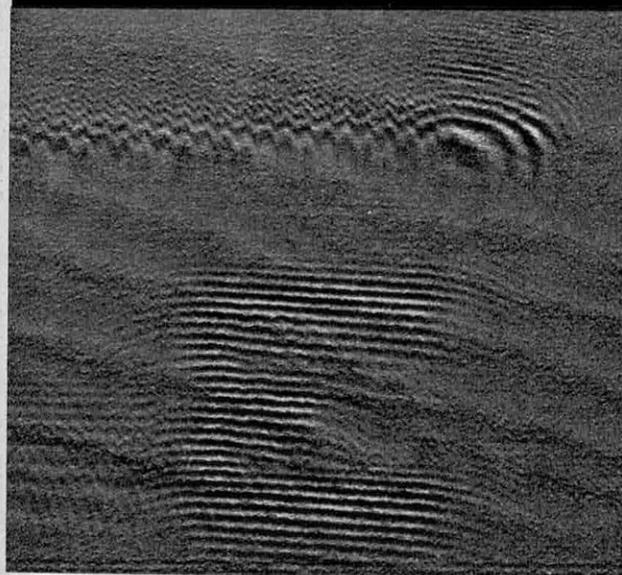
Des hologrammes acoustiques dans l'air

La détection acoustique par balayage, associée à la simulation de l'onde de référence, est utilisable aussi dans l'air. Cette méthode a été largement utilisée aux Etats-Unis par Methrell et ses collaborateurs du Douglas Advanced Research Laboratory. Il s'agit, à vrai dire, de travaux surtout spéculatifs, mais qui ont permis de mieux connaître beaucoup d'aspects



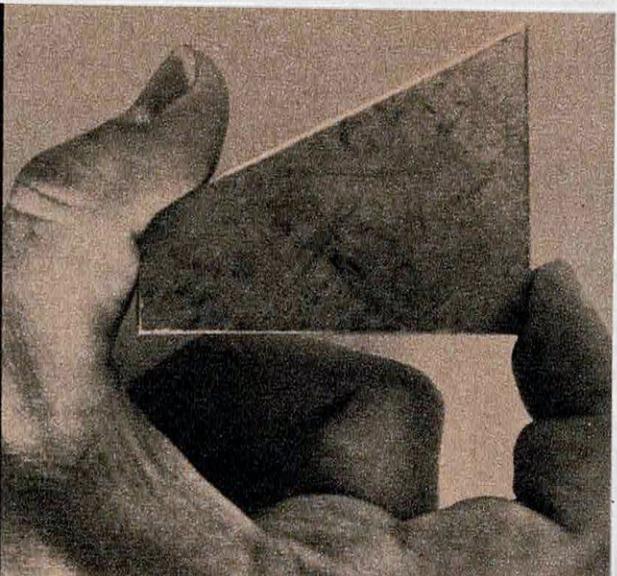
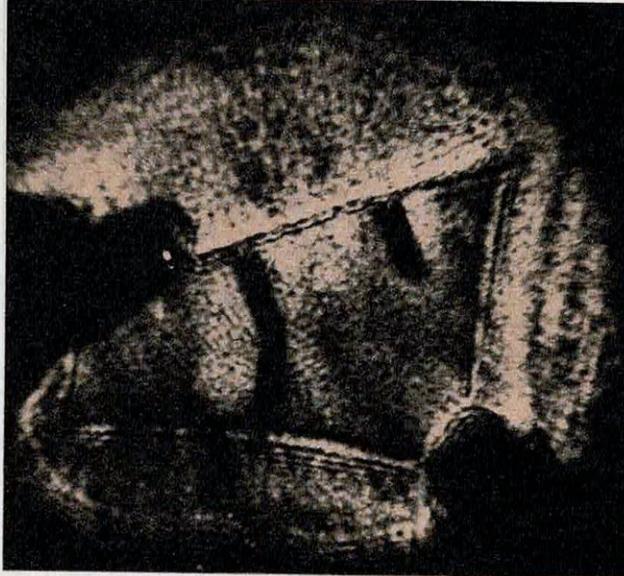
En bas de page, à gauche, photographie d'un hologramme acoustique (ultrasons de 10 MHz). Les interférences dessinent clairement la silhouette d'une lettre E utilisée comme objet. Sur le bord supérieur du même document, les figures correspondent à un autre objet, une vis en plastique (à droite), et surtout à son

support horizontal dans le montage réalisé ici. Utilisé sous forme de diapositive, avec un laser, l'hologramme fournit la « reconstruction » ci-dessous, où la mise au point a été effectuée sur la vis, les deux objets ne se trouvant pas à la même profondeur de champ. En haut de page, un chercheur examine un tel document.



University of California
Une technique de visualisation des ondes acoustiques comparable à l'holographie acoustique a été utilisée à l'Université de Californie. Elle met à profit la diffraction d'un faisceau de lumière cohérente par les ultrasons. On parvient ainsi à de véritables « radiographies » ultrasonores de la matière vivante. Le document ci-dessus met en

évidence la colonne vertébrale et les organes internes (taches sombres) d'un petit poisson tropical. La lumière du laser se charge des informations portées par le front d'ondes ultrasonores diffusées par le poisson. Celui-ci est en effet soumis, à l'intérieur d'une « cellule acoustique » en aluminium à des ultrasons de fréquence 25 MHz.



Holotron Corporation

Un exemple d'application possible de l'holographie acoustique aux contrôles non-destructifs. L'hologramme révèle, sous forme de

larges bandes sombres, de minces canaux férés intentionnellement dans l'épaisseur d'un coin métallique.

fondamentaux de l'holographie acoustique. La qualité des images obtenue est, compte tenu des fréquences utilisées, 12 000 à 25 000 Hz, franchement médiocre.

L'objet « illuminé » dans ces expériences est souvent une feuille de plastique dans laquelle est découpée la silhouette d'une lettre de l'alphabet. La source sonore est placée d'un côté, le détecteur acoustique, à balayage mécanique, de l'autre. Le signal résultant du mélange signal-objet-signal de référence module en intensité un faisceau d'électrons balayant l'écran d'un tube cathodique.

Parmi les résultats les plus intéressants, notons la possibilité de laisser le détecteur fixe et de faire exécuter le balayage de l'objet par la source sonore. Dans les deux cas, les hologrammes obtenus sont identiques et les images reconstruites aussi. La simulation de l'onde de référence a permis, par ailleurs, des manipulations intéressantes. En corrigent, par exemple, l'amplitude des signaux objet (c'est-à-dire en leur donnant une valeur uniforme), on a pu obtenir des hologrammes « phase seulement ».

Le champ des applications

L'holographie acoustique est actuellement en plein développement au niveau des laboratoires. Il reste beaucoup à faire pour améliorer la qualité des images, définir les méthodes de conversion optique les mieux appropriées et faire passer la technique au plan des réalisations pratiques.

Les applications possibles sont d'ailleurs nom-

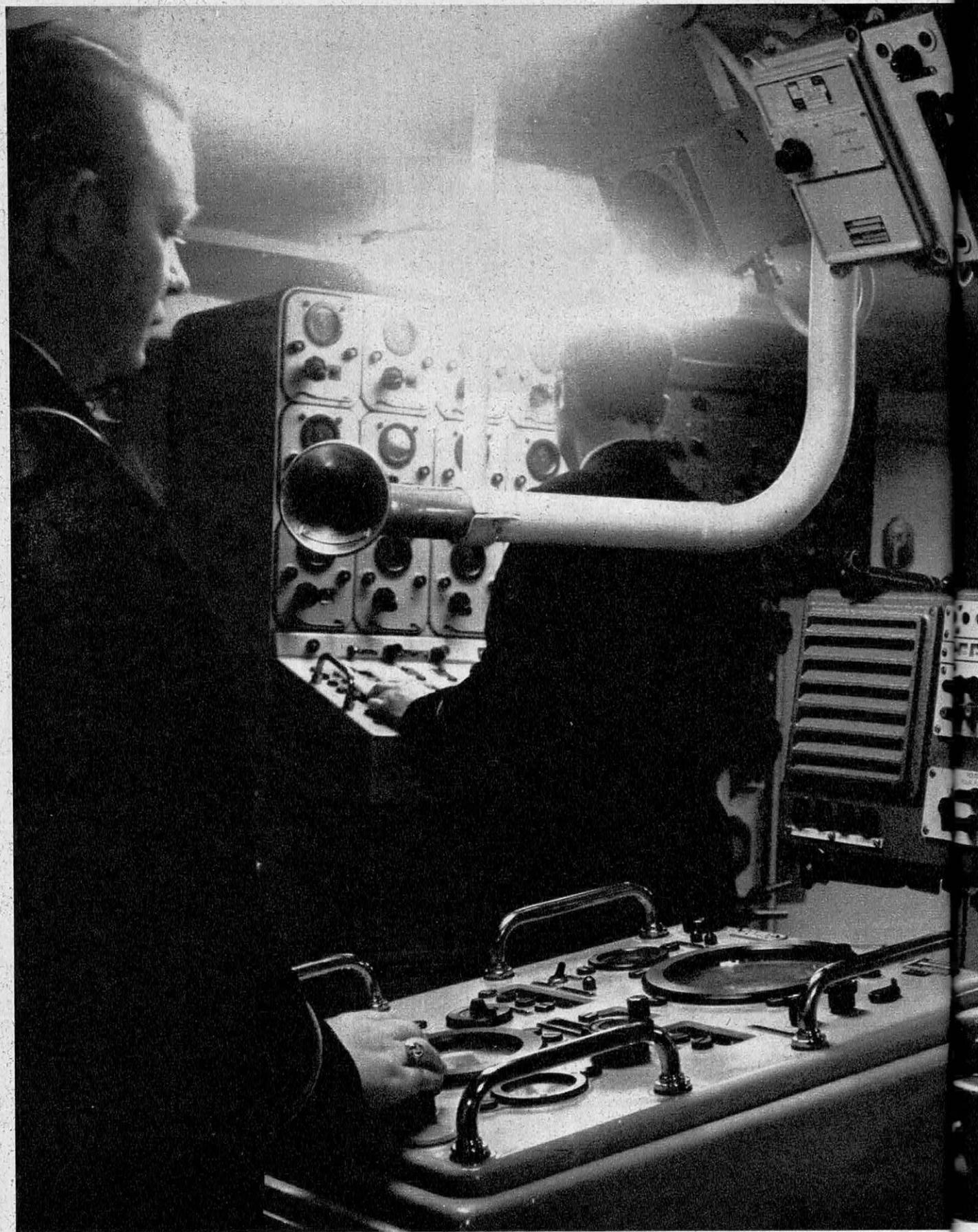
breuses. La plupart visent au perfectionnement des techniques d'échosondage, de mise au point plus ou moins récente, évoquées précédemment. Ainsi, dans le domaine militaire, les sonars ne permettent guère, dans l'état actuel des choses, d'identifier avec certitude un objet immergé. L'holographie acoustique fournira peut-être un jour l'image véritable d'un sous-marin en plongée ; des travaux sont en cours dans cette direction, en particulier aux Etats-Unis.

En contrôle industriel ou pour les diagnostics médicaux, on utilise déjà des ultrasons à haute fréquence (1 à 5 MHz) qui donnent de fortes réfractions et réflexions aux interfaces entre milieux de nature différente. En médecine, en particulier, on pourra, en combinant ultrasons et holographie, obtenir des images tridimensionnelles des organes mous et des tissus. Les rayons X, d'ailleurs beaucoup plus nocifs que les ultrasons aux fréquences considérées, ne donnent pas cette possibilité.

Les applications de l'holographie acoustique intéressent aussi les sondages géologiques ou pétroliers. Les discontinuités à l'intérieur des dépôts sédimentaires sont beaucoup plus intéressantes que la matière elle-même et les propriétés des ultrasons sont bien adaptées à leur reconnaissance. L'holographie peut apporter beaucoup dans ce domaine.

On peut aussi envisager des applications à l'archéologie permettant, avant même d'entreprendre les fouilles, un examen en profondeur, et en trois dimensions, d'un gisement.

Serge CAUDRON



E.C. Armées-Alcatel

LA GUERRE DES SONS

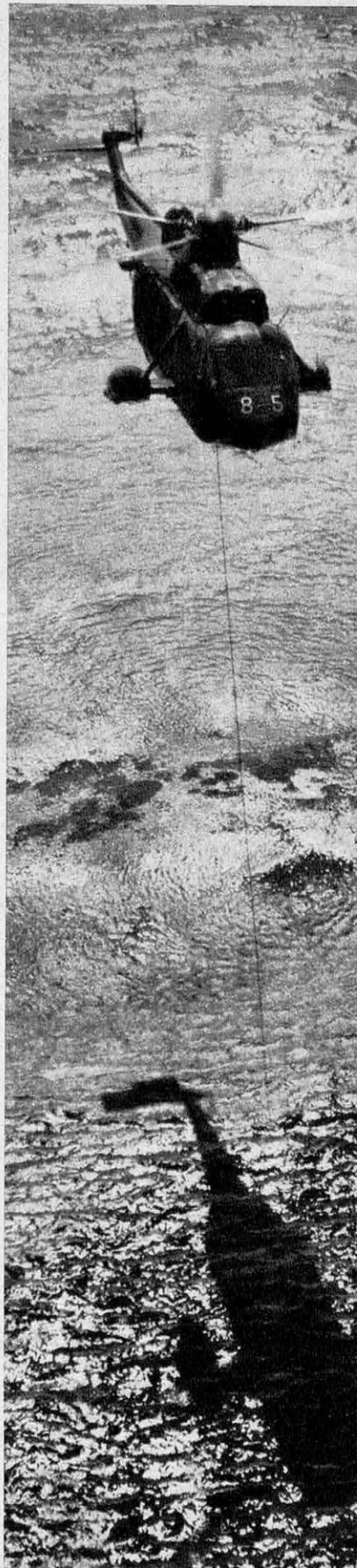
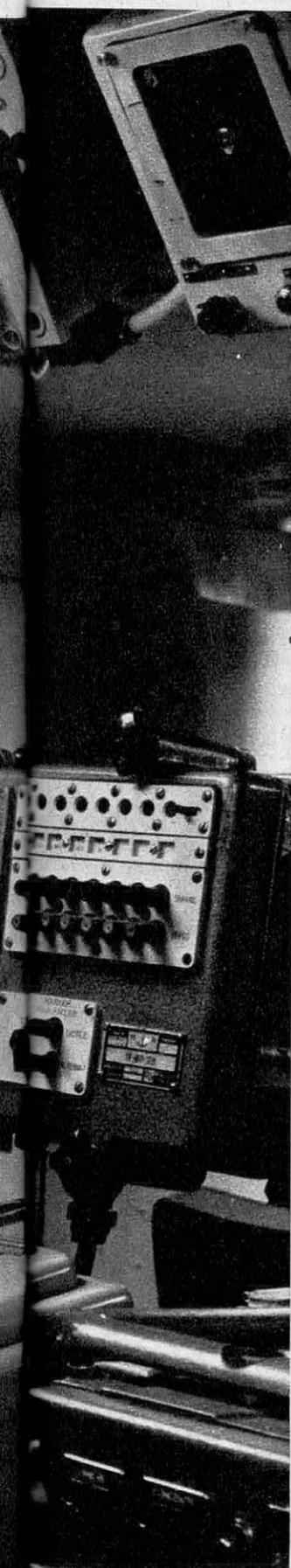
La guerre des sons n'est pas nouvelle. Détecter au son les déplacements d'un ennemi, se faire soi-même aussi silencieux que possible pour n'être pas découvert, autant de « trucs » qui furent certainement utilisés dès la plus haute antiquité.

Au XX^e siècle, le progrès technique et l'application massive des découvertes scientifiques allaient donner à la guerre des sons un caractère complexe et de plus en plus raffiné. Il y eut d'abord, en 1914-1918, les postes d'écoute installés dans les tranchées, puis l'utilisation des premiers « hydrophones » pour le repérage des sous-marins allemands. Plus tard, avant l'apparition du radar, le pointage acoustique des pièces de D.C.A. permettait d'ajuster leur tir, la nuit ou par mauvais temps.

Sur terre et dans les airs, on constate, depuis les toutes dernières années, un regain d'intérêt pour les méthodes de détection acoustique. Ainsi, l'U.S. Army s'est vu proposer par la firme Sylvania un dispositif d'alarme de très petite taille, capable de déceler dans un rayon de 25 m l'approche d'un combattant ennemi. Le déplacement de celui-ci provoque dans le sol des vibrations qui sont recueillies par le détecteur. Un système complexe de filtres permet d'éliminer les vibrations parasites provoquées par la pluie ou le passage d'un avion. Les vibrations significatives entraînent au contraire l'émission d'un signal hertzien de plusieurs centaines de mètres de portée. Dans le domaine du matériel volant, l'U.S. Army a confié à la firme Lockheed la réalisation d'un avion de reconnaissance « silencieux », le Yo-3A. Cet appareil est équipé d'un moteur six cylindres et d'une hélice à six pales. A titre privé, Lockheed a d'ailleurs construit et fait voler un autre avion silencieux, le Q-Star, à moteur rotatif Curtiss-Wright dérivé du Wankel. De puissance supérieure au Yo-3A, le Q-Star serait encore plus silencieux. De son côté, l'U.S. Air Force prévoit la construction d'engins robots de reconnaissance, propulsés par réacteur « silencieux » et pou-

◀ A bord d'un escorteur d'escadre de la Marine nationale, le central de lutte anti-sous-marin.

Le sonar plongeant, immergé par hélicoptère, permet de localiser et de suivre un sous-marin dans une zone prédéterminée. ▶





Un étrange oiseau, l'avion de reconnaissance silencieux Q-Star mis au point pour l'US Army. L'arbre entraînant l'hélice à six pales

passe au-dessus du cockpit. Les 17 mètres d'envergure assurent une bonne portance à faible puissance du moteur.

vant déceler acoustiquement le déplacement de chars ou de camions ennemis.

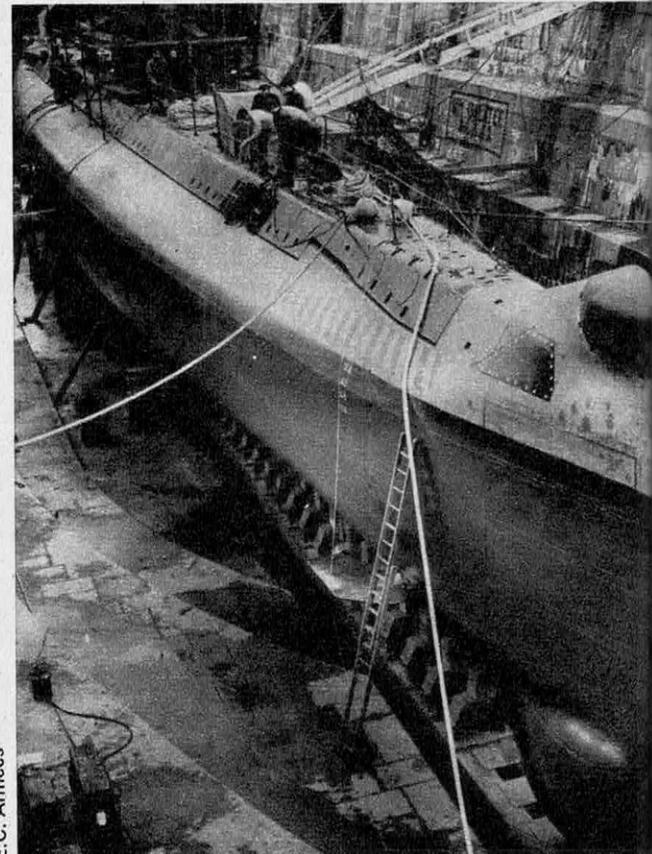
Un domaine privilégié

Le domaine sous-marin a été, et reste, celui où les techniques de détection et de localisation par ondes acoustiques ont atteint leur plus grand développement. Contre un sous-marin en immersion complète, il n'est pas question de se servir du radar. Le rayonnement électromagnétique que les radars utilisent ne pénètre pas dans l'eau, sauf aux très basses fréquences. Encore est-il très rapidement absorbé. Quant à la détection visuelle, par exemple d'un avion, elle n'est pas utilisable au-delà de 30 m d'immersion, dans les conditions les plus favorables.

Le problème se pose en termes analogues pour le sous-marin dont la mission sera d'intercepter un navire de surface ou un autre sous-marin.

Contrairement au rayonnement électromagnétique, les vibrations sonores se propagent bien dans l'eau. En milieu sous-marin, elles sont pratiquement les seules capables de transmettre une information. Cette information servira à la détection et à la localisation de « l'hostile ». Elle servira aussi à sa destruction par torpille à autoguidage acoustique (ou encore par mine à mise à feu acoustique).

Dans le domaine militaire, l'acoustique sous-marine est utilisée selon deux modes prin-



E.C. Armées

Le sonar en bulbe d'étrave est un équipement classique des sous-marins et navires de surface de construction récente.

paux. Le mode passif consistera dans l'écoute des fréquences acoustiques émises spontanément par un navire ou par un sous-marin. On obtiendra ainsi la direction de la source de bruit, mais non sa distance. Pour cela, il faut au moins deux récepteurs assez espacés l'un de l'autre. Le mode actif pratiquera par émission d'une impulsion acoustique dans une direction donnée et examen des échos obtenus. On obtient alors non seulement la direction de la surface réfléchissante (son azimut, pour les marins) mais encore sa distance. Elle est égale au demi-produit du temps de parcours aller et retour de l'onde sonore par la célérité du son dans l'eau.

En détection active, la caractéristique fondamentale de l'émetteur est sa directivité (l'énergie rayonnée par l'émetteur est concentrée dans un cône d'ouverture étroite centré sur son axe). Celle-ci est liée à la taille de l'émetteur et à la longueur d'onde de l'impulsion. Pour avoir une bonne directivité avec un émetteur pas trop encombrant, on est conduit à utiliser seulement des ondes de fréquence élevée, des ultrasons.

Les émetteurs ultrasonores, les sonars actifs, ont donc l'avantage de la précision de détection. Ils ont aussi des inconvénients. Les ultrasons sont plus rapidement absorbés par l'eau de mer que les fréquences audibles et cet effet est d'autant plus prononcé que la fréquence est plus grande. On est donc limité en portée de détection, même si on augmente la puissance de l'émetteur. Du point de vue strictement militaire, l'émission d'un sonar actif n'est d'ailleurs pas toujours recommandée. Elle signale la présence du navire ou du sous-marin. L'écoute passive reste évidemment discrète. Toutefois, comme nous le verrons, les sous-marins modernes sont de plus en plus silencieux et l'on est bien obligé de recourir au sonar actif.

Les sonars ne sont pas utilisés seulement par les navires de guerre. On sait le développement de l'échosondage pour la détection des bancs de poissons, pour l'étude des fonds marins ou la détection d'obstacles. La technique fondamentale est la même dans tous les cas : l'utilisation du transducteur électroacoustique. Celui-ci peut-être piézoélectrique, magnétostrictif ou à céramiques électrostrictives. De développement plus récent, ces dernières permettent d'atteindre à l'émission des puissances considérables.

Les problèmes de la détection

Nous avons vu que, du point de vue militaire, l'écoute passive était souvent préférable. Quels bruits peut-on détecter dans ces conditions ? Il s'agit, pour un navire de surface « écouté »

par un sous-marin, des bruits de sa machine-rie et du brassage de l'eau par les hélices. Dans le cas d'un sous-marin classique, le bruit en immersion profonde avec marche sur les batteries est réduit à celui des hélices. Mais ces batteries sont de faible capacité et doivent être rechargées souvent ; le sous-marin navigue alors à faible immersion, au snorkel, et fait fonctionner ses moteurs diesel. Ceux-ci sont bruyants et le sous-marin peut être facilement détecté, de très loin. Dans ces conditions, d'ailleurs, le snorkel pourra être repéré au radar ou même à vue.

Le problème a été totalement bouleversé par l'apparition du sous-marin à propulsion nucléaire. Disposant d'une source d'énergie pratiquement inépuisable, il peut rester en immersion profonde pendant trois mois. Le bruit d'hélice est alors le seul décelable. Celui-ci n'est d'ailleurs important qu'au-dessus d'une certaine vitesse et il diminue avec la profondeur. Classiques ou nucléaires, les sous-marins de construction récente sont capables de naviguer à des profondeurs toujours plus grandes et le problème de la détection se trouve compliqué d'autant.

Le problème de la guerre sous-marine se trouve bouleversé aussi dans la mesure où le sous-marin à propulsion nucléaire peut naviguer en immersion à des vitesses de 30 à 35 noeuds, supérieures à celles des navires de surface. Les possibilités d'attaque ou d'évasion se trouvent donc multipliées pour le sous-marin nucléaire. La détection par ondes sonores en milieu marin pose en elle-même des problèmes complexes et encore très mal connus. La vitesse de propagation du son à travers les masses océaniques varie assez largement en fonction de nombreux facteurs : température, salinité, pression, etc. La température joue à cet égard un rôle très important, en dehors des grandes profondeurs où elle se stabilise.

Les eaux superficielles présentent des discontinuités thermiques importantes. Elles entraînent des réfractions ou même, sous certaines incidences, des réflexions totales des ondes sonores. Pour un navire détecteur, il existera ainsi des « zones d'ombre » à l'intérieur ou au-dessous desquelles un sous-marin pourra se dissimuler.

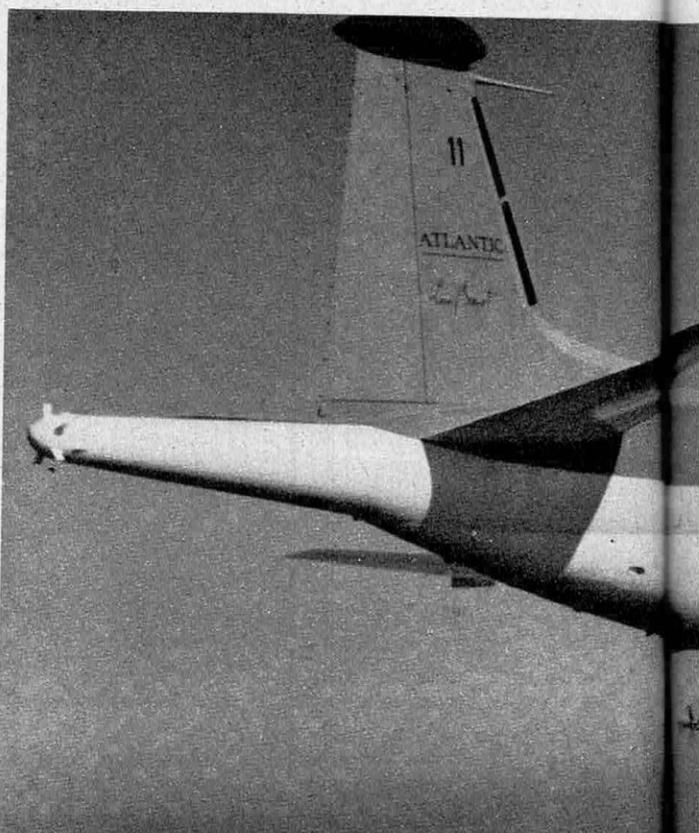
A des profondeurs relativement importantes, variables avec la latitude et correspondant à une vitesse de propagation minimum, certaines couches d'eau joueront au contraire un rôle de guides d'ondes concentrant l'énergie acoustique. La portée des ondes acoustiques pourrait atteindre à ce niveau des valeurs assez stupéfiantes, de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres.

Il faut encore tenir compte de la « Deep Scattering Layer », ou couche profonde de diffu-

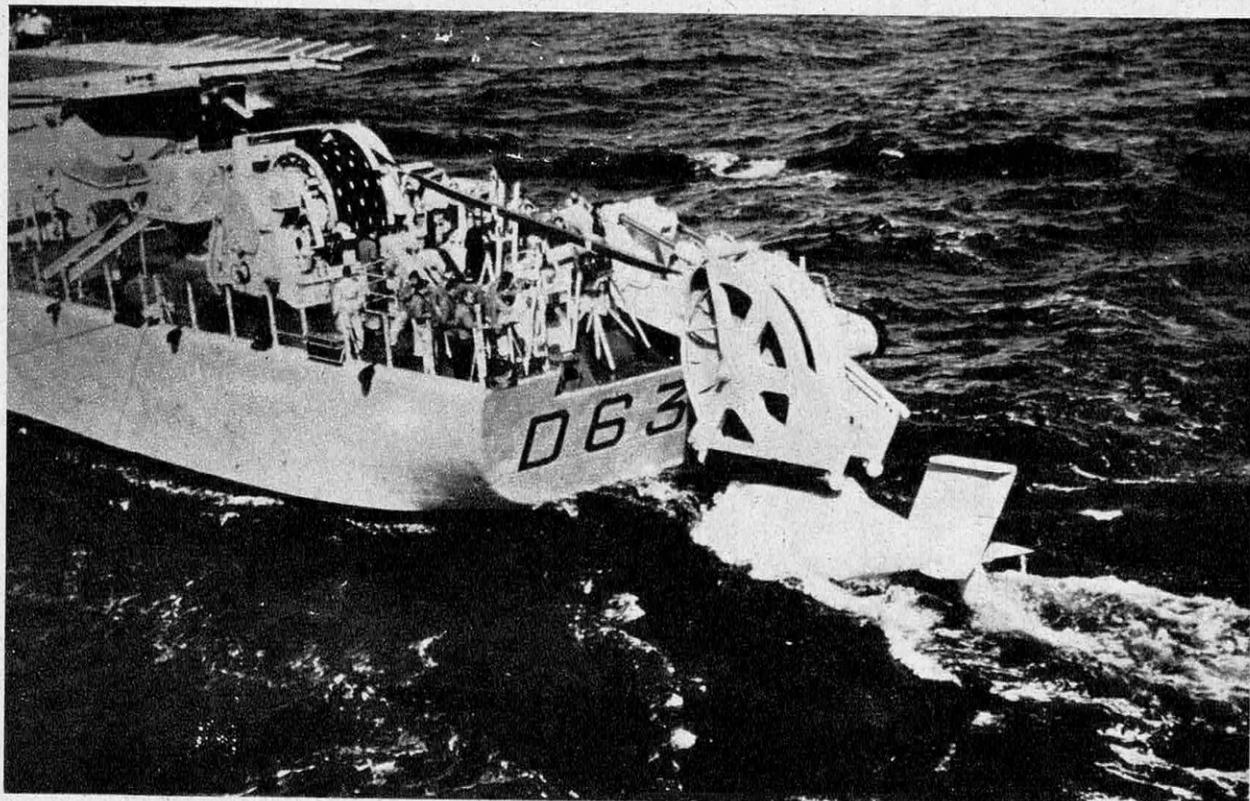
sion. Elle est probablement constituée de plancton. Selon la dimension de ses particules, certaines fréquences acoustiques seraient affectées plutôt que d'autres. Cette couche de diffusion se déplace en profondeur au gré des heures du cycle diurne.

De l'hélicoptère au sous-marin de chasse

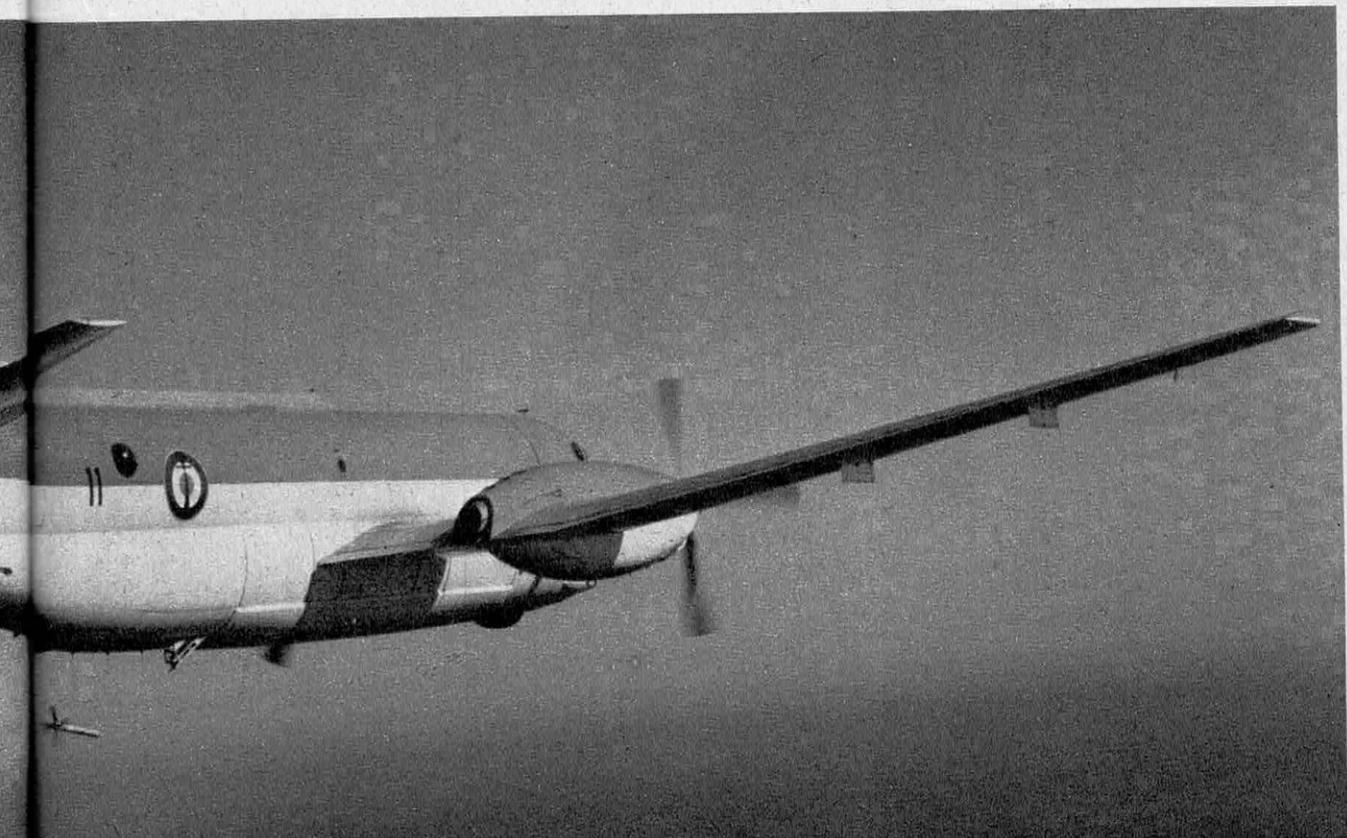
En matière de détection active, la méthode la plus ancienne pour la détection des sous-marins en plongée est d'opérer à partir d'un navire de surface. Elle fut utilisée avec succès au cours de la seconde guerre mondiale avec l'ASDIC, dont la portée était encore très faible. Depuis l'ASDIC, les sonars se sont beaucoup perfectionnés, mais les navires de surface restent assez mal adaptés à la détection sous-marine. En détection active comme en détection passive, la première nécessité est qu'un « bruit de fond » trop important ne masque pas la réception des ondes acoustiques. Or, dans les conditions où il opère, un navire est une source de bruits importants : bruits d'hélices, des pompes et de la machinerie, choc des vagues sur la coque, turbulences produites dans la « couche limite » entre les parois du navire en déplacement plus ou moins rapide et la masse océanique. Les fréquences corres-



L'« Atlantic », en service en France, en Allemagne, en



A la poupe d'un escorte d'escadre (La Gallissonnière), l'équipage procède à la mise à l'eau d'un sonar remorqué de type poisson.



gn bientôt en Italie et aux Pays-Bas, peut larguer des bouées sonores pour le repérage des sous-marins.

pondantes sont généralement assez basses et donc mal absorbées par le milieu marin. Elles gênent aussi les émissions d'un sonar actif. Pour maintenir une portée suffisante et un rapport signal/bruit convenable à la réception, la tendance est à l'emploi de sonars basse-fréquence de grande puissance, enfermés dans un bulbe d'étrave. C'est le cas en France, entre autres, des frégates lance-engins de type Suffren ou des corvettes de lutte anti-sous-marin C-67 actuellement en chantier.

Quoi qu'il en soit, les possibilités de détection utile sont toujours limitées, ne serait-ce qu'en raison de la faible vitesse d'un navire de surface. Et surtout, les discontinuités thermiques au sein des masses océaniques ménagent, nous l'avons vu, des zones d'ombre que les ondes acoustiques franchissent difficilement.

Un remède à ces limitations est apporté par le sonar à profondeur variable, sorte de « poisson » remorqué par le navire. Il peut opérer au-delà des discontinuités thermiques. Il est en même temps soustrait au bruit de fond qui affecte le navire de surface. La profondeur d'immersion la plus favorable est déterminée par mesure des températures au bathythermographe.

Le même principe est appliqué avec certains hélicoptères lourds de lutte anti-sous-marin.

Le type en est le Sikorsky SH-3A Sea King de l'U.S. Navy. En vol stationnaire, l'hélicoptère immerge un sonar, à la profondeur voulue, au bout d'un câble conducteur. Du point de vue strictement militaire, la faible autonomie des hélicoptères ne leur permet d'agir que dans des conditions bien déterminées, par exemple dans une zone où un sous-marin a été signalé.

L'avion, le patrouilleur maritime représenté par le Lockheed P-3C Orion, le Bréguet Atlantic ou le Nimrod britannique (dérivé du Comet IV), est également partie prenante à la guerre des sons. Il largue à la surface de la mer des bouées acoustiques équipées d'un émetteur radio. Plusieurs bouées assez largement espacées formeront un réseau d'écoute capable de donner une information de direction. Leur efficacité dépendra du bruit produit par le sous-marin, lequel peut être très faible, surtout à grande profondeur. Une solution de rechange sera l'explosion d'une charge de fond, larguée par l'avion patrouilleur, qui donnera un écho sur la coque du sous-marin, trop peu bruyant par lui-même.

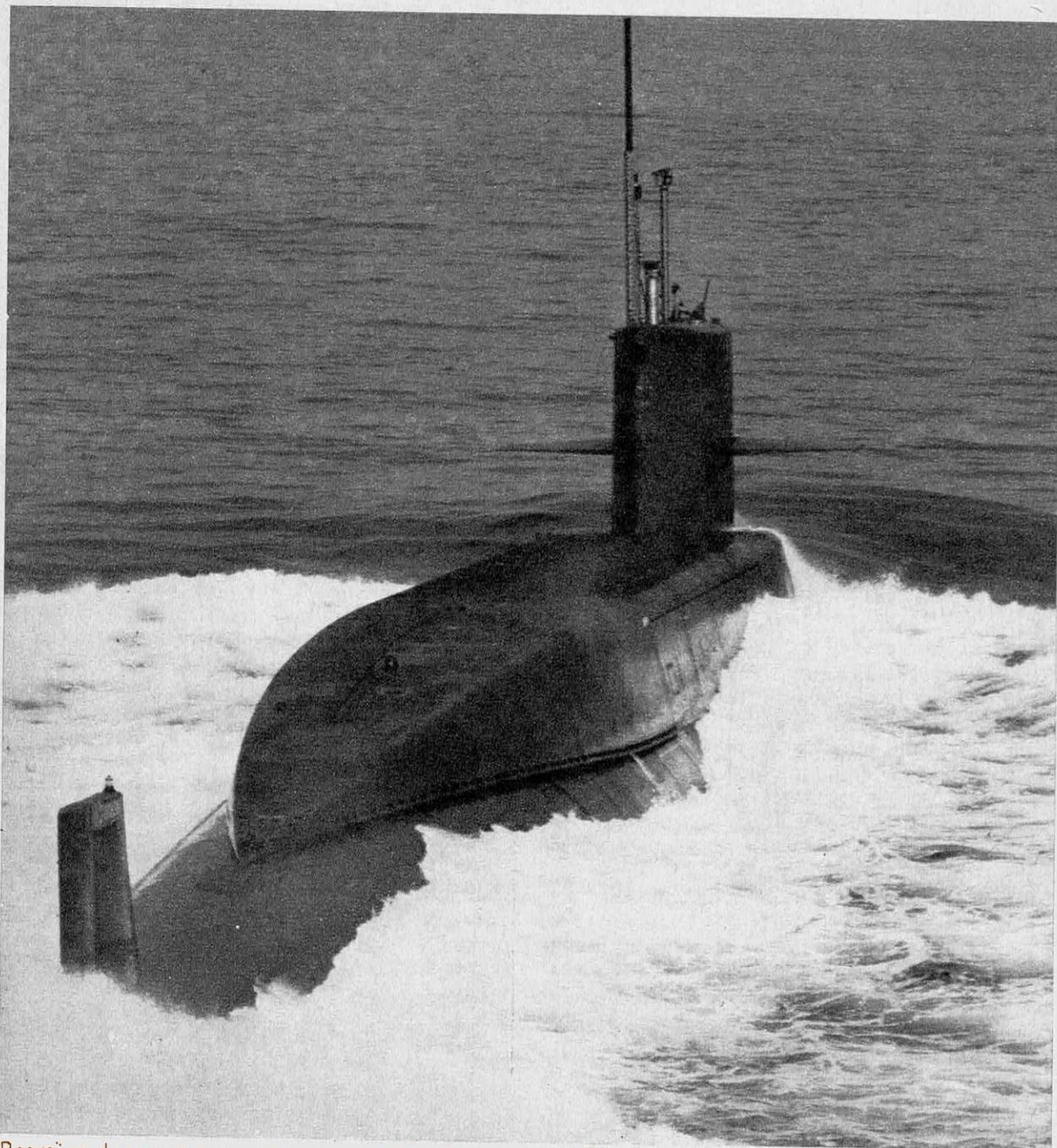
Le sous-marin de chasse est peut-être l'arme la plus efficace contre un autre sous-marin. A l'heure où les sous-marins lance-missiles, surtout à propulsion nucléaire, constituent une menace permanente pour les villes, les instal-

lations militaires ou les zones industrielles même situées à 2 000 kilomètres des côtes, le problème prend un caractère d'extrême gravité. Aux sous-marins nucléaires, peu bruyants, plus rapides en plongée qu'aucun navire de surface de grande autonomie, on est conduit à opposer des sous-marins de chasse, également à propulsion nucléaire, pouvant descendre à de très grandes profondeurs, là où les conditions de la détection acoustique sont les meilleures. Ainsi, aux 41 sous-marins nucléaires lance-missiles de l'U.S. Navy, s'ajoutent main-

tenant plus de 30 sous-marins nucléaires de chasse. En France, on prévoit la construction d'un ou deux engins de ce type.

Machines stoppées ou à faible vitesse, le sous-marin de chasse à propulsion nucléaire utilise le sonar passif comme moyen de détection principal. Il est alors lui-même difficilement détectable.

Il est toutefois peu concevable que le sous-marin de chasse agisse de cette façon au hasard, en plein océan. Beaucoup plus rentable sera l'embuscade aux points de passage



obligé, à la sortie des bases de sous-marins adverses en particulier, ou au moins, la collaboration avec des avions patrouilleurs ou des navires de surface.

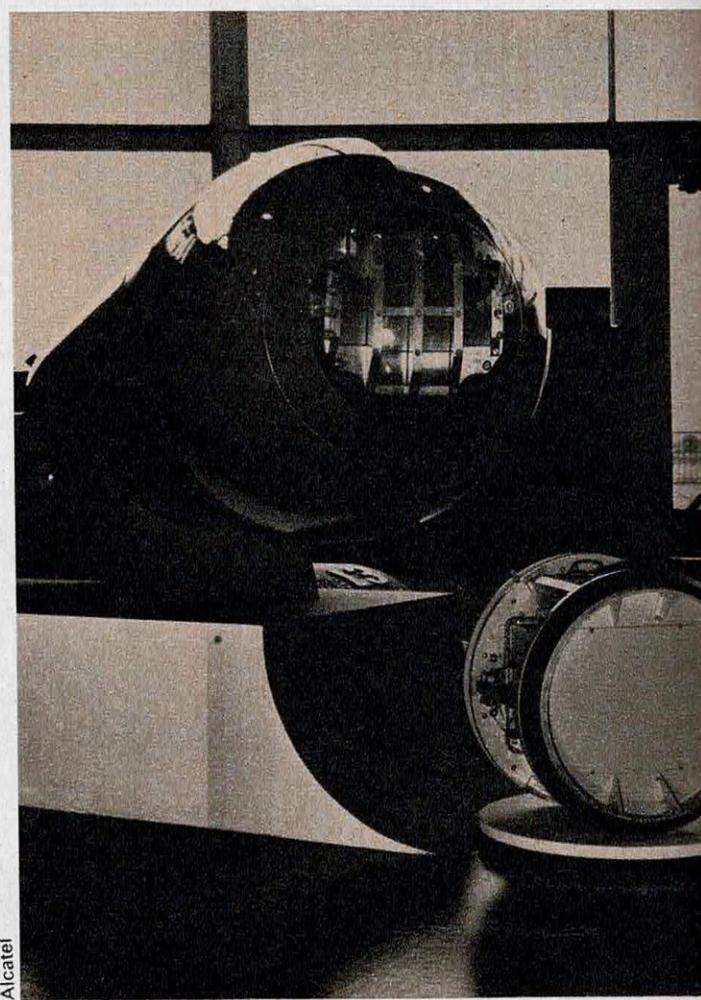
Améliorer la détection

La coopération entre avions, navires ou sous-marins est, de manière générale, indispensable. La corvette « ASM » peut effectuer une surveillance acoustique continue sur de longues distances, mais avec des possibilités de détection assez limitées. L'hélicoptère est beaucoup mieux équipé pour la détection et pour la poursuite d'un sous-marin marchant à 35 noeuds en plongée, mais seulement dans un espace restreint. Les bouées sonores larguées d'un avion, dans un espace également pré-déterminé, opèrent dans des conditions difficiles et en détection passive contre un ennemi souvent peu bruyant. Le sous-marin de chasse à propulsion nucléaire ne peut guère agir que sur renseignement ou dans des zones privilégiées. Tout ceci implique une étroite coordination des moyens.

Se trouve alors posé le problème des communications. En milieu sous-marin, elles ne peuvent utiliser que des ondes acoustiques, des impulsions ultrasonores codées. Le problème n'est pas trop difficile à résoudre entre deux sous-marins. Il l'est déjà plus entre sous-marin et navire de surface. Il devient très difficile entre sous-marin et avion ou hélicoptère. Des bouées acoustiques avec réémetteur hertzien, assez semblables à celles utilisées pour la détection passive, ont été proposées. Des systèmes de ce genre sont peut-être opérationnels à l'heure actuelle. On ne saurait l'affirmer ni le nier. L'U.S. Navy ou la Marine soviétique gardent bien leurs secrets.

Au-delà des modes de détection acoustique (par navires, avions, hélicoptères ou sous-marins) qu'on peut, aussi évolués soient-ils, qualifier de classiques, des programmes beaucoup plus ambitieux ont été proposés.

Il s'agit, d'une part, de la surveillance des espaces sous-marins à très longue distance, avec, par exemple, le programme Artemis, étudié il y a quelques années aux Etats-Unis. Artemis devait être un sonar actif de trente tonnes, immergé par un navire de surface à travers un puits et travaillant en coopération avec un réseau d'écoute installé au fond. L'ensemble pouvait détecter tout ce qui remuait entre la surface et le fond dans un rayon de 500 milles nautiques. Il s'agit aussi des réseaux d'écoute installés sur le fond ou à profondeur variable pour la surveillance des routes océaniques ou la protection des côtes. En pleine mer, de tels réseaux pourraient renseigner sur les déplacements des sous-marins ennemis ou les con-



Propulsée au voisinage du but par deux hélices contrarotatives actionnées par moteur électrique, la torpille L3 termine sa trajectoire grâce à son autodirecteur émettant à 35 kHz.

traindre à limiter leurs évolutions. Sur le plateau continental, ils pourraient interdire l'approche des sous-marins de chasse ennemis. Les sous-marins lance-missiles n'ont, eux, pas besoin de se risquer si loin.

Quoi qu'il en soit, les possibilités de la détection acoustique en milieu sous-marin sont encore limitées par les connaissances insuffisantes dont on dispose sur ce milieu. Structure thermique des océans, phénomènes de canalisation des ondes acoustiques à certains niveaux, rôle de la matière vivante dans leur déflexion, tous ces points, et beaucoup d'autres, demandent des études approfondies, du domaine de la recherche fondamentale.

Dans le monde, les autorités militaires financent actuellement de nombreux travaux de ce genre. Nul doute que la science et la technique civile n'en bénéficient plus ou moins. C'est bien le moins qu'elles puissent espérer.

Serge CAUDRON

DES FRÉQUENCES REDOUTABLES

LES

INFRASONS

Le pouvoir d'intégration de périodes par l'oreille, qui se traduit par une sensation sonore, est limité par la fréquence de 16 Hz. Les infrasons sont précisément des ondes acoustiques de la gamme inférieure à 16 Hz, considérée comme inaudible.

Néanmoins, si les infrasons ne provoquent pas de sensation de tonalité, ils se manifestent par d'autres sensations, telles qu'une pression dans l'oreille ou des troubles de l'équilibre. Nous reviendrons à leur action physiologique, en général nocive, après avoir fait connaissance avec leurs propriétés physiques.

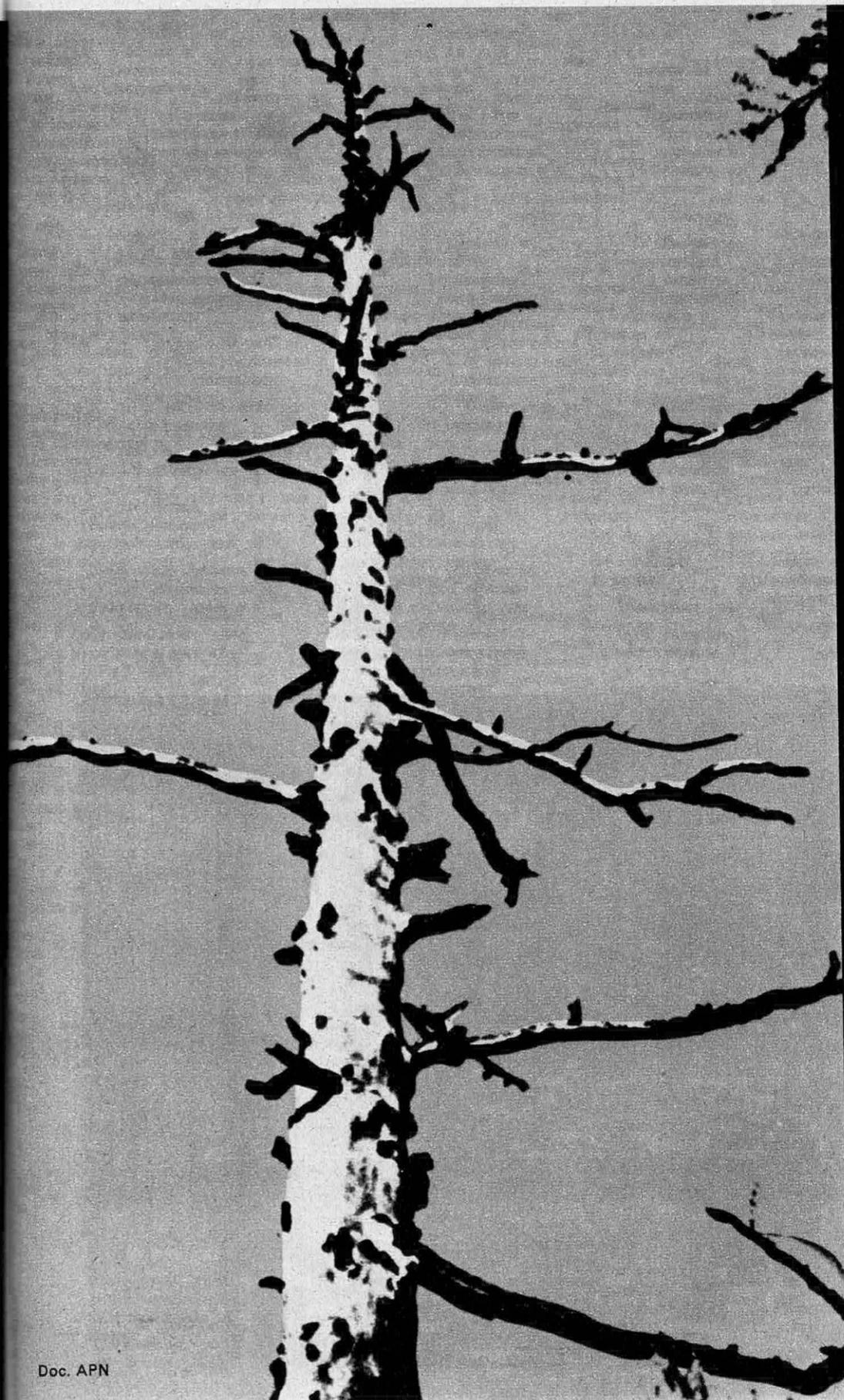
Les problèmes de l'émission

Si l'on s'applique à émettre des infrasons par un haut-parleur approprié, fixé sur la surface d'une caisse acoustiquement étanche, les suppressions et les dilatations que provoquera le mouvement de la membrane sont si lentes qu'elles auront largement le temps de s'établir non seulement devant la membrane, mais aussi de tous les côtés de la caisse. Ainsi, les infrasons, quoique émis d'un seul côté de la caisse, se propageront dans toutes les directions sous formes d'ondes sphériques.

Si l'on élève la fréquence, la membrane se déplace de plus en plus vite, l'égalisation de la

pression autour de l'émetteur ne peut plus suivre le déplacement périodique de la membrane et les ondes acoustiques se déplacent davantage dans la direction où est fixé le haut-parleur. Pour les fréquences très aiguës, ultrasonoires par exemple, l'émission devient très directive.

Avec les infrasons, les surpressions ou les dilatations dans l'entourage immédiat de l'émetteur se dispersant dans toutes les directions ; on peut dire que le milieu de propagation, en cédant aux vibrations de l'émetteur, n'oppose qu'une très faible résistance. Il s'ensuit que l'énergie vibratoire de l'émetteur se transmet très mal au milieu, ou autrement dit, que les émetteurs infrasonores ont un rendement d'émission très inférieur à celui des émetteurs de fréquences plus élevées. En outre, au voisinage immédiat de l'émetteur d'ondes sphériques, il existe un déphasage entre la pression et la vitesse de déplacement des particules du milieu. Ce déphasage disparaît à partir d'un rayon de l'ordre de la longueur d'onde. Or, l'énergie de rayonnement acoustique apparaît précisément avec la disparition de ce déphasage. Pour une fréquence infrasonore de 10 Hz, par exemple, la longueur d'onde étant de 34 m, l'énergie infrasonore apparaît seulement à une distance de l'ordre de 34 m,



Une forêt d'arbres morts, la plupart abattus : tout ce qui restait dans la zone de Tounousk, en Sibérie, touchée, en 1908, par la chute d'une météorite. Moins qu'à cette dernière, c'est à l'onde de choc infrasonore qui l'accompagnait que l'on doit attribuer le gros des destructions.

où les ondes sphériques se sont déjà fortement dispersées.

Divers types d'émetteurs

La concentration des I.S. (infrasons) dans une direction, par exemple par des réflecteurs ou des pavillons ou, d'après Stenzel, par un groupe d'émetteurs espacés d'une demi-onde, est assez difficile, étant donné la relation entre la longueur d'onde et les dimensions du système de concentration. Ainsi, pour un infrason de 10 Hz, le pavillon devra être d'une longueur supérieure à 10 m et le groupe d'émetteurs de Stenzel de plus de 100 m de diamètre. Pour ces raisons, si l'on veut obtenir des variations de pression d'une grande puissance, on a en général recours à un réservoir clos où l'on fait varier la pression. Notons, toutefois, que, rigoureusement parlant, il ne s'agit pas dans ce cas d'infrasons, car la propagation d'onde n'existe pas, mais les effets physiologiques ou physiques qu'exercent de telles variations de pression, à condition que les objets soumis aux expériences soient de dimensions très inférieures aux longueurs d'ondes I.S., sont sensiblement analogues.

L'utilisation, pour l'émission des infrasons, de grands sifflets, de tuyaux de quelques dizaines de mètres fonctionnant d'après le principe des

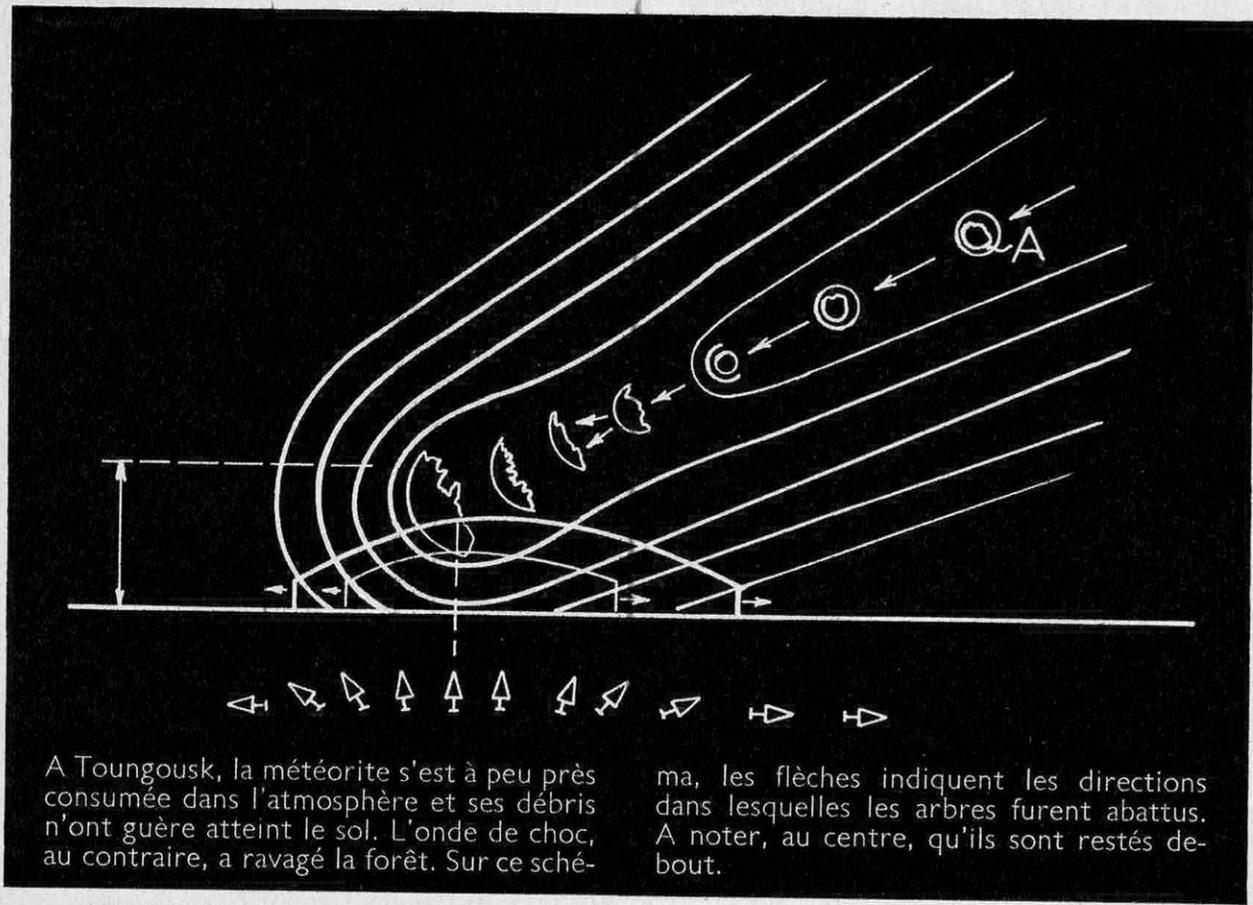
tuyaux d'orgue, et d'autres émetteurs construits par différents chercheurs, est peu rentable et ne permet, à des distances où le déphasage entre pression et vitesse des particules a disparu, que d'atteindre des niveaux de 120 à 140 dB au maximum.

On obtient les meilleurs résultats en utilisant de très grands haut-parleurs électrodynamiques d'un diamètre de 1 à 2 m et d'une puissance de 10 kW, ou des moteurs d'avions.

Caractéristiques de propagation

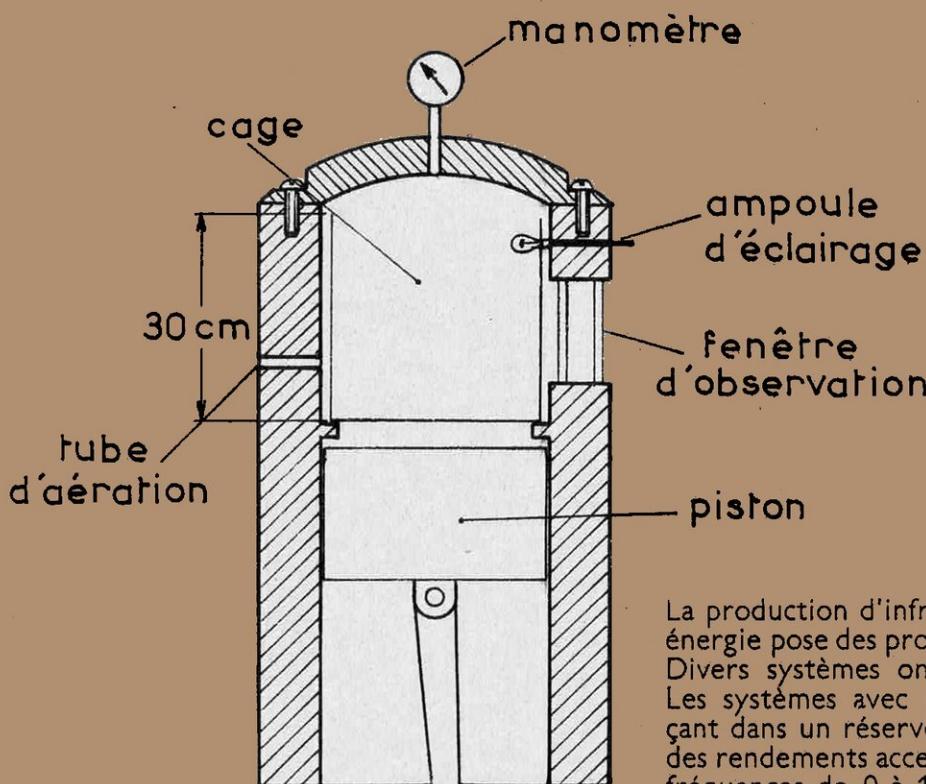
Si les infrasons sont difficiles à émettre, ils possèdent le grand avantage d'être très peu absorbés par le milieu de propagation. Par exemple, dans l'air, l'absorption d'un I.S. de 10 Hz est de l'ordre de 10⁻⁵ dB par kilomètre. A titre de comparaison, l'absorption d'un son aigu de 10 000 Hz est de 10 dB/km. Les I.S. encore plus bas, provoqués, par exemple, par des explosions nucléaires ($F = 0,002$ Hz) ne sont affaiblis que de 4 à 5 % après avoir fait le tour du globe terrestre. Cette propriété est souvent utilisée pour la détection de fortes explosions nucléaires à des dizaines de milliers de kilomètres.

La détection des I.S. d'une fréquence supérieure à 0,1 Hz se fait aujourd'hui le plus souvent par des microphones électrostatiques uti-



A Toungousk, la météorite s'est à peu près consumée dans l'atmosphère et ses débris n'ont guère atteint le sol. L'onde de choc, au contraire, a ravagé la forêt. Sur ce sché-

ma, les flèches indiquent les directions dans lesquelles les arbres furent abattus. À noter, au centre, qu'ils sont restés debout.



La production d'infrasons de grande énergie pose des problèmes difficiles. Divers systèmes ont été proposés. Les systèmes avec piston se déplaçant dans un réservoir clos assurent des rendements acceptables pour des fréquences de 0 à 15 Hz.

lisant la modulation en fréquence, par des microphones piézoélectriques et électrochimiques appelés solions.

Les I.S. produits par les explosions nucléaires, et dont la période atteint plusieurs minutes, sont généralement détectés par des microbarographes.

Les I.S. produits par différents types d'explosions revêtent une grande importance. Le problème est le suivant. D'après la théorie de Fourier, chaque phénomène transitoire, y compris les explosions, possède des composantes spectrales qui s'étendent de la fréquence zéro vers les fréquences aiguës. Sur la figure de la page 75 est donnée, par exemple, la courbe, ou comme on l'appelle, la « signature », d'un bang supersonique et son spectre.

Ainsi, parallèlement aux composantes sonores, chaque explosion provoque des composantes infrasonores qui, en général, comportent la majeure partie de l'énergie spectrale.

En se rappelant que les fréquences graves et, en particulier, les I.S., sont beaucoup moins absorbées par le milieu de propagation que les fréquences aiguës, il devient évident qu'à longue distance il ne reste que les basses fréquences, et à très longue distance, seulement les infrasons.

C'est pour cette raison que les coups de canon, les bangs supersoniques, le tonnerre, etc. provoquent à grande distance la sensation de sons graves. Un autre facteur qui facilite la propagation des infrasons est le phénomène de guide naturel qu'on observe dans l'atmos-

phère ou dans l'eau stratifiée des océans. La physique classique nous enseigne qu'un rayon lumineux ou sonore est réfléchi par la surface de séparation de deux milieux ayant des propriétés physiques différentes, à condition que l'angle d'incidence soit suffisamment petit. Dans le cas de l'acoustique, ces propriétés physiques se traduisent par des vitesses différentes de propagation des ondes sonores dans les deux milieux.

Or, les vitesses de propagation des sons sont différentes aussi bien dans diverses couches de l'atmosphère que dans l'eau des océans. Notre schéma de la page 76 donne la vitesse de propagation du son dans l'eau en fonction de la profondeur.

Les variations des propriétés physiques de couches différentes étant progressives, les réflexions des ondes émises sous des angles différents suivent des courbes arrondies. Par suite de ces réflexions, les ondes ont tendance à se concentrer autour d'un axe où la vitesse de propagation est la plus faible. Ce phénomène de concentration des ondes, qui est semblable dans l'atmosphère, représente un guide naturel des infrasons.

C'est ce phénomène, allié à la faible absorption des ondes infrasonores dans l'atmosphère, qui permet la détection des infrasons produits par les fortes explosions nucléaires en n'importe quel point du globe terrestre.

Des émissions énigmatiques

Au cours des vingt-cinq dernières années, de nombreux laboratoires ont pu détecter des infrasons atmosphériques d'origine parfois inconnue. Les sources commencent toutefois à être de mieux en mieux précisées.

Ainsi, les océans, en particulier dans le voisinage des centres de dépression cyclonale, émettent des infrasons vers la haute atmosphère. Après réflexion sur des couches situées à 45 ou 50 km, ces ondes réapparaissent à la surface terrestre, les premières dans un rayon de quelque 300 km. Les périodes de ces ondes sont de l'ordre de quelques secondes (4 s à 11 s) et leur pression d'environ 6 dynes/cm² (0,6 pascal). On avait d'abord admis qu'il s'agissait de sons analogues à ceux que provoquent les poteaux télégraphiques soumis au vent, ou le fait de souffler sur un peigne. Dans la mer, le rôle des poteaux serait joué par les vagues. Actuellement, ces hypothèses sont contestées et on commence à admettre que la production des infrasons n'est pas provoquée par des ondes uniques, mais par de grandes surfaces où les ondes se propagent en différentes directions et où toute la surface de l'océan, en quelque sorte, change périodiquement son niveau.

Cook et Baker, du National Bureau of Standards, et d'autres chercheurs, ont observé des infrasons rayonnés vers l'atmosphère par les tremblements de terre. Ils ont constaté que les infrasons, en faisant vibrer l'ionosphère (à une altitude de 160 à 240 km), provoquent un effet Doppler dans les ondes électromagnétiques courtes émises verticalement dans les mêmes endroits. Pour une onde de 4 MHz, le déplacement Doppler était de 3 Hz environ. Le savant allemand Fack a détecté, en 1962-1963, des infrasons atmosphériques d'origine inconnue. En effet, à la date de la détection de ces ondes, aucune explosion, aucun cyclone ni aucune autre source possible d'une émission infrasonore n'étaient signalés. La source devait être très puissante, car Fack a pu détecter ces I.S. trois fois de suite, après contournement, à chaque fois, du globe terrestre. Ils se propageaient à une vitesse de 320 m/s et avaient une période de l'ordre de 10 minutes, d'où on calcula la longueur d'onde, voisine de 200 km.

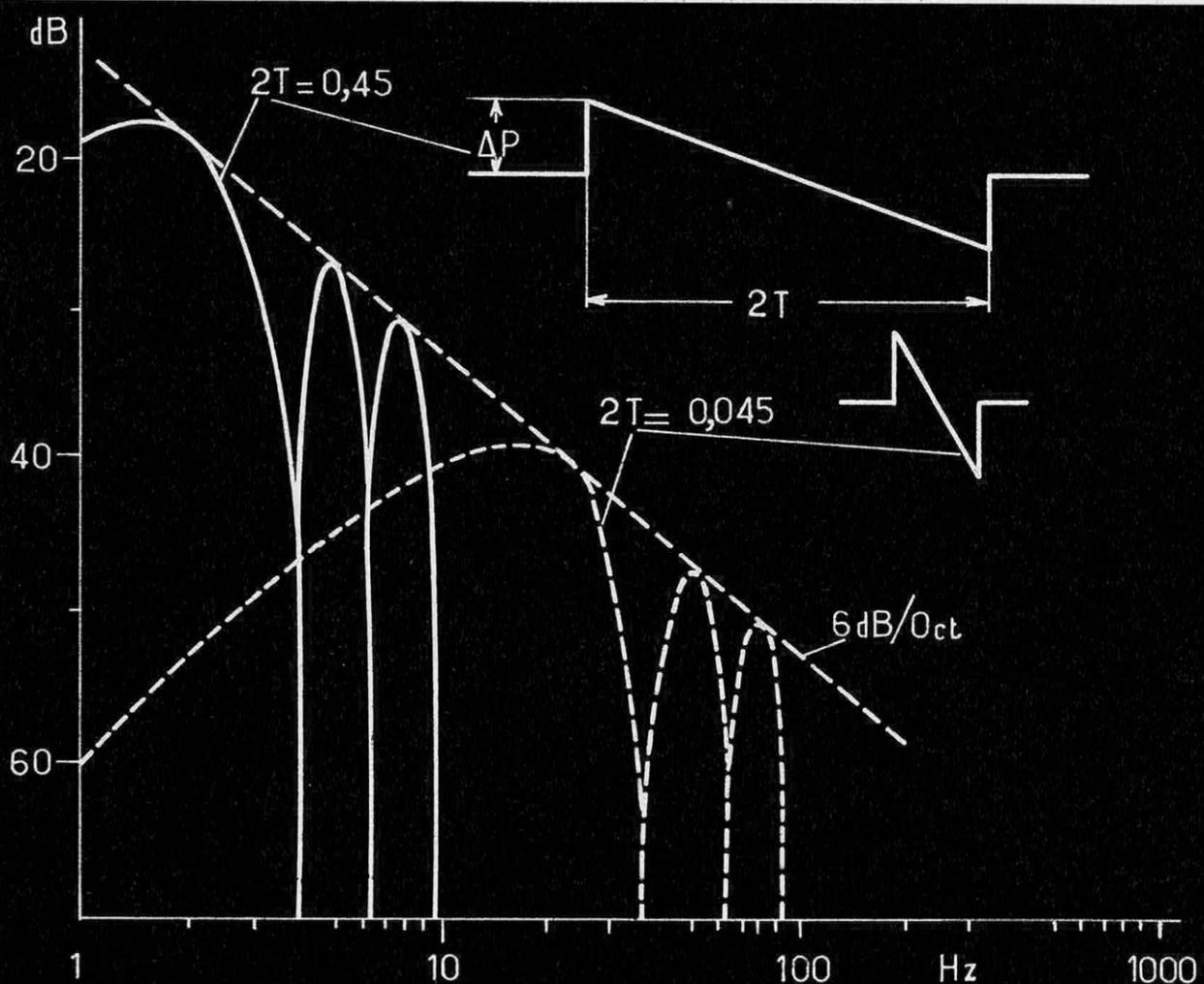
Les toutes dernières recherches semblent indiquer que les ondes électromagnétiques provenant de l'espace cosmique provoquent, en déplaçant l'ionosphère, des I.S. qui pourraient expliquer les ondes détectées par Fack. De même, l'aurore polaire semble être à l'origine d'I.S.

Des effets spectaculaires

Les bangs supersoniques qui représentent de puissantes sources, non seulement sonores, mais aussi infrasonores, suscitent actuellement un intérêt tout particulier chez un très grand nombre de chercheurs.

Ces violentes explosions résultent de la concentration d'énergie sonore qui a lieu si un émetteur se déplace à une vitesse supersonique. Dans un tel cas, une onde émise par l'émetteur à un moment donné est en quelque sorte « rattrapée » dans son parcours par une onde émise un instant plus tard. Cette concentration d'énergie sonore, qui suit tout le parcours de l'émetteur, couvre la surface terrestre d'un tapis sonore et peut atteindre, en fonction de la distance et de la dimension de l'objet volant, des niveaux sonores capables de détruire des bâtiments en béton armé.

Rappelons à ce propos que les dernières recherches relatives à la fameuse météorite tombée en 1908 en Sibérie ont montré que la destruction des forêts sur une surface de près de 2 200 km² avait été provoquée, non pas par le corps de la météorite elle-même, mais par un bang supersonique qui accompagna sa chute. L'angle de chute de la météorite, sa vitesse, sa masse, et d'autres données ont été définis grâce à un modèle où la météorite était repré-



Le spectre d'énergie des « bangs » provoqués par les avions à vitesse supersonique contient de larges composantes infrasonores. On a

représenté ici, en trait plein et en tireté, les spectres d'énergie de deux « bangs » de durées différentes (0,45 s et 0,0045 s).

sentée par une charge dont l'explosion se propageait à la vitesse cosmique (7 à 8 km/s) le long d'un fil d'acier, une forêt miniature étant constituée à partir de petits fils de laiton munis de couronnes en plastique.

A cette occasion, on a pu constater qu'un bang correspondant à une surpression de :

— $\Delta P = 0,3$ atm provoquait la chute de 90 % des arbres.

— $\Delta P = 0,4$ atm détruisait les maisons en briques,

— $\Delta P = 1$ atm détruisait les bâtiments en béton armé.

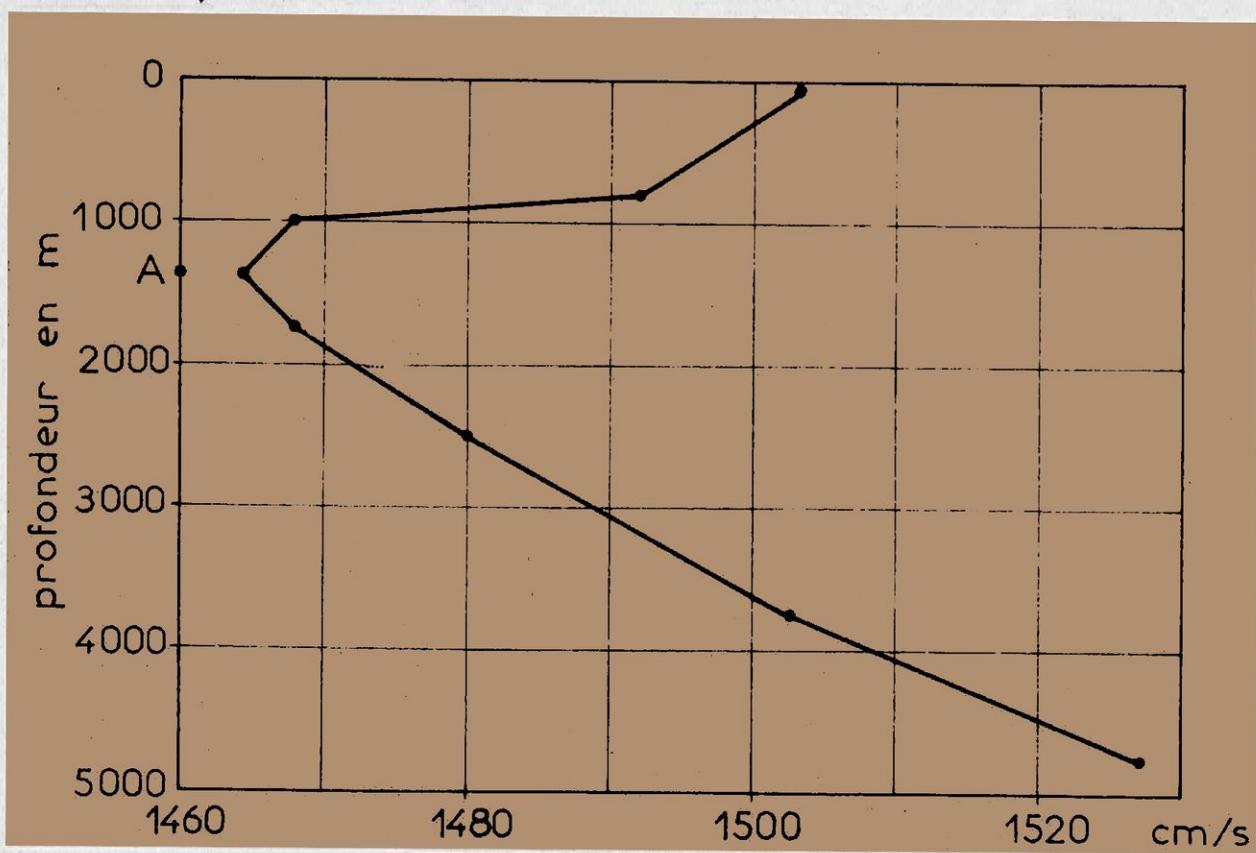
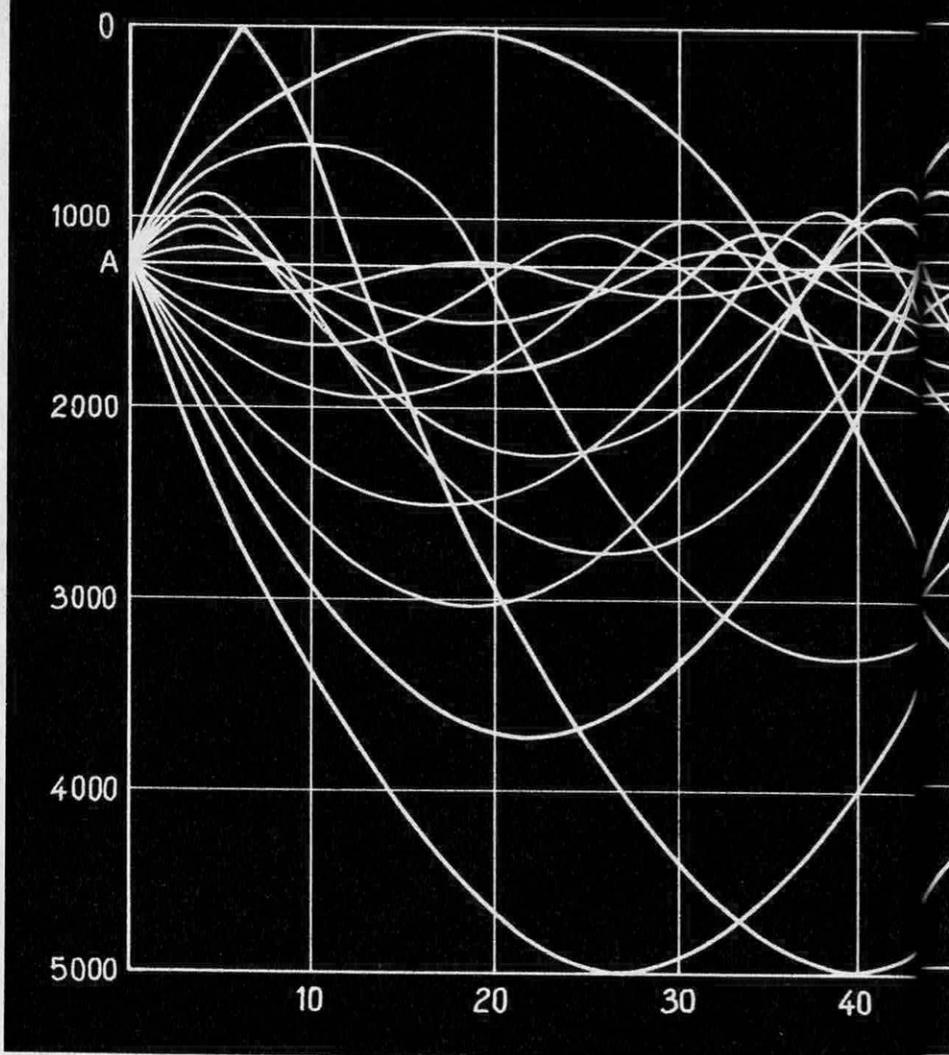
Ainsi, le niveau du bang supersonique que produiront les avions commerciaux en construction représente un phénomène dangereux qui devrait être très rigoureusement contrôlé. Actuellement, se dégage l'opinion selon laquelle un bang d'un niveau de 0,25 mb est

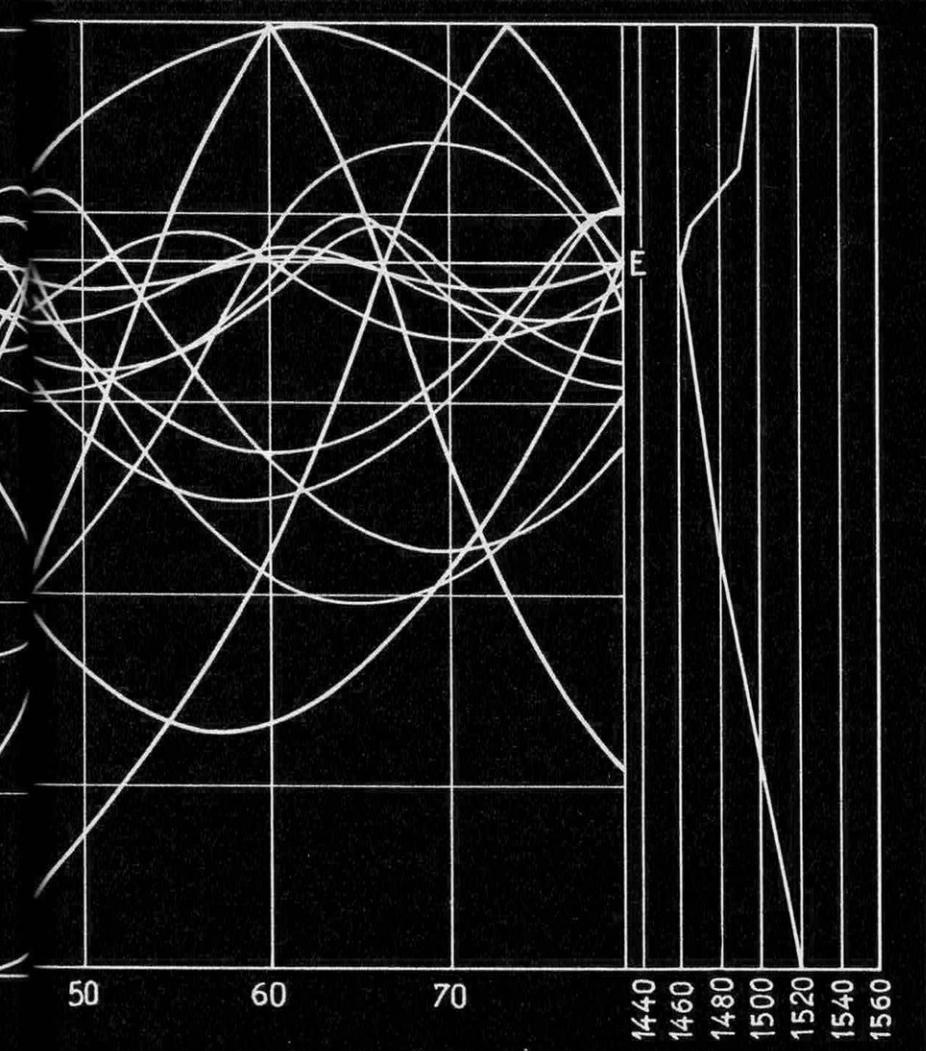
parfaitement supportable, qu'un bang de 0,5 à 1 mb est encore supportable, mais qu'au-dessus de 2 mb se produisent des gênes physiologiques.

Les infrasons permanents que l'on rencontre dans la vie courante, tels que ceux provoqués par les ventilateurs, les petits compresseurs de réfrigérateur, les automobiles, etc. ne dépassent pas, en général, 95 dB. Ils semblent être moins nocifs que les sons audibles de même niveau. Par contre, dans l'industrie, où les niveaux dépassent 120-130 dB, aussi bien les sons audibles que les infrasons deviennent extrêmement nuisibles.

Quoique les infrasons de niveau moyen et fort ne dépassant pas les 120 dB semblent moins nocifs que les sons audibles de même niveau, la protection contre les infrasons étant quasi impossible et en tout cas beaucoup plus difficile que celle contre les sons aigus, leur pré-

Au sein des masses océaniques, la vitesse de propagation des ondes sonores varie avec la profondeur, par le jeu des gradients de température, pression, salinité. A une certaine profondeur A existe une zone où la vitesse de propagation est minimale.





Le trajet des ondes sonores dans l'eau des océans est très variable selon l'angle d'émission de la source, avec une tendance à la concentration au niveau où la vitesse de propagation est minimale. A ce niveau pourra ainsi se produire une canalisation des ondes, qui augmentera leur portée.

sence représente un grave problème aussi bien technique que physiologique.

La lutte contre les infrasons doit, à notre avis, se diriger surtout vers l'amortissement des systèmes émettant les infrasons et non vers la protection des lieux où ils apparaissent.

Infrasons et résonance

Un cas particulier d'action nocive des I.S. est représenté par le phénomène de résonance. Dès le siècle dernier, on avait observé le phénomène de la flamme chantante. Si, dans un tube ouvert des deux bouts, on introduit une flamme, il apparaît un son correspondant à la fréquence de résonance de ce tube. Selon la plupart des techniciens, quoique leur opinion soit controversée par d'autres, des phénomènes analogues se produisent dans les fusées et les cowpers. Rappelons que le cowper est un appareil où l'on réchauffe l'air qui, ensuite, alimente la combustion dans les hauts fourneaux. Les dimensions des cowpers étant de 20 à 50 m de hauteur et de 5 à 10 m de diamètre, la fréquence de résonance est de l'ordre de quelques hertz. Elle entre dans la gamme infrasonore. Les cowpers habituels fonctionnent en deux phases. On réchauffe d'abord par la

combustion de gaz (pendant 2 à 3 heures), le ruchage à l'intérieur du cowper. Ensuite, après l'arrêt de la combustion, on fait passer l'air froid qui se réchauffe et est dirigé vers le haut fourneau.

C'est au cours de la première phase qu'apparaissent des vibrations infrasonores qui se traduisent par une combustion pulsatoire et sont dangereuses pour l'ensemble de l'installation. Un phénomène analogue, quoique plus complexe, apparaît au cours de la combustion du combustible liquide dans les fusées. Les vibrations atteignent alors parfois une telle ampleur que les fusées explosent. C'est une des difficultés de la construction de fusées de très grande puissance.

De même, les chaudières, en particulier les chaudières à mazout, sont parfois la cause de phénomènes de résonance dans les immeubles. Pour terminer cet aperçu du domaine infrasonore, signalons que certains chercheurs, comme Miasnikow et collaborateurs, ont constaté la présence de composantes infrasonores au cours de la prononciation de consonnes. Les tentatives visant à utiliser ces composantes pour la reconnaissance automatique de la voix parlée ne semblent pas donner de résultats positifs.

Léonid PIMONOW

LE BRUIT

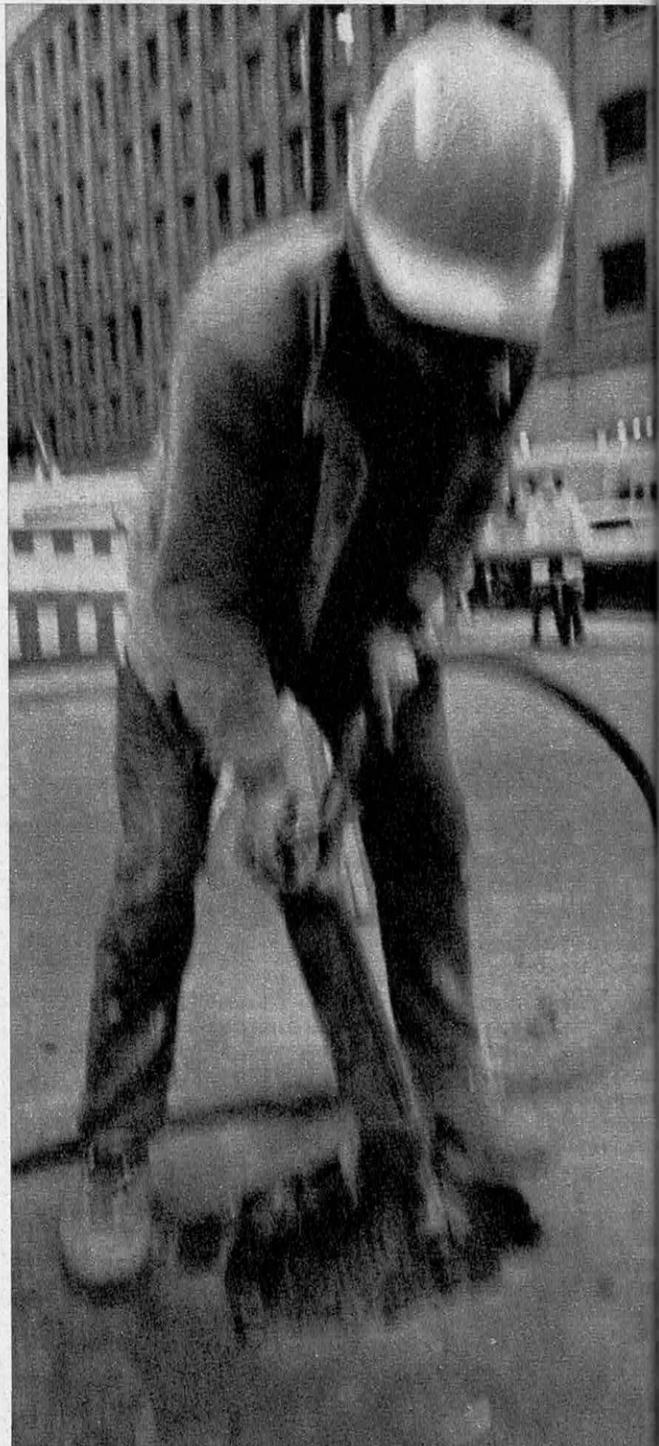
FLÉAU DE L'ENVIRONNEMENT

Le bruit nous submerge aujourd'hui partout : dans les usines, les ateliers, les bureaux, les chantiers, comme dans les rues et les moyens de transport. Il envahit la campagne, même les coins jusqu'ici les plus tranquilles. Il s'introduit dans les maisons, dans les appartements, et ne nous laisse même plus reposer en paix la nuit. Au même titre que la pollution par les déchets, il existe une pollution de l'environnement par les bruits.

Qu'est-ce que le bruit ?

Le terme de « bruit » n'a pas une acceptation univoque. Il est parfois employé pour désigner tout son dont les composantes ne sont pas définies. Nous le prendrons ici avec le contenu subjectif que lui donne souvent le langage courant, et qui s'applique à tout son désagréable ou gênant. Les autres sons nous apparaissent comme indifférents, acceptables, agréables ou même harmonieux, tels le chant des oiseaux ou le murmure d'une source.

Reconnaissons-le : cette distinction entre sons et bruits est souvent bien subtile. Le même phénomène acoustique sera appelé tantôt d'une façon, tantôt de l'autre, alors que rien n'aura changé, pas même l'environnement sonore. Des sons qui nous gênent seront qualifiés de bruits, même s'ils sont harmonieux. De façon générale, le moment où l'on entend un son, l'ambiance dans laquelle on l'entend, et bien d'autres facteurs, influent beaucoup sur notre appréciation. Le même son pourra quelquefois, selon les circonstances, être ressenti comme agréable, indifférent ou désagréable. Ainsi, les sons pourtant harmonieux du poste de radio des voisins, transmis par les murs ou les fenêtres jusque dans notre appartement, nous apparaissent-ils comme intempestifs, et donc comme des bruits indésirables. Des instruments de musique jouant indépendamment ne donnent naissance qu'à une affreuse cacophonie, donc à un bruit ; les voix de plusieurs groupes de personnes parlant séparément, mais au même moment, nous donnent également l'impression d'un bruit. Isolé, le son du tambour est un bruit ; dans un orchestre, il est agréable à entendre. Un bruit indifférent le



J. P. Bonnin

ENVIRONNEMENT

jour pourra devenir totalement insupportable la nuit s'il nous empêche de dormir. On pourrait citer bien d'autres exemples.

Notre jugement affectif peut dépendre de notre état de santé et de notre situation psychologique ; un son habituellement indifférent nous paraîtra insupportable lorsque nous sommes malades ou agacés.

On peut se sensibiliser progressivement à un bruit, au point que celui-ci devienne intolérable. Tel est le cas de la goutte d'eau qui tombe à intervalles réguliers la nuit dans un évier et dont le bruit est pourtant bien faible. Inversement, à force de les entendre, on peut se familiariser, s'accoutumer à des bruits pourtant désagréables au départ. Il en va ainsi par exemple du vacarme pourtant traumatisant dans les usines ou les chantiers : les travailleurs finissent malheureusement par ne plus guère y prêter attention. Bien plus, si nous réagissons violemment au bruit que font les autres, nous ne nous rendons souvent pas compte du bruit que nous faisons nous-même. Des motocyclistes n'hésitent pas, la nuit, à troubler le sommeil de milliers de personnes, alors qu'ils seraient peut-être fort mécontents s'ils étaient eux-mêmes réveillés de cette façon.

Il existe, d'autre part, des différences individuelles importantes. Des personnes particulièrement sensibles, particulièrement irritable, ne pourront supporter des bruits qui ne gênent qu'à peine d'autres personnes.

Notre passé, enfin, nos souvenirs accumulés, ce que nous avons entendu dire par d'autres, les idées léguées par les générations passées, tout cela peut influer sur notre jugement.

Tous les bruits ne sont pas forcément inutiles ou perturbateurs. Le bruit d'un avertisseur d'automobile ou celui de l'échappement brusque d'un gaz sont utiles quand ils nous avertissent d'un danger, même si le deuxième n'est pas recherché alors que le premier est voulu. La distinction entre bruits utiles et inutiles est importante, car il faudrait pouvoir réduire les sons inutiles sans toucher autant les bruits utiles. Le niveau des bruits utiles doit toujours rester nettement supérieur à celui des autres bruits, à moins qu'on fasse appel à des signaux avertisseurs de nature différente.

Bien sûr, nous ne pourrions pas vivre sans bruits, pas plus que nous ne pourrions vivre sans lumières ou sans odeurs. Un minimum d'ambiance sonore nous est nécessaire. Mais la marge est considérable entre le niveau indispensable et les niveaux actuels en milieu urbain, qui sont absolument insupportables.

Mesurer les bruits

Le niveau de pression acoustique est primordial dans notre sensation de bruit. Tous les sons, même les plus agréables, apparaissent comme des bruits lorsqu'ils sont trop intenses ; d'autre part, les effets nocifs des bruits s'accroissent avec leur niveau. On est donc amené à essayer de mesurer ce niveau.

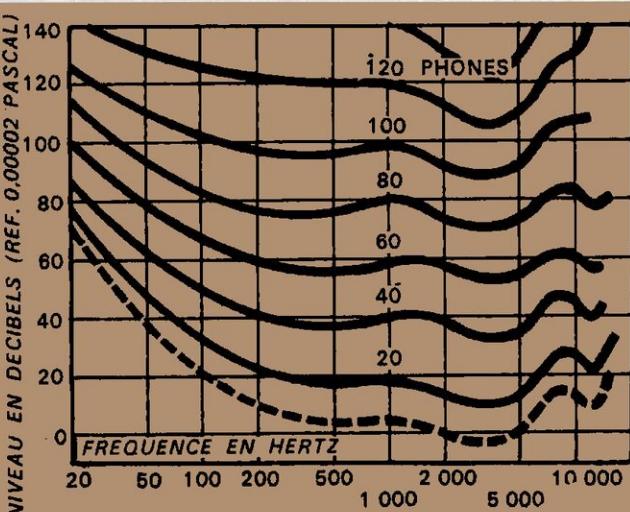
Malheureusement, nous ne connaissons pas bien les critères d'après lesquels notre système auditif distingue entre sons et bruits ; nous ne savons pas suffisamment non plus comment il réagit en présence de plusieurs bruits simultanés, ni comment leurs effets peuvent se cumuler. Enfin, les relations qui existent entre notre sensation d'intensité et les niveaux physiques sont encore assez mal connues.

Or, on a besoin d'appareils simples, pratiques et maniables, capables de mesures objectives. On a ainsi été conduit à ramener la mesure des niveaux de bruit à celle de niveaux de sons, en considérant tous les sons comme des bruits en puissance aux intensités élevées.

Les premières tentatives de mesures se firent par comparaison à l'oreille avec un son de fréquence déterminée. Malheureusement, les comparaisons demandaient beaucoup de temps et les résultats variaient selon les observateurs : d'où l'idée de construire des « sonomètres » qui seraient dotés des caractéristiques de notre système auditif.

La sensibilité du système auditif varie de façon considérable avec la fréquence. Toutefois aux intensités élevées, les niveaux subjectifs sont, à même niveau physique, à peu près semblables quelle que soit la fréquence.

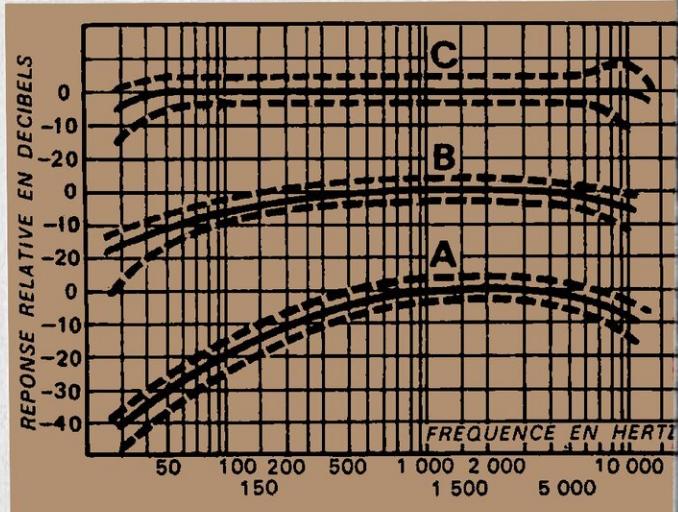
L'intensité subjective d'un son étant appelée *sonie*, les lignes qui relient les niveaux auxquels la sonie reste la même aux diverses fréquences sont dites *isosoniques*.



L'intensité de la sensation sonore, exprimée en phones, varie en fonction du niveau physique du son et en fonction de sa fréquence. On définit ainsi des lignes dites isosoniques.

Pour ne pas compliquer trop les sonomètres, on a retenu seulement trois lignes isosoniques, désignées par A, B et C. Elles correspondent, pour la courbe A, à 40 phones environ, pour la courbe B, 70 phones environ, pour la courbe C, 100 phones environ, le phone étant l'intensité physique en décibels d'un son de 1 000 Hz jugé équivalent. Sur la plupart des sonomètres, il y a en plus une courbe dite « linéaire » : cette dernière correspond aux niveaux physiques réels, c'est-à-dire non pondérés en fonction de la fréquence.

Les sonomètres sont faits pour mesurer des bruits, donc en général des sons fort complexes, souvent même des ensembles de bruits



Il est impossible, sur un sonomètre, de tenir compte de toutes les lignes isosoniques. On se contente le plus souvent de trois courbes normalisées internationalement A, B et C.

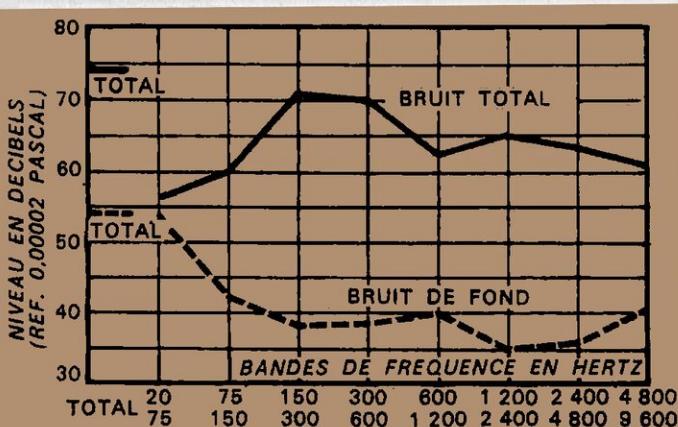
simultanés, ce qui correspond aux conditions réelles les plus usuelles. Il a donc fallu adopter un principe de sommation qui ne soit pas trop en contradiction avec ce que peuvent nous donner des comparaisons sensorielles entre divers bruits. On a admis que le résultat de la lecture devait correspondre à la racine carrée de la somme des carrés des pressions acoustiques des diverses composantes.

Quant à la constante de temps des sonomètres, elle devait se rapprocher assez nettement de celle de l'oreille. (La constante de temps est la durée minimum que doit avoir une impulsion acoustique pour être pleinement perçue.) On a adopté 200 millisecondes (caractéristique dite rapide) ; mais beaucoup de sonomètres ont aussi une caractéristique dynamique « lente », en général 500 ms, utilisable lorsque les bruits sont trop rapidement variables dans le temps.

Les sonomètres et leur utilisation

Un sonomètre comprend un microphone dont la courbe de réponse est sensiblement linéaire en fonction de la fréquence, un amplificateur sensiblement linéaire également, et des réseaux de pondération pour tenir compte des courbes A, B, C et linéaire ; un détecteur quadratique transforme les variations de courant alternatif en variations de courant continu, et le tout se termine par un galvanomètre sensible.

Les sonomètres sont gradués en décibels par rapport à un niveau de référence de $2 \cdot 10^{-5}$ pascal ($2 \cdot 10^{-5}$ newton/m², soit $2 \cdot 10^{-4}$ barye ou $2 \cdot 10^{-4}$ dyne/cm²).



Les sonomètres ne donnent pas de renseignements sur la fréquence des bruits. Pour cela, on a recours à des « analyseurs de bande ». On peut voir ici l'analyse en fréquences du bruit d'une machine à écrire. La courbe du bas correspond au bruit de fond.

Dans une chambre sourde
du Centre d'Essais de
Melun-Villaroche,
on se prépare à mesurer,
à l'aide
de microphones
montés sur un chariot mobile
télécommandé,
les niveaux sonores
développés par les étages
de compression d'un réacteur.



Selon l'intensité du bruit, on lit les niveaux sur les courbes A, B, C ou linéaire.

Cependant, ce procédé complique la mesure, car il faut d'abord choisir le réseau de pondération à employer ; d'autre part, l'emploi de courbes différentes selon les cas ne rend pas les résultats comparables entre eux ; enfin, malgré la complication des mesures, les résultats ne semblent pas, dans bien des cas, vraiment conformes à notre propre sensation.

On a ainsi été amené à utiliser une seule courbe, adoptée sur le plan international. Plutôt que d'utiliser la courbe linéaire, on a préféré prendre la courbe A. Les indications fournies par le sonomètre sont alors notées en dB (A). Ce procédé a toutefois l'inconvénient de minimiser les fréquences graves et les fréquences aiguës, ce qui peut avoir de graves inconvénients aux niveaux élevés.

En pratique, les sonomètres sont des appareils difficiles à manier : les bruits que l'on veut mesurer ne sont jamais isolés ; ils varient continuellement, de même que les bruits de fond présents au même moment. Par ailleurs, les bruits se réfléchissent sur les obstacles, d'où apparition d'ondes stationnaires avec renforcements ou affaiblissements en divers points de l'espace.

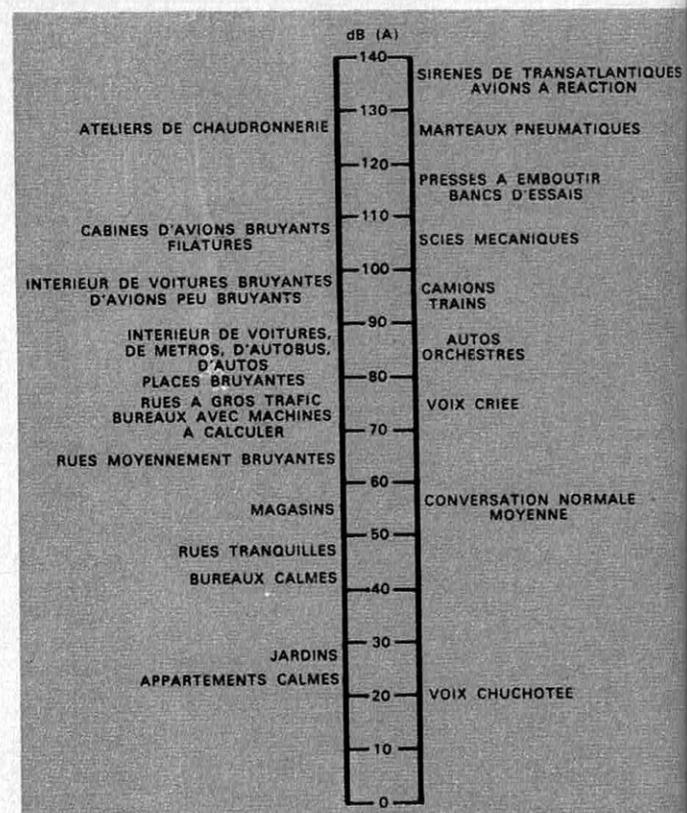
Même établis par des personnes spécialisées effectuant des mesures en divers points de l'espace, les résultats peuvent varier selon l'opérateur, l'appareil lui-même, etc. Souvent, ils restent encore assez loin de notre propre sensation.

On peut aujourd'hui construire des sonomètres qui permettent de mesurer des bruits impulsifs, ou variant très rapidement, mais on est encore loin d'une solution satisfaisante, car on ne sait pas très bien comment notre système auditif répond à de tels sons, ni même si certains caractères, comme la pente d'établissement, ne sont pas plus importants que le niveau sonore lui-même.

Si on veut connaître la répartition des diverses composantes des bruits, on peut adjoindre aux sonomètres des analyseurs de bandes comprenant des séries de filtres d'octave, de demi-octave ou de tiers d'octave, après s'être mis sur la courbe linéaire. On peut aussi faire des analyses de fréquences discrètes (c'est-à-dire de valeurs non continues, en nombre limité) qui mettent en évidence chacune des fréquences composantes, au moyen d'un analyseur spectral.

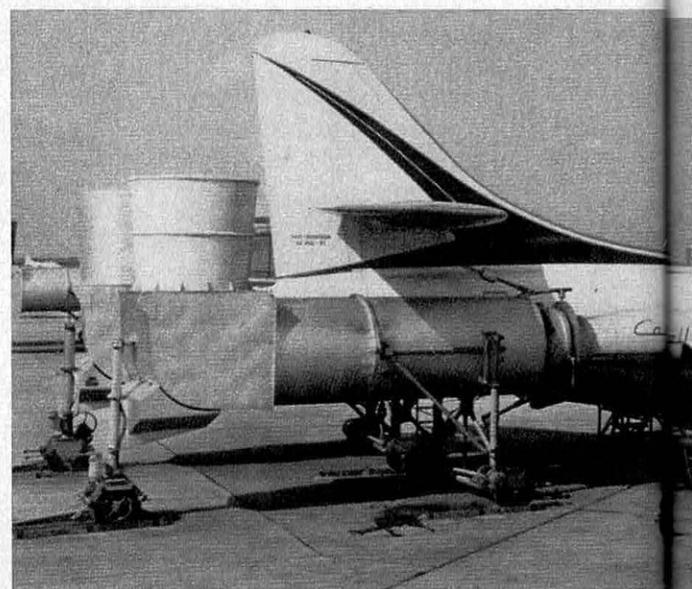
Quels sont, au total, les niveaux de bruits que les sonomètres vont mesurer dans notre environnement ?

La marge des bruits auxquels nous sommes soumis est extrêmement étendue. Elle peut aller de quelques dizaines de dB (A) dans les endroits les plus calmes à 140 ou 160 dB (A)



Les niveaux globaux d'un certain nombre de bruits enregistrés au sonomètre.

Les essais de réacteurs au point fixe produisent des niveaux sonores très gênants, voire nocifs. Dans ces conditions, des silencieux mobiles peuvent être utilisés. Ils agissent par division du flux de gaz chauds et par absorption complémentaire des vibrations sonores.



auprès de turboréacteurs. Le niveau des bruits peut être de 40 à 50 dB (A) dans les appartements calmes, de 60 à 80 dB (A) dans les rues moyennement bruyantes, de 70 à 90 dB (A) dans le métro, de 90 à 110 dB (A) dans les usines, de 120 à 130 dB (A) près de marteaux pneumatiques.

Les effets sur l'audition

Les effets physiologiques normaux des bruits sur l'oreille sont ceux des autres sons ; mais ils sont évidemment plus importants, car les bruits sont en général intenses, et leurs effets peuvent souvent être nuisibles. Aux intensités élevées, tous les sons, et donc les bruits, deviennent douloureux.

Certains sons peuvent rendre d'autres sons moins audibles, ou même les rendre complètement inaudibles ; c'est l'effet de masque, qui peut être fort désagréable quand, par exemple, il atteint le discours d'un interlocuteur. L'effet de masque peut même avoir des incidences graves lorsqu'un avertisseur ou une sirène se trouvent complètement masqués.

Il en est de même de la fatigue auditive. Lorsqu'un son ou un bruit trop intenses ont agi trop longtemps sur l'oreille (ou s'ils ont dépassé certaines limites, même pendant un temps court), notre système auditif se fatigue. Cette fatigue se traduit par un relèvement du seuil de sensibilité sur une bande très large de fréquences. Ce relèvement peut être très important, et l'oreille peut mettre très longtemps à récupérer.

Les bruits peuvent entraîner des lésions au niveau de l'oreille (traumatismes auditifs). Ces effets pathologiques correspondent, dans le cas le plus général, aux surdités dites professionnelles, provoquées par les bruits industriels. Les traumatismes auditifs se caractérisent par

des pertes auditives dans une bande plus ou moins large de fréquences.

Ils sont en général bilatéraux et le plus souvent comparables d'une oreille à l'autre, sauf si une des oreilles a plus ou moins été protégée (quand le bruit arrive fort latéralement, une oreille peut recevoir moins de bruit que l'autre).

Les traumatismes se manifestent d'abord aux alentours de 4 000 Hz. Une petite encoche apparaît sur les audiogrammes, diagrammes dont les coordonnées sont, respectivement, la fréquence et les pertes auditives en décibels par rapport à un niveau 0 correspondant aux seuils moyens d'individus jeunes et normaux aux diverses fréquences. Si la personne ainsi atteinte continue pendant des mois ou des années à travailler dans le bruit, l'encoche s'approfondit en même temps qu'elle s'élargit, d'abord vers les fréquences aiguës, puis vers les fréquences graves. Dans les cas extrêmes, toutes les fréquences aiguës peuvent être totalement perdues. Les pertes peuvent aussi s'étendre jusqu'à 500 Hz ou au-dessous.

Les traumatismes auditifs ne sont pas par eux-mêmes évolutifs. Le déficit auditif ne peut être récupéré, mais il ne peut non plus s'aggraver si on cesse de séjourner dans l'ambiance sonore nocive.

Les différences individuelles sont considérables : certains sujets sont atteints dès les premiers instants de leur présence dans le bruit, alors que d'autres le seront seulement au bout de plusieurs années, ou ne le seront jamais. L'évolution d'un traumatisme auditif est également fort variable avec l'individu.

D'autres effets sur l'organisme

Les bruits intenses peuvent avoir des effets sur des organes sensoriels autres que l'ouïe ; ils peuvent amener des pertes momentanées du sens de l'équilibre, dont les organes sont situés dans l'oreille interne.

Plus importants sont les effets psychiques. En présence de certains bruits trop intenses, nous éprouvons un sentiment d'inconfort, de déplaisir, de désagrément, d'angoisse, de gêne, voire d'apprehension ou de peur. Certains bruits peuvent, dans certains cas, par leur prolongation, leur signification, ou au contraire leur absence de précision, devenir une véritable obsession. Cela peut aboutir à des troubles de la personnalité (irritabilité, asthénie), ou aggraver des troubles préexistants. De temps à autre, la presse rapporte des gestes malheureux, ou même criminels, accomplis par des personnes qui en étaient arrivées à ne plus tolérer un bruit causé par leurs voisins.

Chacun sait par expérience qu'un niveau de bruit élevé rend plus difficile l'accomplisse-



Doc. Bertin



Cette installation en plein air,
à Istres,
permet des mesures acoustiques
sur des moteurs complets.

Le chariot,
au premier plan
porte les microphones
et est télécommandé
le long d'un rail
semi-circulaire
de rayon 60 mètres,
centré sur le moteur.



ment de certaines tâches ardues et aussi le travail intellectuel. Cela se traduit par une diminution de la rapidité d'exécution, par une augmentation des erreurs, par une réduction dans la précision ou la qualité des réponses. Certains de ces effets ont été mis en évidence. Mais les expériences sont difficiles à réaliser. En présence de grosses difficultés, tout se passe comme si nous pouvions mettre en jeu des réserves d'énergie, au moins durant le temps de l'expérience. C'est seulement dans des cas bien particuliers que des résultats significatifs ont été obtenus.

Il existe aussi des effets physiologiques généraux. N'importe quel individu a pu éprouver une fatigue générale, de la lassitude, parfois même une faiblesse générale, lorsqu'il s'est trouvé exposé à des bruits trop intenses.

On a pu mettre en évidence certaines perturbations du rythme cardiaque, du rythme respiratoire, du pouls. Mais ces effets, d'origine neurovégétative, apparaissent au début du bruit et disparaissent progressivement tandis que le bruit continue. Il s'agit plutôt d'effets d'alarme, de « stress », qui dépendent de l'émotivité plus ou moins grande du sujet.

Il semble aussi que les bruits puissent modifier les sécrétions de quelques glandes à sécrétion interne.

Les limites tolérables

Il serait intéressant de connaître les limites au-delà desquelles le bruit est intolérable. Le problème n'est, hélas, pas simple.

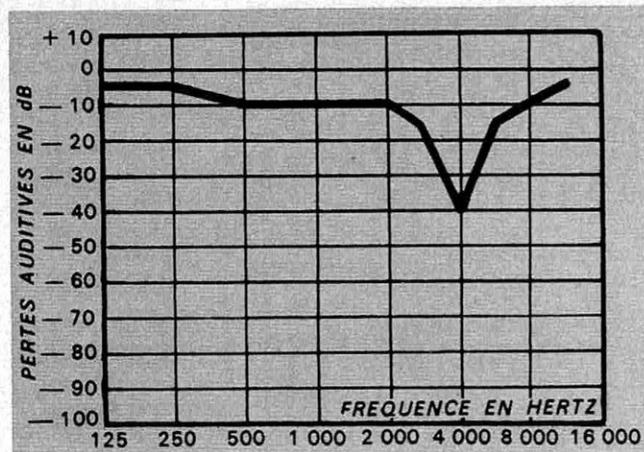
Les limites ne sont probablement pas les mêmes pour les traumatismes auditifs, les effets physiologiques, les effets psychiques ou la fatigue.

D'autre part, les limites acceptables varient suivant les conditions. On est certainement fort exigeant à la maison, surtout pendant la nuit ; on le sera moins dans une salle de conférence, et encore moins au bureau ou dans la rue.

Les données médicales abondent. Malheureusement, elles sont restées longtemps trop fragmentaires et ne pouvaient en général être comparées d'une étude à une autre. On dispose maintenant des premières statistiques portant sur plusieurs milliers d'individus. C'est sur la base de telles statistiques que viennent d'être adoptées un certain nombre de normes internationales relatives aux dangers des bruits professionnels en fonction du temps passé dans le bruit et du niveau de ce dernier.

Les données physiologiques, psychophysiologiques, psychiques et psychomotrices sont souvent encore trop limitées pour être d'une grande aide dans ce domaine.

Par contre, des données sociologiques obtenues sur la base d'enquêtes effectuées sur des mil-



Audiogramme d'une oreille atteinte de surdité professionnelle encore à ses débuts : la perte auditive s'amorce aux environs de 4 000 hertz. Si le sujet est maintenu dans les mêmes conditions de travail, la perte s'aggrave et s'étend à d'autres fréquences.

liers d'individus, de même que le dépouillement de plaintes enregistrées, commencent à fournir des ´ lments fort utiles.

A titre d'exemple, on peut classer les effets des bruits de la facon suivante, comme nous l'avions fait en 1958 :

- ★ Au-dessous de 30 dB (A) : bruits négligeables ; cela n'empêche pas la possibilité d'incidences psychiques (l'exemple de la goutte d'eau).

- ★ Entre 30 et 65 dB (A) : bruits faibles ou moyens ; quelques incidences psychiques et réactions physiologiques sont possibles.

- ★ Entre 65 dB (A) et 80 dB (A) : bruits assez intenses ; des perturbations physiologiques et psychiques sont possibles.

- ★ Entre 80 dB et 95 dB (A) : bruits intenses ; perturbations physiologiques et psychiques souvent importantes : traumatismes auditifs possibles.

- ★ Au-dessus de 95 dB (A) : bruits nettement trop intenses ; traumatismes auditifs à peu près certains.

Le niveau limite supérieur semble, de facon générale, se situer vers 80 ou 85 dB (A) ; 90 ou 95 dB (A) ne devraient en aucun cas être d  p  ss  s.

Nous avions, en 1958, proposé quelques limites de bruits acceptables dans des cas déterminés :

— hôpitaux	10 �� 15 dB (A)
— chambre �� coucher	15 �� 20 dB (A)
— appartement, bibliothèques, salles de concert	20 �� 30 dB (A)
— ��coles	25 �� 40 dB (A)
— salle de cours, de conférences	30 �� 40 dB (A)
— bureaux	30 �� 45 dB (A)
— salles de dactylographie,	

grands magasins, restaurants	45 à 55 dB (A)
— rues moyennement bruyantes,	
moyens de transport	50 à 65 dB (A)
— usines, chantiers	50 à 80 dB (A)
— places, avenues du centre	
des villes	50 à 80 dB (A)

Ces limites ne tiennent pas compte de la nature même des bruits ; certains bruits peuvent être irritants sans être très intenses (bruits de chocs ou bruit d'une scie par exemple).

Il est bien évident d'autre part que ces chiffres sont des conditions idéales, hautement souhaitables certes, mais qui ne tiennent pas compte des possibilités actuelles de la technique. Des compromis sont nécessaires.

La lutte contre les bruits

Il serait trop long d'envisager ici en détail toutes les méthodes de réduction des bruits. Disons seulement qu'on peut les grouper en quatre grandes catégories.

La première consiste à réduire le bruit à la source. C'est évidemment la meilleure ; elle peut être aussi la plus économique, surtout dans le cas de machines neuves.

Si l'on ne peut vraiment réduire le bruit à la source, il faut penser à réduire les bruits de conduction : on peut utiliser par exemple des capots très lourds, ou encore des dispositifs isolant la machine de son socle. (Les vibrations des machines transmises au sol ou aux planchers peuvent être aussi sources de bruits.)

Une troisième méthode consiste, chaque fois que cela est possible, à éloigner les travailleurs des machines trop bruyantes.

Lorsque tous les moyens de réduction des bruits ont été épousés et que ceux-ci sont encore trop intenses, il ne reste plus, dans le cas des bruits industriels, qu'à conseiller aux travailleurs de se protéger au moyen de boules qu'on malaxe et qu'on introduit dans le conduit auditif externe, de bouchons d'oreilles, de casques, etc. En fait, la diminution du bruit apportée par ces dispositifs reste faible : de 10 à 35 dB environ, selon les appareils et les fréquences. Si le bruit n'excède pas 90 à 100 dB, la méthode est acceptable. A partir de 110 à 120 dB, la protection n'est plus qu'illusoire. Ces dispositifs ne sont d'ailleurs jamais tout à fait bien supportés, surtout s'il faut les garder pendant de très longues heures chaque jour. Ils entraînent des maux de tête, peuvent provoquer des allergies, ou même des maladies de peau s'ils ne sont pas suffisamment propres, ce qui est difficile dans beaucoup d'ateliers. Ils peuvent aussi glisser et perdre alors tout pouvoir protecteur.

On a essayé de mettre au point des épreuves permettant de détecter les individus particulièrement sensibles. De nombreux tests ont

ainsi été proposés, mais malgré l'appréciation favorable de divers auteurs, il faut bien reconnaître qu'ils n'aboutissent pas aux résultats espérés.

En réalité, tous ces tests traduisent la fatigue auditive et il n'est pas prouvé que traumatismes auditifs et fatigue auditive soient de même origine, ni même que les traumatismes résultent d'une fatigue auditive répétée.

On en est donc réduit à préconiser des examens audiométriques fréquents (mesures des seuils auditifs aux diverses fréquences, en particulier), qui peuvent consister en épreuves audiométriques simplifiées, dits « tests de criblage ». Toute personne montrant des pertes auditives devrait être immédiatement éloignée de l'atelier ou du chantier bruyant dans laquelle elle se trouve et affectée à un travail moins bruyant, sans autre préjudice pour elle.

On commence à voir sur le marché de petits appareils indicateurs du niveau de bruit le plus élevé supporté dans la journée, qu'on porte dans la poche. Certes, il peut être intéressant de savoir que, pendant la journée, un travailleur a été amené à supporter un niveau de bruit supérieur à N décibels ; il serait même intéressant de savoir qu'il a eu à le supporter pendant x heures, si des perfectionnements ultérieurs le permettent. Il ne faut pas croire toutefois que ces petits appareils, d'ailleurs peu précis, puissent améliorer beaucoup la protection des travailleurs.

La législation en France

La législation en France est encore bien timide. Quelques décrets ou arrêtés municipaux ou préfectoraux interdisent l'utilisation des avertisseurs d'automobile en ville ou l'emploi de poubelles métalliques ; ou bien ils limitent le bruit des véhicules.

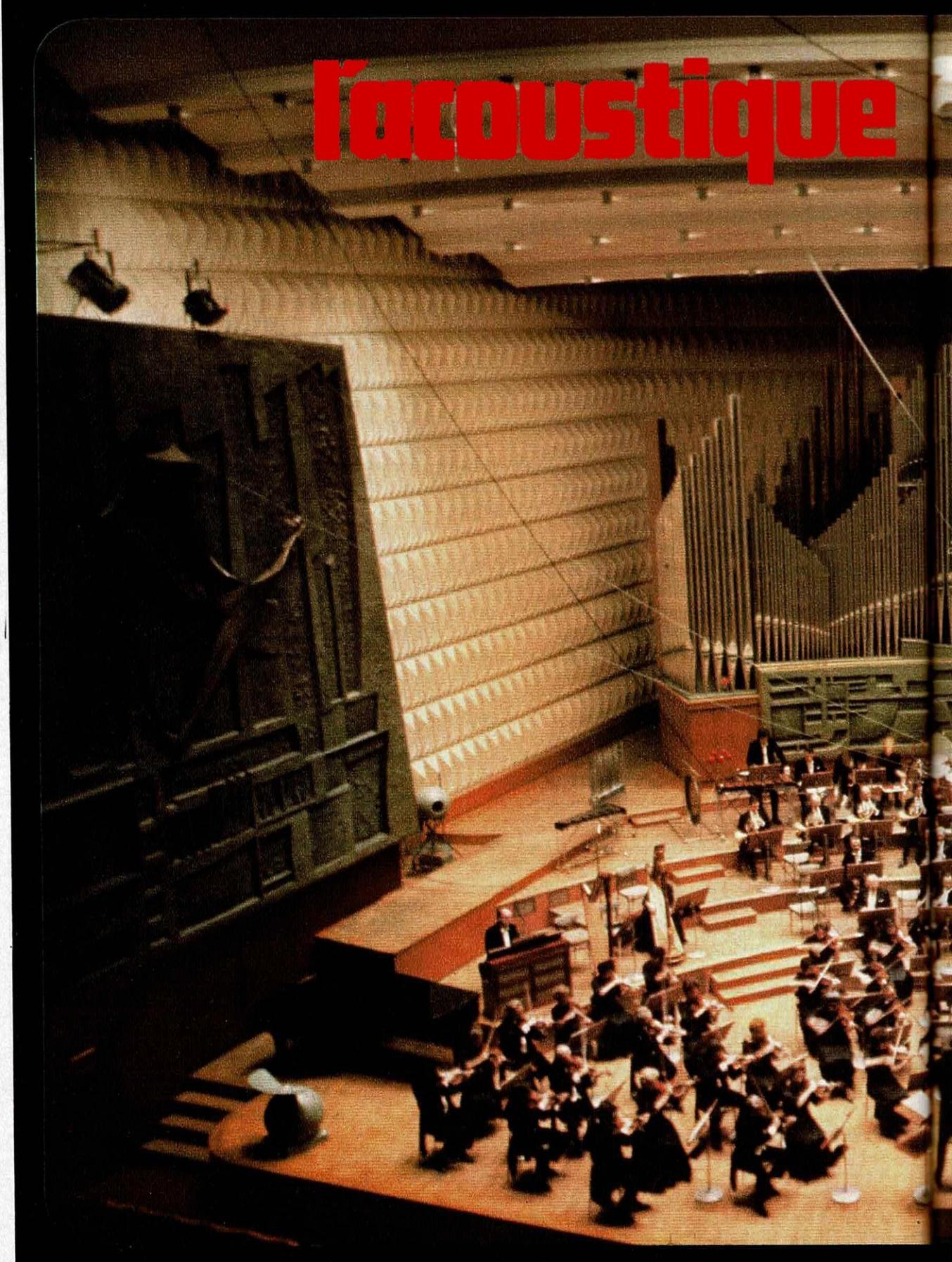
La surdité acquise au travail est reconnue depuis 1963 comme une maladie professionnelle, mais seulement dans quelques métiers.

Enfin, il existe quelques normes tendant à limiter les bruits dans certaines conditions. Tout cela ne va pas très loin, et on ne voit s'amorcer aucun ensemble cohérent de mesures législatives. Beaucoup d'intérêts sont certes en jeu ; mais doit-on faire passer l'intérêt économique avant la santé et le bien-être des individus ?

On attribue souvent l'absence de législation au fait qu'on manque encore trop de données précises. C'est peut-être vrai, mais cela justifie-t-il qu'on attende encore des années ? Tant qu'il n'y aura aucune réglementation, les responsables des bruits ne feront aucun effort pour les réduire. Mieux vaudrait une législation même imparfaite que pas de législation du tout.

René CHOCHOLLE

l'acoustique



Une réalisation récente de grande ampleur, l'Auditorium de la Maison de l'ORTF à Paris.

in

architecturale



L'acousticien, confronté avec un projet de salle, se trouve devant une série de faits pour le moins peu encourageants.

Certaines réussites quasi empiriques du passé demeurent subjectivement supérieures à maintes réalisations récentes. Même à l'époque des ordinateurs, l'acoustique architecturale n'est pas encore une science exacte ; ceci s'explique d'ailleurs très bien par la multiplicité des paramètres mis en jeu, qui touchent à des considérations sensorielles et esthétiques autant que physiques.

Les opinions émises sur la « qualité acoustique musicale » d'une salle sont fort divergentes selon qu'elles émanent de chefs d'orchestre, d'instrumentistes, de metteurs en scène, d'interprètes, de critiques ou d'auditeurs. De plus, la terminologie employée par ces diverses catégories d'usagers est fort variable et floue, donc difficile à transposer techniquement pour le spécialiste.

Les conceptions de l'architecte prennent encore souvent le pas sur les besoins acoustiques parfois les plus élémentaires. Et les exigences de plus en plus impératives dans le sens d'une polyvalence des salles de spectacle empêchent d'obtenir des résultats optimaux dans tous les cas. D'autant plus que l'on ne prévoit aucune latitude de mise au point par des « retouches » finales.

Il n'est pas question, en ce bref exposé, de donner des « recettes » (d'ailleurs fort variables suivant les auteurs), mais seulement de dégager les grandes lignes de ce qui est en question, à savoir les paramètres acoustiques sur lesquels peut s'appuyer une appréciation comparative de divers lieux musicaux et théâtraux. Ces paramètres seront groupés autour des attributs physiques fondamentaux de l'information musicale : *intensité, hauteur, timbre, durée, espace*. Dans chacune de ces cinq catégories émergera une caractéristique dominante, mais qui n'est jamais décisive en soi, car elle est toujours tributaire de plusieurs autres.

La gamme dynamique

C'est le rapport, dans une œuvre musicale, entre le fortissimo le plus puissant, et le pianissimo le plus doux. Il est évident que le seuil de cette échelle de nuances est tributaire du bruit de fond. Celui-ci provient tout d'abord des perturbations externes — c'est une question de bon isolement acoustique —, mais également du public lui-même. Même s'il est attentif et silencieux, les conditions les plus favorables, dans une ambiance assez réverbérante, correspondent à une courbe d'isotonie de 45 dB, fixant la limite des pianissimo. A l'autre extrémité de la gamme, le

fortissimo se situe autour de 95 dB, au milieu de la salle et aux fréquences médianes, avec des variations selon les œuvres et les milieux architecturaux. Il incombe donc au chef d'orchestre, entre autres missions, celle d'adapter les unes aux autres.

On voit que, dans les salles de concert, on ne dispose, généralement et pratiquement, que d'une dynamique utilisable d'une cinquantaine de décibels. Si, dans les studios d'enregistrement sans public, on peut abaisser considérablement le seuil des bruits (à quelque 20 dB), le tutti orchestral sera, lui, à un niveau réduit, plus compatible avec les possibilités de l'équipement électroacoustique et de l'écoute chez soi.

Au centre de la gamme des intensités, le mezzo-forte musical correspond au niveau moyen qu'il faut assurer à la voix parlée pour que l'intelligibilité soit satisfaisante, soit 70 dB. L'atténuation avec la distance conduit à recommander, pour un théâtre dramatique, de n'envisager aucune place distante de plus de 25 m de la scène.

Depuis les théâtres antiques, on a mis à profit les réflexions pour organiser géométriquement, au profit des emplacements les plus défavorisés, le renforcement des sons émanant directement de la source (une « amplification » de l'ordre de 6 dB peut être atteinte). La condition posée à l'emploi, en tant qu'« écho utile », d'une onde réfléchie, est que l'oreille saisisse les deux sons — direct et indirect — comme un seul. Le décalage entre eux ne peut aller au-delà du pouvoir de résolution auditive temporelle dans la zone conversationnelle. C'est ainsi que le délai critique — dans le cas le plus défavorable de signaux très brefs en un milieu peu réverbérant — est de l'ordre de 35 millisecondes. Compte tenu de la célérité du son (344 m/s vers 20 °C), la plus grande différence de parcours qui peut exister entre onde directe et onde réfléchie se chiffre à 12 m. Au-delà, avec une gêne progressive et proportionnelle au niveau réfléchi, on risque le phénomène nuisible de l'« écho franc », perçu en tant que répétition nettement séparée de l'information sonore originale.

On comprend le rôle initial de l'étude de la forme de la salle. Un des problèmes essentiels du projet acoustique est de prévoir une énergie suffisante des premières réflexions par rapport aux réflexions retardées et répétées qui formeront la réverbération. Les premières réflexions sont celles qui ne sont pas différées de plus de 50 millisecondes par rapport au son direct. C'est à leur intention que l'on a suspendu, au-dessus du podium, des panneaux réflecteurs — souvent en matière plastique transparente — que la terminologie anglo-américaine baptise « clouds » (nuages).



La salle du Royal Festival Hall de Londres, un des meilleurs exemples d'architecture contemporaine des salles de concert. Conçue en 1948, la salle a été modifiée il y a quelques années afin d'accroître le temps de réverbé-

ration, c'est-à-dire la « chaleur » des sonorités musicales. A cet effet, des microphones disposés au plafond captent les vibrations sonores en voie d'absorption ; amplifiées, elles sont « réinjectées » dans le volume de la salle.

L'équilibre spectral

Ce qui vient d'être dit concernant l'obtention, à toutes les places, d'un niveau sonore suffisant, concerne principalement les fréquences centrales du spectre, soit en gros la bande 800 Hz — 3 kHz qui correspond à la fois à la zone de sensibilité auditive maximale, à tout ce qui est nécessaire à l'intelligibilité vocale, et à l'essentiel de l'information musicale, du point de vue mélodique.

Mais pour donner à la musique toute sa richesse sonore, il est indispensable que la propagation soit assurée tout au long du spectre audible, de 30 Hz à 15 kHz. Ceci suppose que, par rapport à la bande médiane, le niveau soit, d'une part, suffisant dans le registre grave pour donner à l'orchestre toute sa « chaleur » sonore, et qu'il en soit de même, d'autre part, aux fréquences extrêmes-aiguës, pour qu'il n'y ait pas de perte de « brillant ». Autrement dit, il faut éviter toute absorption acoustique sélective, ou excessive, dans l'aigu ; s'assurer d'une énergie suffisante des premières réflexions dans le grave et veiller à obtenir une

allure acceptable de la courbe de réverbération en fonction de la fréquence.

Une bonne définition instrumentale suppose, en conjonction avec une intensité suffisante et une réverbération sans excès, la reconnaissance du timbre propre de chaque instrument, l'identification des « pupitres », et un équilibre correct (« balance ») entre eux. Cela exige l'absence de déformations lors des attaques (régime transitoire) et durant les périodes quasi-stables. L'apparition accidentelle d'harmoniques et de partiels indésirables par distorsion acoustique due à la salle peut compromettre la qualité sonore « bien timbrée » des violons, en particulier.

La réverbération

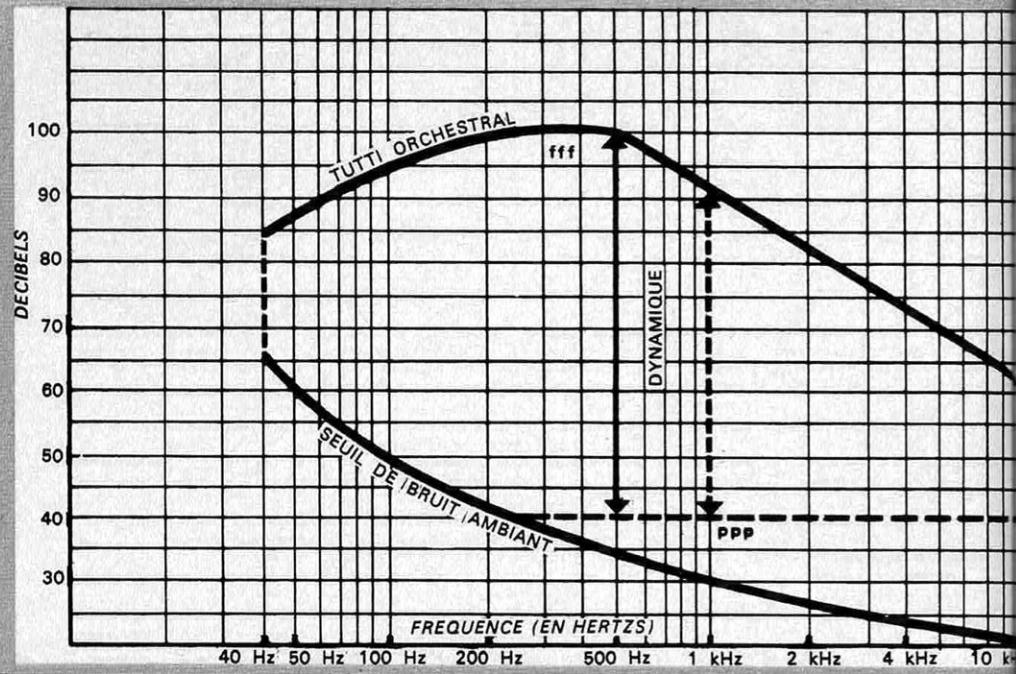
Il s'agit d'un mécanisme acoustique qui doit absolument jouer lors d'une exécution orchestrale. En revanche, il n'est pas souhaitable, à forte dose, en ce qui concerne la voix parlée. D'où difficulté de compromis. Les divers programmes musicaux correspondent d'ailleurs à



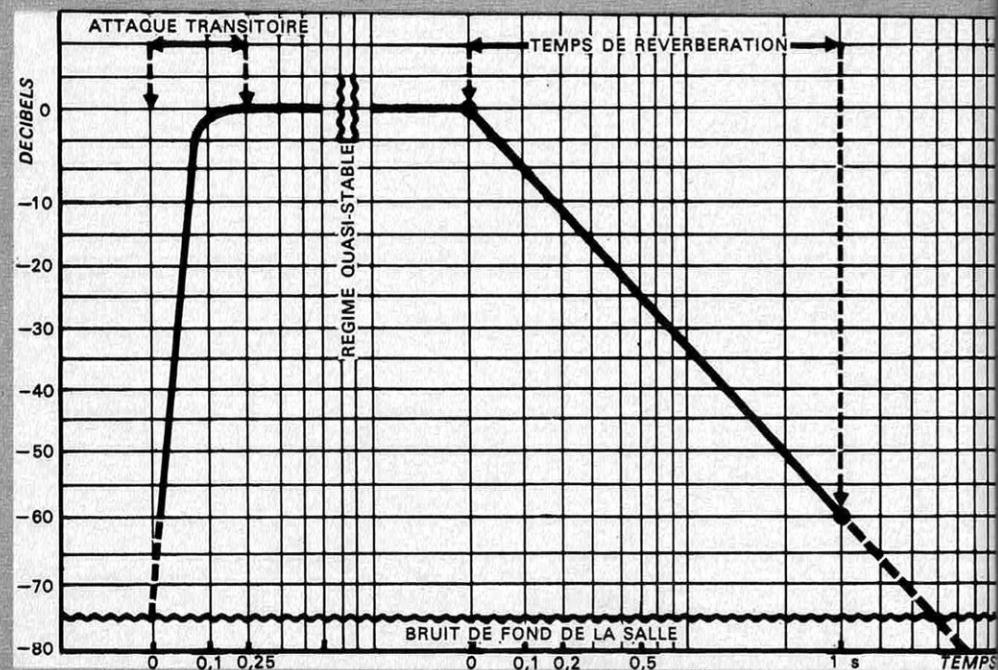
La salle
Gérard Philipe,
à Saint-Denis, près
de Paris, est considérée
par les spécialistes
comme de très haute qualité.



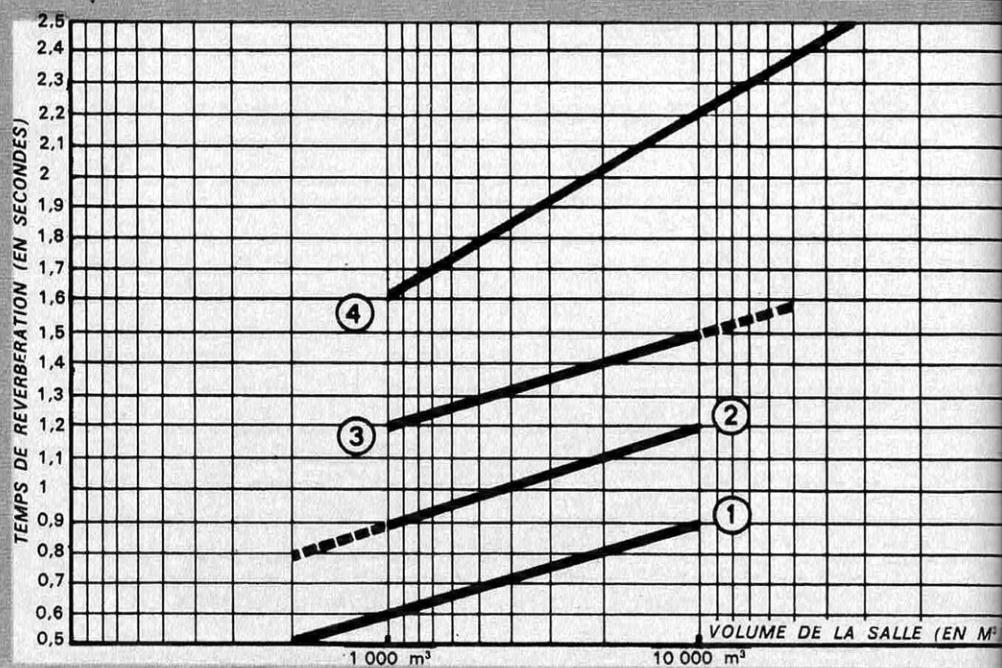
Le champ instrumental d'une salle. Sur ce graphique sont portés: en ordonnées, le niveau sonore en dB; en abscisses, la fréquence en Hz (l'échelle logarithmique a l'avantage de concentrer les données). La « dynamique », entre le pianissimo (ligne horizontale tiretée) et le tutti orchestral varie avec la fréquence. Le champ instrumental (aire comprise entre les deux courbes) varie avec la salle et l'œuvre exécutée. Il est limité, vers les basses fréquences, par le bruit de fond.



La réverbération. On a représenté ici l'évolution dans le temps du niveau d'une note soutenue (par rapport à un niveau de référence de 0 dB). L'attaque instrumentale est très brève devant le « corps » de la note, dont la durée est fixée par des considérations esthétiques. La décroissance est volontairement affectée d'une certaine « traînée », mesurée par le temps de réverbération, et qui est fonction de la salle elle-même.



Temps de réverbération optimaux. On peut définir, aux fréquences moyennes, des temps de réverbération souhaitables en fonction du volume des salles et de leur destination. En 1, maxima pour studio enregistrement (parole) et minima pour salle de cinéma ou de conférences. En 2, maxima pour salle de cinéma, minima pour théâtre. En 3, maxima pour théâtre (art lyrique), minima pour salle de concerts. En 4, maxima pour salle de concerts, minima pour musique sacrée.



des exigences diverses en la matière. La « réverbération » se définit comme la persistance d'un son, sous la forme d'une « traînée sonore » qui se manifeste dans un espace clos (c'est-à-dire où le son fait l'objet de multiples réflexions successives), après l'interruption brusque de la source acoustique (après une note soutenue, par exemple) ou lors de l'émission d'un signal impulsif (cas de la parole avec prédominance de consonnes). Ce phénomène va en décroissant, du fait de l'absorption dans l'air et les matériaux, lors des trajets et réflexions répétées. Cette décroissance est plus rapide que celle d'un son simple s'affaiblissant seulement en fonction de la distance.

On chiffre une *durée* (ou temps) de réverbération de la façon suivante : pour une fréquence et un point d'audition donnés, c'est le temps qui correspond à une décroissance de 60 dB, c'est-à-dire au millionième de la valeur initiale, soit un niveau d'inaudibilité. Le taux de décroissance est théoriquement supposé à peu près constant au cours du processus de réverbération. Ceci est loin d'être toujours le cas, mais les acousticiens s'accordent, depuis quelques années, sur la moindre importance de la forme finale de la réverbération. En revanche, l'allure régulière de la chute de niveau des vingt premiers décibels joue un rôle décisif, les premières 60 ms du temps de réverbération étant critiques. La durée totale (selon la définition) optimale varie de façon sensible, selon les genres de programmes et le volume de la salle. Aux fréquences centrales, les ordres de grandeur vont de une à plusieurs secondes. De plus, en fonction des fréquences, de part et d'autre de la zone de référence, si des écarts locaux d'une certaine importance sont condamnables a priori, il est souhaitable, lorsque la durée de réverbération est assez courte dans le registre médian

(500 Hz — 1 kHz), qu'elle s'allonge vers le grave (de 20 à 50 % de plus à 100 Hz qu'à 500 Hz), et qu'elle ne s'affaiblisse pas outre mesure dans l'aigu : il faut qu'à 4 kHz, elle ne soit pas inférieure à 70 % de sa valeur à 1 kHz, pour que le « brillant » ne soit pas atténué.

En réalité, dès qu'une salle atteint un certain volume (1000 m^3), pour qu'il y ait perception auditive d'une information à fréquence basse, il est indispensable qu'il y ait un minimum de persistance sonore, de l'ordre de 1,5 seconde. Ceci en raison du pouvoir de résolution de l'oreille, qui exige, au bas du spectre, une durée beaucoup plus longue qu'aux fréquences centrales et élevées. Si l'on tend à se limiter, pour ces dernières, à un temps de réverbération plus bref — une seconde, environ — c'est pour conserver une bonne définition instrumentale dans la zone la plus sensible de l'oreille, et, éventuellement, une bonne intelligibilité de la voix parlée et chantée.

Si une très grande salle (10000 m^3) est destinée uniquement au concert, on peut considérer que le temps de réverbération optimal se situe aux environs de 2 secondes, et un relèvement relatif dans le registre grave est moins impératif.

Il paraît évident que le cas le plus ardu est celui du théâtre lyrique. Les traditionnelles « salles à l'italienne », si elles ont résolu le problème de l'équilibre fosse-plateau jusqu'aux conceptions d'un Verdi, n'ont plus répondu à celles inaugurées par Wagner. Il a été lui-même conduit instinctivement à l'acoustique plus réverbérée — mais avec une atténuation de l'orchestre — de son propre théâtre de Bayreuth. Il va de soi que, pour une salle destinée essentiellement au théâtre parlé, la réverbération doit demeurer modérée, et qu'il n'y a aucun intérêt à l'allonger de part et



Fréquences et réverbération.

Sur la base du temps de réverbération aux fréquences moyennes, précédemment défini, et pris ici égal à 1 seconde, on est conduit en pratique : à relever les fréquences graves dans des proportions correspondant à la zone hachurée de gauche (le temps d'intégration de l'ouïe est plus grand dans les basses fréquences) ; à atténuer les fréquences élevées (aire hachurée de droite), en dépit de leur affaiblissement avec la distance.

Une salle de concert « en rond », la Philharmonie de Berlin : on distingue, sous le plafond, les panneaux réfléchissants de type « nuages ». Œuvre de l'architecte Hans Scharoun, la salle fut inaugurée en 1963.



d'autre d'une bande de fréquences, à mettre en évidence, de 250 Hz à 4 kHz.

La durée de réverbération peut varier, dans la même salle, selon son degré d'occupation. Plus il y a de public, plus l'absorption augmente, et plus la réverbération diminue. On tend heureusement, aujourd'hui, à conserver une valeur presque invariable en capitonnant les fauteuils de telle sorte que leur absorption demeure à peu près égale à celle d'un auditeur, en l'absence de celui-ci.

A rappeler les influences — déjà signalées — de la réverbération sur la gamme dynamique (qu'elle déplace vers les niveaux plus élevés : elle élève le seuil de bruit de fond, mais elle contribue à l'effet subjectif d'épanouissement du « crescendo »), sur l'équilibre spectral (son « soutien » aux fréquences extrêmes), et sur le timbre instrumental. Elle influe également sur le mouvement (« tempo ») que le chef d'orchestre donne à une œuvre. C'est là un facteur musical de *durée* : s'il est esthétique, il est physiquement tributaire du fait que plus la réverbération est allongée, plus le mouvement tend à se ralentir, pour éviter le chevauchement et la confusion des informations sonores successives.

Les caractéristiques spatiales

Dans une salle de concert, la proportion des réflexions par rapport au rayonnement direct peut atteindre les 9/10 au-delà des premières rangées de fauteuils d'orchestre. La plupart des auditeurs sont donc enveloppés dans le champ dit « diffus » ou « réverbéré ».

Une bonne « diffusion » assure une répartition raisonnablement isotrope dans ce champ. Cette caractéristique acoustique est difficile à chiffrer, mais l'expérience des salles de théâtre et de concert réussies empiriquement au siècle dernier prouve le rôle bénéfique d'une ornementation poussée, qui « diffuse » en tous sens les ondes sonores.

L'architecture contemporaine y substitue des asymétries : alternance de surfaces planes et convexes, de zones réfléchissantes et absorbantes.

Ce qui compte, du point de vue de l'auditeur, c'est l'ouverture de l'angle apparent de provenance des sons dans le champ diffus, qui lui procure une impression de dimension apparente de la source.

La localisation des informations orchestrales s'opère principalement à partir des attaques instrumentales. En effet ces signaux transitoires parviennent aux places éloignées avant que le champ diffus ait pu s'établir par réverbération des notes soutenues.

Les salles polyvalentes

Cette évocation rapide des paramètres dominants de l'acoustique interne des salles publiques, dont certains sont très « fuyants », surtout lorsqu'on tient compte des rapports délicats qui existent entre eux, laissera inéluctablement une impression de complexité. Et, contrairement au facteur d'instruments, l'acousticien architectural n'a pratiquement pas la possibilité d'*« accorder »* sa réalisation. Qui plus est, les conceptions nouvelles vont, nous l'avons vu, vers des salles polyvalentes parfois très grandes.

Comment alors trouver une solution acoustique unique, pour des buts multiples tels que :

- conférences et congrès,
- projections cinématographiques,
- théâtre dramatique traditionnel,
- théâtre en rond,
- récitals et musique de chambre,
- concerts symphoniques (œuvres classiques, romantiques et modernes),
- théâtre lyrique,
- ballets (de plus en plus fréquemment, avec musique enregistrée),
- spectacles de variétés,
- prise de son, pour enregistrement et radio-diffusion (qui donne la préférence à une moindre durée de réverbération).

L'acoustique « pure », *passive*, ne peut prévoir, de façon réellement optimale, qu'un ou deux de ces cas. La solution de l'avenir, c'est l'électroacoustique, une acoustique « technique », *active*, s'adaptant par réglages. Aujourd'hui elle a déjà de remarquables réalisations à son palmarès, non seulement dans le domaine des effets sonores théâtraux, mais dans celui de l'allongement artificiel et sélectif de la réverbération de salles de concert, où cette « aide » électronique ne peut être discernée par les auditeurs : une grande salle idéalement sèche pour les compositions contemporaines devient, à la demande, l'équivalent d'une salle « classée » pour l'exécution d'une œuvre orchestrale romantique ; ou encore, une salle d'opéra peut devenir, à l'occasion, une bonne salle de concerts symphoniques... Fort éloignées de la « sono » bâclée ou de style « pop » (avec niveau porté jusqu'au seuil de douleur auditive, et recherche systématique d'une distorsion maximale) sont les possibilités de *renforcement*, par voie électroacoustique, des voix, voire d'instruments faibles. En l'état actuel des techniques du son, il ne manque point de matériels parfaitement adéquats. Ce qui manque encore, c'est une expérience suffisante de la mise en œuvre des équipements — la sélection et l'implantation des haut-parleurs, tout d'abord — qui est loin d'être uniquement une affaire d'électronicien.

Jacques DEWÈVRE

LES SONS EN CONSERVE

DU PHONOGRAPHE D'EDISON AM

M. Toscas

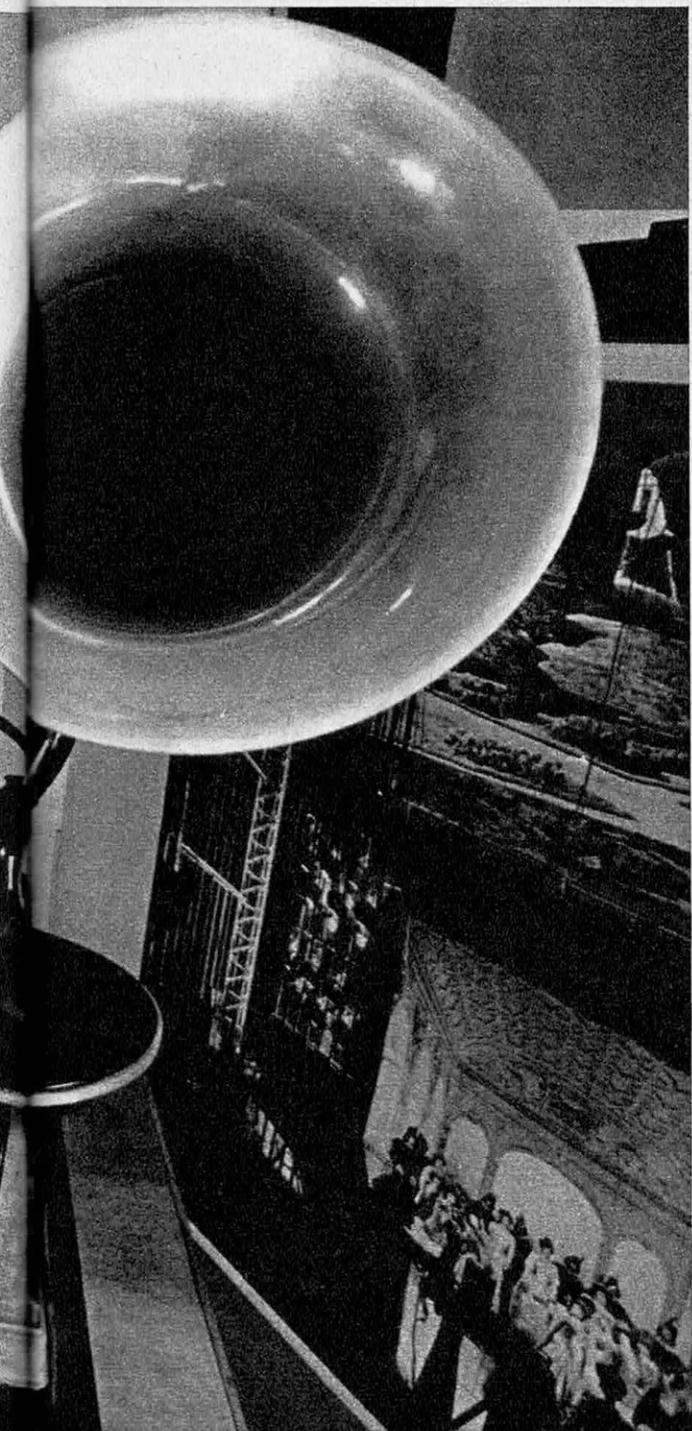


Dès 1910, le Chronophone Gaumont fut utilisé pour la sonorisation des films. Il s'agissait

en fait de deux appareils, un projecteur et un phonographe un peu particulier, à double

Nous remercions M. Didier, Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers, de l'aide qu'il nous a apportée pour l'illustration de cet article.

MAGNETOPHONE STEREO



plateau et amplificateur à air comprimé. Une liaison électrique était assurée entre les deux.

Transmettre les images et les sons à travers les trois dimensions de l'espace et à travers la quatrième dimension, celle du temps, a toujours été le rêve des hommes. En inventant, il y a un siècle et demi, le premier procédé de photographie, Nicéphore Nièpce réalisa la transmission à travers le temps des images immobiles. Par la suite, les frères Lumière en firent autant pour les images mobiles. Quant à leur transmission à travers l'espace, elle fut réalisée il y a une cinquantaine d'années par Edouard Belin, créateur de la phototélégraphie. Plus récemment, œuvre de plusieurs chercheurs de divers pays, la télévision permit de transmettre à travers l'espace des images mobiles.

Et le son ? Chose curieuse, les moyens de sa transmission dans l'espace et dans le temps furent conçus presque simultanément. En effet, c'est en 1876 qu'Alexandre Graham Bell inventa le téléphone. Et, un an plus tard, Thomas Alva Edison devait déposer son premier brevet de phonographe.

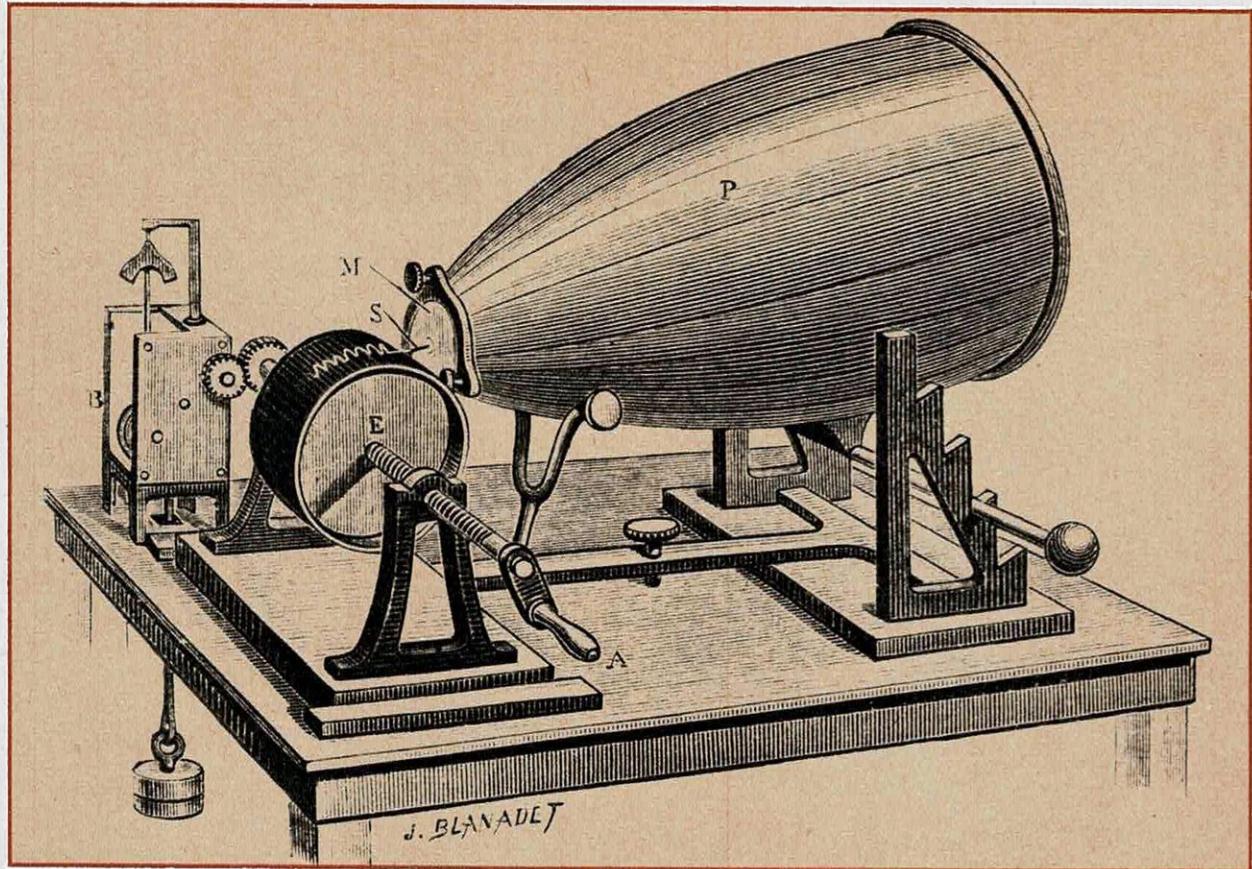
Cette quasi-simultanéité n'est point l'effet d'un hasard. Les deux inventions ont été rendues possibles grâce à la réalisation du microphone, appareil qui permet de traduire les ondes sonores par des variations de courant électrique.

Les précurseurs d'Edison

Celui que l'on doit considérer comme le plus grand pionnier de la « science-fiction », Cyrano de Bergerac, raconte dans son roman « Voyage dans la Lune », écrit il y a trois siècles et demi, que son héros a découvert des « boîtes parlantes » que les Lunaires utilisent à la place de livres.

Au début du XIX^e siècle, un physicien anglais, Thomas Young, réalisa un dispositif permettant d'enregistrer graphiquement les vibrations sonores. A cette fin, un corps vibrant sous l'action des sons doit être muni d'un fin stylet qui touche la surface d'un papier recouvert de noir de fumée. Le papier défile sous le stylet dont les mouvements inscrivent ainsi des courbes correspondant à la forme des oscillations sonores.

Au milieu du siècle dernier, le grand chercheur français Lissajous utilisa ce procédé, perfectionné par Léon Scott, en employant un papier enroulé autour d'un cylindre animé d'un



Dans le Phonoautographe de Léon Scott de Martinville (1857), une membrane tendue au fond d'un pavillon parabolique communiquait

son mouvement à un stylet inscrivant sur un cylindre enduit de noir de fumée. Le procédé de Scott ne permit pas la reproduction du son.

double mouvement : celui de rotation et celui de lent déplacement le long de son axe. De la sorte, le tracé du stylet suit sur le cylindre une trajectoire en forme de spirale. Notons que ce même mouvement devait être, par la suite, utilisé aussi bien dans le phonographe que dans le bélénographe.

Mais il ne suffit pas d'enregistrer le son : il faut aussi trouver le moyen de le reproduire. Ce moyen fut simultanément conçu par un poète français, Charles Cros, et par le grand inventeur américain, Thomas Alva Edison.

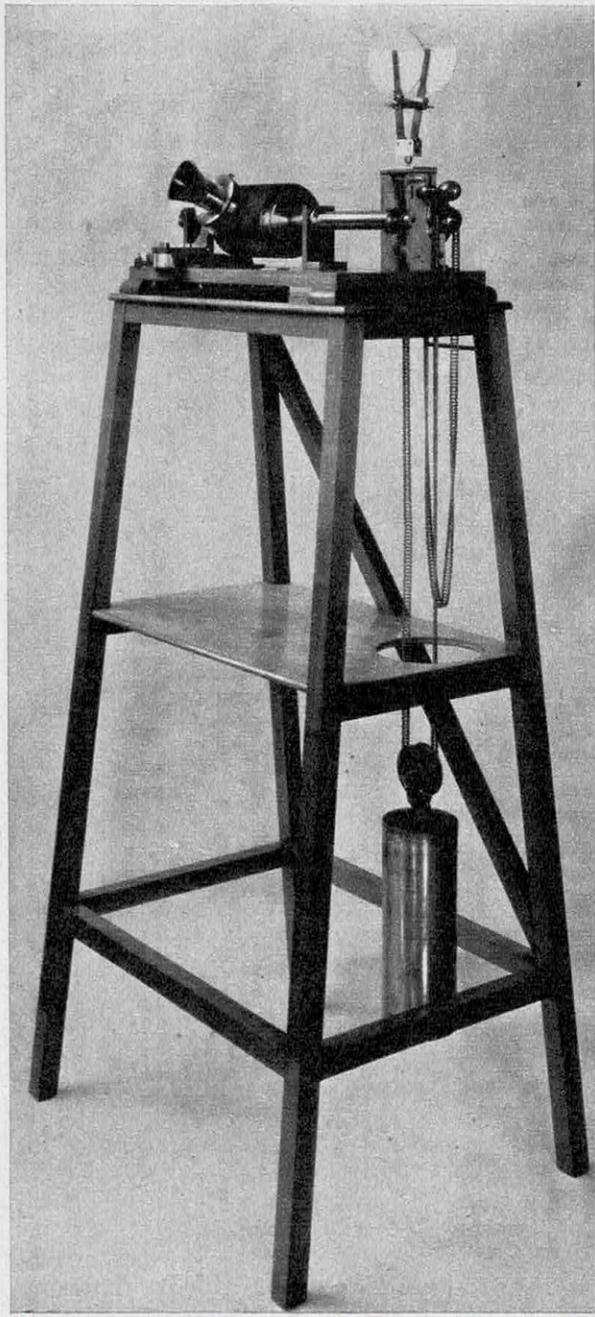
Dans un pli cacheté que Charles Cros déposa, le 30 avril 1877, à l'Académie des Sciences, il décrit en détail le procédé servant à enregistrer le son sous forme d'un graphique à la surface d'un disque de papier noirci, animé d'un mouvement de rotation avec une pointe qui effectue un lent déplacement latéral. Ensuite, faisant appel à des méthodes photographiques, le tracé ainsi obtenu permet de réaliser une gravure en relief sur un disque métallique. Et celui-ci permet de reproduire le son en faisant vibrer une pointe métallique solidaire d'une membrane élastique. L'année suivante, à peine âgé de 36 ans, Charles Cros

devait décéder. Il est à peu près certain que, manquant de moyens, il n'avait jamais réalisé l'appareil de son invention.

La naissance du phonographe

Dès le mois de juillet 1877, Edison se livrait à des expériences d'enregistrement et de reproduction du son dans son laboratoire de *Western Union* à Menlo-Park, près de New York. Le 19 décembre 1877, il déposait son premier brevet ; une addition à ce brevet devait être remise le 15 janvier 1888, et c'est là que, pour la première fois, figurait le mot « phonographe ». Peu de temps après, fut fondée la *Edison Speaking Phonograph Company*.

Comment était réalisé cet ancêtre des appareils permettant de transmettre le son à travers le temps, qui nous permettent aujourd'hui d'entendre la voix du ténor Enrico Caruso, mort en 1921, et, d'une façon plus générale, assurent la pérennité de toutes les voix et de toute musique qui le méritent ? Le premier phono d'Edison se composait essentiellement d'un diaphragme métallique, vibrant sous



Ce modèle de phonographe Edison (première manière) était amélioré par un entraînement avec poids et régulateur.

l'action des ondes sonores, au centre duquel était fixé un stylet dont la pointe s'appuyait sur une feuille d'étain et y gravait des sillons en forme de spirale. La feuille était enroulée autour d'un cylindre mobile ; celui-ci d'un diamètre de 4,5 pouces et long de 18 pouces, était monté sur un axe horizontal dont une extrémité était munie d'une manivelle et l'autre, elle-même filetée, passait à travers un écrou-support. De la sorte, lorsqu'on tournait la manivelle, le cylindre, tout en effectuant un

mouvement de rotation, se déplaçait horizontalement avec douceur.

Lorsqu'une feuille d'étain se trouvait ainsi gravée sous l'action des sons, ceux-ci pouvaient être reproduits par le même appareil. Le relief des sillons défilant sous la pointe du stylet animait celui-ci de vibrations identiques à celles qui avaient servi à l'enregistrement, et les oscillations du diaphragme engendraient des ondes sonores. On était cependant très loin de ce que nous appelons la haute fidélité... Notons que, par la suite, Edison devait apporter au phonographe pas mal de perfectionnements, à commencer par l'emploi d'un pavillon acoustique qui concentre les ondes sonores sur le diaphragme. Il a également expérimenté l'enregistrement sur disque métallique. Mais, dans toutes ses recherches, la gravure des sillons était effectuée selon le principe de profondeur variable. Ce fut notamment le cas des supports cylindriques amovibles en cire qu'il a commencé à utiliser en 1888.

L'évolution du phonographe mécanique

Une fois lancée par Edison, l'idée du phonographe devait se développer rapidement et donner lieu à diverses réalisations industrielles. C'est ainsi qu'un jeune horloger britannique, Charles Summer Tainter, eut, de son côté, l'idée d'effectuer les enregistrements sur des cylindres de cire. Et il fut le premier à remplacer la pointe métallique de gravure par une pointe en saphir.

Cependant, le pas décisif dans l'évolution du phonographe a été franchi par un chercheur allemand, Emile Berliner, né en 1850 à Hanovre, et qui, à plusieurs reprises, s'est rendu aux Etats-Unis où il a gagné une grosse fortune en vendant à la *Bell Telephon Company* son brevet de microphone perfectionné.

En 1889, de retour dans son pays natal, il présenta le *Grammophon*, où le son est enregistré sur un disque recouvert de cire, la gravure étant faite non pas en profondeur, mais latéralement. Avec la plus grande loyauté, Berliner déclara que l'idée de ce mode de gravure lui avait été inspirée par les travaux du chercheur français Léon Scott, celui qui a perfectionné le procédé de Thomas Young d'inscription du son.

Dès lors, l'industrie phonographique se développe dans plusieurs pays. C'est ainsi qu'en France les frères Emile et Charles Pathé, d'origine alsacienne, commencent, en 1896, à fabriquer des phonomètres à cylindre dans une petite serrurerie de Belleville et en font la démonstration et la vente dans un local situé place Pigalle. Reçus avec honneur par Edison, lors de leur passage à New York, les deux frères obtiennent la représentation de son entreprise pour toute l'Europe.

Au début de notre siècle, le phonographe à rouleau était beaucoup plus répandu que le modèle à disques. Peu à peu, cependant, ce dernier devait l'emporter. La pointe de lecture était constituée soit par un saphir, soit par des aiguilles interchangeables. Le moteur mécanique devait, dans des modèles plus récents, être parfois remplacé par un moteur électrique. Et le pavillon occupait un volume considérable.

Quant aux disques, à partir de 1908, ils étaient reproduits par pression et gravés sur les deux faces.

Tout a changé avec l'électronique

C'est en 1925 qu'apparut le premier disque enregistré par un procédé électrique et non plus mécanique.

Grâce au microphone, on transforme les sons en signaux électriques ; ceux-ci sont amplifiés à l'aide de tubes électroniques. Le courant passe dans un électro-aimant dont le champ variable fait osciller un ressort pourvu d'une pointe graveuse. L'enregistrement ainsi obtenu est d'une qualité très supérieure à celle des procédés mécaniques.

Peu d'années après, l'électronique est venue

apporter son concours à la reproduction. La réversibilité des phénomènes électromagnétiques a conduit à la réalisation de ces « lecteurs » de son que l'on appelle parfois « pick-up ». Conçus selon le même principe que les graveurs électromagnétiques, ils contiennent une armature en fer que font vibrer les aiguilles posées sur les disques. Cela induit des courants variables dans les électro-aimants dont les pôles sont disposés autour de l'armature. Et les courants, après amplification, sont appliqués aux haut-parleurs qui reproduisent fidèlement les sons. Tel est le principe des électrophones. A la place des lecteurs électromagnétiques, ils peuvent aussi employer des lecteurs piézoélectriques où les signaux sont engendrés par des variations de pression sur des cristaux de quartz.

Après la seconde guerre mondiale, on a vu apparaître une nouvelle sorte de disques : les « microsillons ». Réalisés en matière plastique, ils comportent un nombre élevé de sillons très fins. Leur vitesse de rotation est de 33 1/3 ou 45 tours par minute, alors que les disques d'avant-guerre faisaient 78 tours par minute. C'est dire qu'à diamètre égal, les disques actuels ont une durée de reproduction bien plus longue.

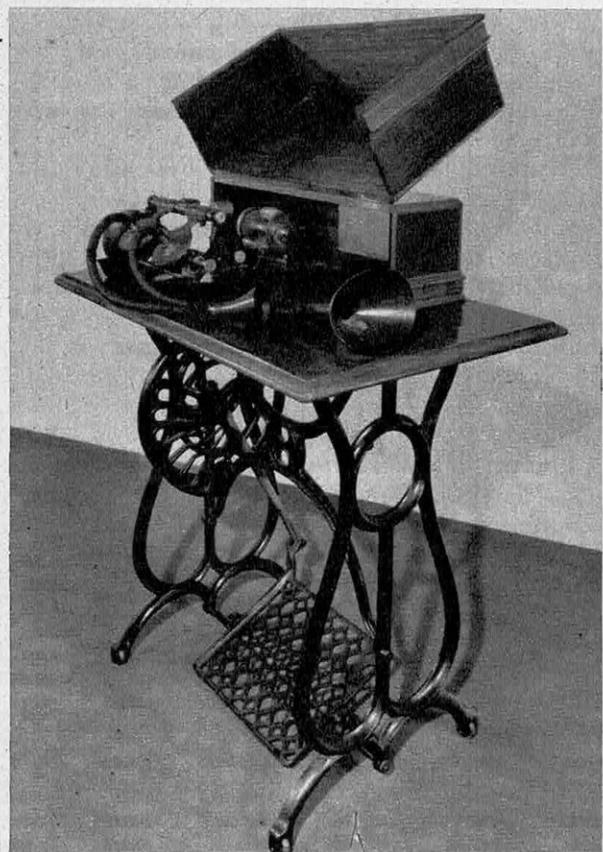
Là ne s'arrête pas le progrès. Depuis une douzaine d'années, la stéréophonie a fait une entrée victorieuse dans la technique phonographique. Dans le même sillon sont inscrites les voix de gauche et de droite. A l'aide d'un lecteur approprié, on parvient à reproduire distinctement les signaux.

Tout récemment, le disque a pénétré dans le domaine de la télévision. Une grande firme allemande d'électronique a réussi à enregistrer, sur disque en matière plastique souple, des signaux de télévision dont la fréquence s'étend jusqu'à plusieurs millions de hertz (périodes par seconde). A cette fin, le disque tourne à la vitesse de 1 500 rotations par minute, et — chose à peine croyable — comporte 120 à 140 sillons par millimètre de rayon ; c'est une densité d'une douzaine de fois supérieure à celle de nos microsillons.

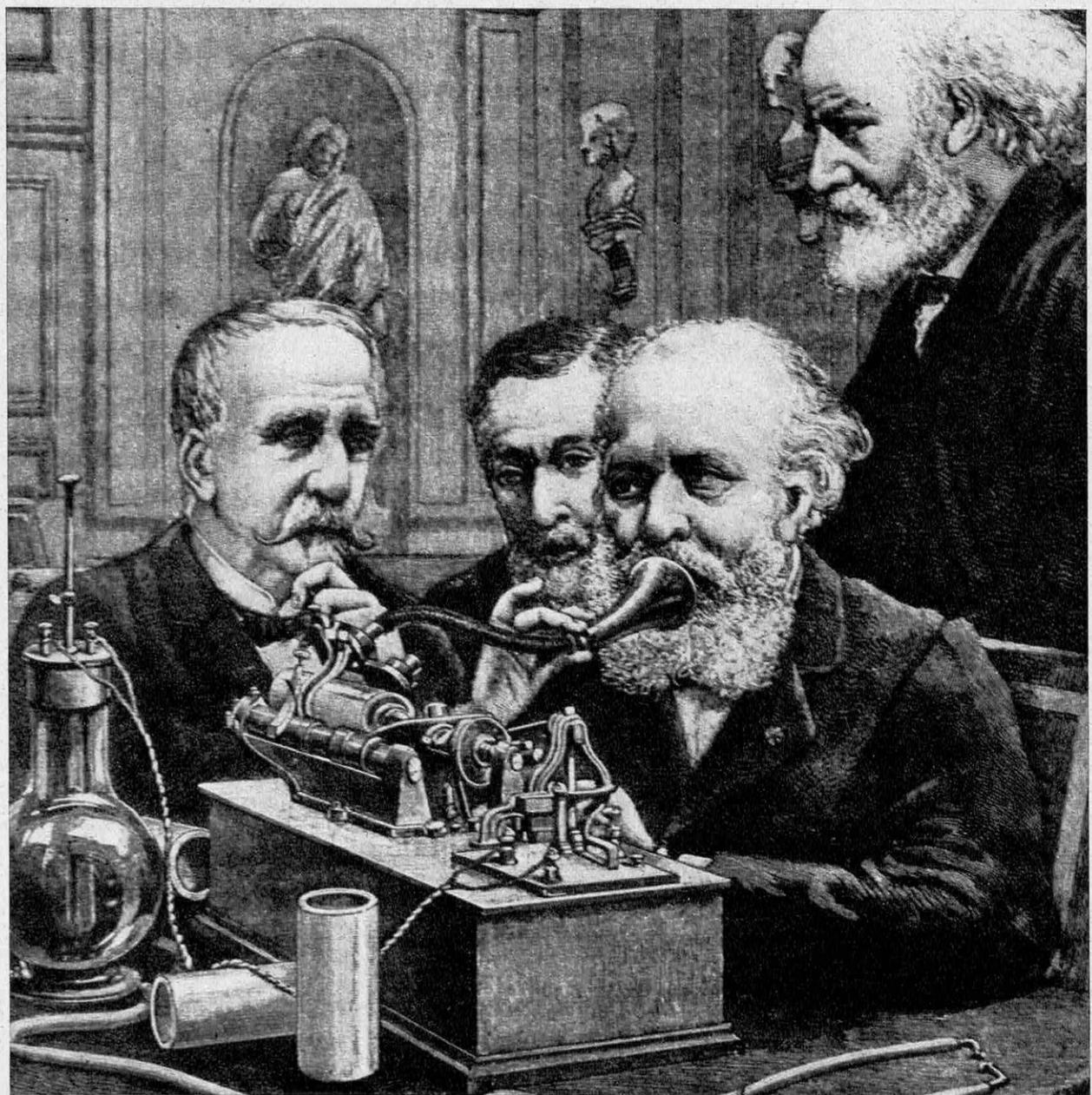
Enregistrement magnétique du son

Du moment que le microphone permet de traduire les sons par des courants électriques variables, eux-mêmes capables d'engendrer des champs magnétiques variables, il est naturel de songer à mettre à profit la rémanence des matériaux magnétiques pour la mise en conserve des sons.

Le premier qui a émis cette idée semble être le Français Paul Janet qui, en 1887, proposa de procéder à « l'aimantation transversale d'un conducteur ».



Construit par Chichester et Tainter en 1888, le Graphophone fonctionnait sur le principe des machines à coudre.



« Charles Gounod s'approche à son tour et chante dans le pavillon: Il pleut, il pleut, bergère... ». Ce passage est extrait du procès-

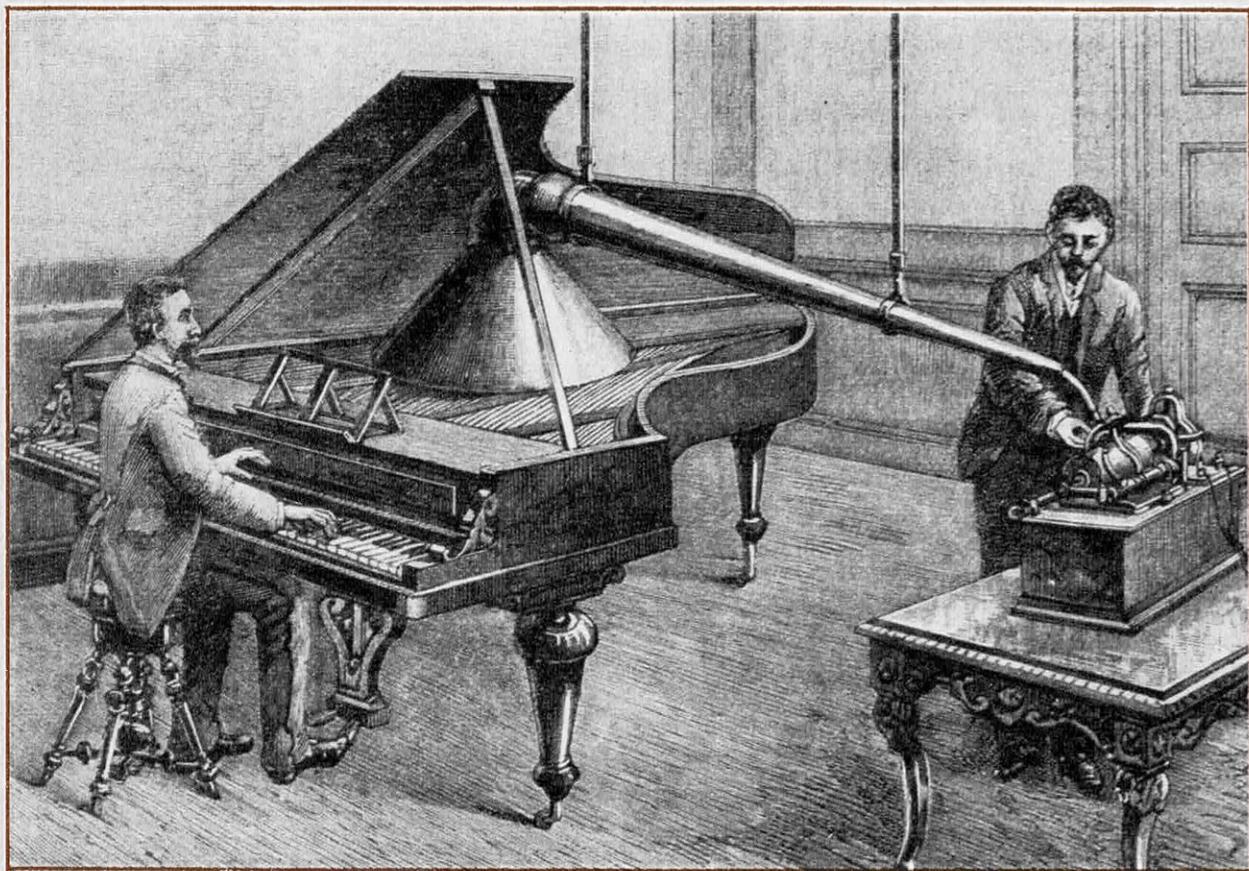
verbal officiel d'une séance de l'Académie des Beaux-Arts. Ce jour-là, 27 avril 1889, y était présenté le phonographe Edison à pile.

Cependant, le mérite des premières réalisations appartient à l'inventeur danois Waldemar Poulsen. Né en 1869, il fit tout d'abord des études de médecine, mais bien vite s'orienta vers l'électrotechnique. Même dans le domaine de la radio, il a été l'un des premiers à concevoir un moyen original de production des oscillations entretenues de haute fréquence, par un « arc chantant » réalisé à l'aide d'un arc voltaïque fonctionnant dans une atmosphère de vapeurs d'alcool.

Le 10 novembre 1898, Poulsen déposa son premier brevet d'enregistreur magnétique sur

fil d'acier. Et il en présenta un modèle à l'Exposition Universelle de Paris, en 1900, ce qui lui valut le Grand Prix.

Son appareil se composait d'un cylindre rotatif, analogue à celui des phonographes d'Edison, entouré d'un long fil d'acier disposé en spirale. Un électro-aimant, parcouru par les courants microphoniques, était disposé de telle sorte que le fil d'acier défilait devant son entrefer et se trouvait ainsi aimanté par les champs magnétiques variables. Pour reproduire le son, il suffisait d'animer le cylindre du même mouvement et de brancher un cas-



que à la sortie de l'électro-aimant. Les courants induits par les champs magnétiques permettaient de reproduire les sons enregistrés. Trois ans plus tard, Poulsen fonda, aux Etats-Unis, avec son ami Pedersen, une entreprise de fabrication de ces enregistreurs, la *Telegraphon Company*. En 1908, un de ses appareils a permis d'enregistrer 14 heures de conférences prononcées au Congrès International Technique de Copenhague, sur 2 500 km de fil d'acier enroulé en bobines et défilant dans l'entrefer à la vitesse de 2,85 m par seconde. Cependant, les appareils servant à enregistrer et à reproduire les sons sans amplifier les signaux électriques étaient très imparfaits. Et durant des années, en dépit des premières réussites de Poulsen, on n'en parla plus.

Au début des années 20, on reprit l'étude du problème en faisant appel aux amplificateurs à triodes. Le chercheur géorgien Nasarichwily émit l'idée d'utiliser comme support d'enregistrement un ruban souple, recouvert de poudre de fer, idée déjà précédemment formulée par l'Anglais Oberlin Smith. Mais le chercheur russe alla plus loin : il proposa d'enregistrer le long des rails de chemin de fer des instructions pour les conducteurs des trains. Et il expérimenta ce procédé sur les chemins de fer du Caucase en aimantant convenablement les rails.

Vers 1890, les premiers enregistrements musicaux exécutés à l'aide du phonographe perfectionné d'Edison utilisaient de longs cornets acoustiques.

Enregistrement des vibrations sonores sur un disque animé d'un double mouvement, circulaire et rectiligne. Tel était le principe du Grammophon de Berliner. Le disque était en zinc, recouvert d'une pellicule de cire. Après inscription dans la cire, le disque était traité à l'acide chromique, qui mordait le métal au niveau du sillon.



Les premières bandes magnétiques ont été réalisées en 1927, à Dresde, par Fritz Pfleumer. La grande firme allemande AEG, vivement intéressée par la question, incita l'entreprise d'industrie chimique *I.G. Farben* à entreprendre la fabrication de ces bandes.

Ainsi, en 1935, à l'Exposition allemande de Radio, à Berlin, a-t-on pu voir et entendre un magnétophone dont le ruban défilait à la vitesse de 1 m/s et qui était capable de reproduire des sons de fréquences comprises entre 50 et 6 000 Hz.

Le rapide progrès du magnétophone

La vitesse de défilement a pu être de plus en plus réduite sans que la gamme de fréquences du son enregistré en soit rétrécie. En effet, ce qui compte en la matière, c'est, d'une part, la finesse des grains de fer servant de porteurs d'aimantation et, d'autre part, la largeur de l'entrefer des électro-aimants employés pour l'enregistrement et la reproduction. (Notons que très souvent la même « tête magnétique » est capable d'accomplir les deux fonctions.)

Ainsi, de nos jours, dispose-t-on de magnétophones avec des vitesses de 39 ou de 19 ou de 9,5 ou de 4,75 cm/s. Il existe même des dictaphones dont le ruban se déplace à la vitesse (si l'on peut dire !) de 2,4 cm/s, ce qui suffit pour reproduire correctement la bande de fréquences de la parole.

Le plus souvent, on utilise une bande magnétique de 6,33 mm et, depuis 1950, l'on peut y inscrire deux pistes. Plus récemment, avec l'avènement de la stéréophonie, la même bande peut enregistrer 4 pistes.

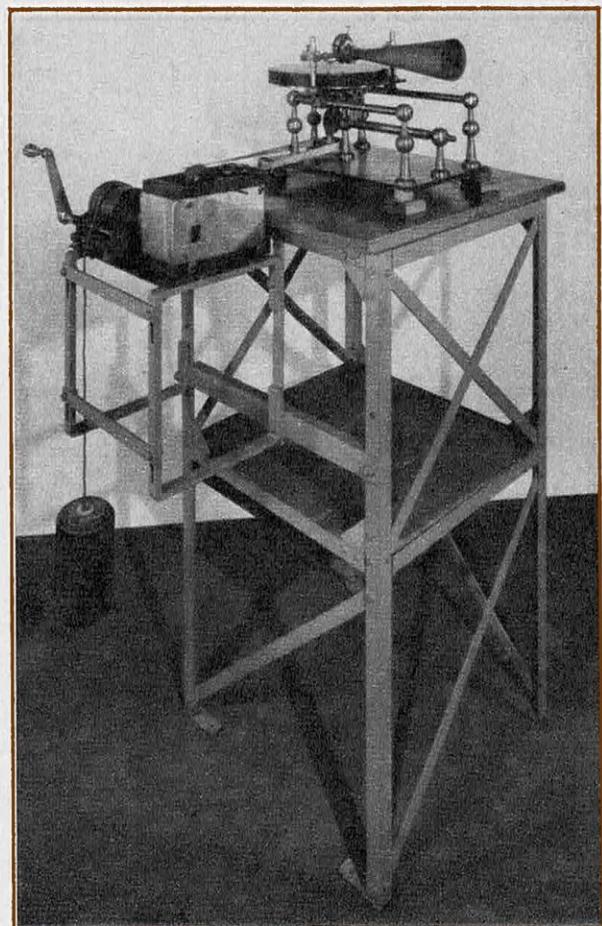
En plus du courant microphonique amplifié, la tête d'enregistrement est parcourue par un courant *supersonique* (de 30 à 50 kilohertz) servant à assurer une pré-magnétisation en agitant les molécules de fer. Ce procédé a été préconisé, dès 1927, par les Anglais Carlson et Carpenter.

Ce même courant supersonique, aussi bien, d'ailleurs, qu'un courant continu (idée émise par Poulsen en 1907), sert à effacer l'enregistrement.

Notons, enfin, qu'en plus de la bande normale, se répand actuellement l'usage des bandes plus étroites, placées dans des cassettes. Il existe aussi des dictaphones où le support magnétique se présente sous la forme d'un mince disque ou d'une feuille, ce qui facilite leur envoi par la poste.

Du film muet au film « parlant »

Jusqu'en 1930, le cinéma projetait des films muets, en les faisant accompagner de la mu-

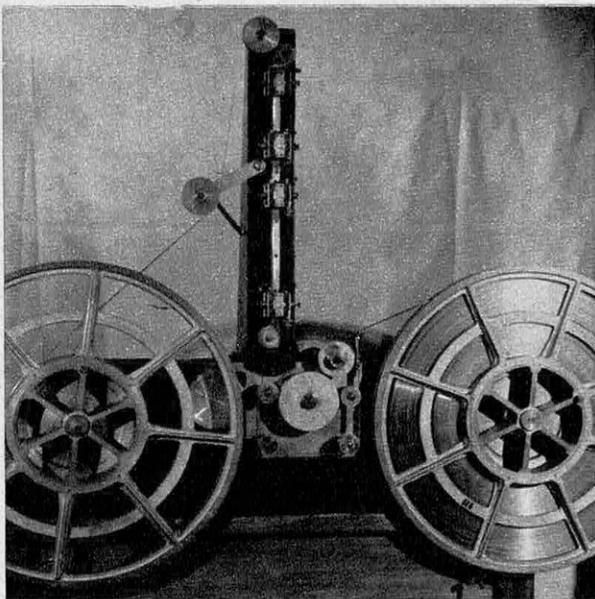


Destiné à graver les cires originales servant à la fabrication des matrices de pressage pour disques commerciaux, la machine de Natale (1903) resta en usage jusqu'à l'avènement de la gravure électromagnétique, vers 1925.

sique d'un pianiste ou d'un orchestre présent dans la salle. L'avènement du film sonore que, à l'époque, on qualifiait surtout de « parlant », date donc d'une quarantaine d'années.

Et pourtant, dès le début de notre siècle, des tentatives ont été faites pour que les images vivantes soient en même temps sonores. Le grand pionnier français du cinéma Léon Gaumont était hanté par cette idée dès 1900. Il parvint à établir une liaison mécanique entre une caméra de projection de films et un phonographe. Le résultat ne fut pas très satisfaisant en raison des vibrations que le projecteur communiquait au récepteur de son. Gaumont y remédia en substituant à la liaison mécanique une liaison électrique. Et c'est ainsi que, le 12 septembre 1902, il put faire la démonstration d'un film sonore devant la Société Française de Photographie.

Par la suite, il améliora la qualité de la reproduction en employant un ingénieux procédé d'amplification du son à l'aide d'air



Première application industrielle de l'enregistrement magnétique, la machine Marconi-Stille fut utilisée dans les stations de radio jusqu'en 1943. Elle utilisait un ruban d'acier de 3 mm de large. Les problèmes de poids firent préférer le fil d'acier, malheureusement fragile, avant l'apparition du support plastique des bandes magnétiques actuelles.

comprimé. Et, le 27 décembre 1910, il présenta devant l'Académie des Sciences le « portrait parlant » du professeur d'Arsonval reproduit par son « chronophone ».

La lumière inscrit le son

Cependant, le véritable avènement du film sonore date seulement de quarante ans et a été déclenché par l'emploi de l'enregistrement photographique du son sur le film même, en marge des images qu'il porte.

L'idée d'un tel procédé date du début de notre siècle, au même titre que celle de l'emploi associé du cinéma et du phono. C'est un chercheur anglais, W. Duddel, qui, en 1900, proposa d'enregistrer les sons sur des surfaces photosensibles à l'aide d'un arc dont la luminosité varie sous l'action des courants microphoniques.

Peu d'années après, un Français établi aux Etats-Unis, Eugène Lauste, proposa d'appliquer au cinéma l'enregistrement lumineux du son. En 1908, il réalisa divers modèles de « valves lumineuses » permettant de moduler un rayon lumineux par des signaux électriques.

Une valve assurant les mêmes fonctions devait

par la suite être conçue par Lee de Forest, celui qui, en 1906, inventa le premier tube électronique.

Peu à peu, le principe de l'enregistrement photographique se répandit parmi de nombreux chercheurs de divers pays. C'est ainsi que l'inventeur allemand Hans Vogt, dont on a fêté, le 25 septembre dernier, le 80^e anniversaire, parvint, il y a un demi-siècle, à réaliser une lampe à luminescence à gaz rare dont la lueur varie en intensité sous l'influence de signaux électriques. En février 1921, il a pu ainsi réaliser un premier film sonore. En septembre 1922, dans le cinéma berlinois « Alhambra », il en projeta un autre devant plus de mille spectateurs.

Le principe de l'enregistrement photographique du son sur le film même a donné lieu à des réalisations très variées. On peut les diviser en deux grandes catégories :

- 1) Inscriptions à opacité constante et surface variable ;
- 2) Inscriptions à surface constante et opacité variable.

Les premières sont obtenues en projetant sur le film un rayon de lumière dont la section subit des rétrécissements variables en passant à travers un diaphragme dont l'ouverture varie sous l'action des signaux microphoniques.

Pour obtenir des enregistrements à opacité variable, on doit employer soit des sources de lumière de brillance variant sous l'action des signaux électriques, soit des rayons lumineux passant à travers un filtre dont varie la transparence. Ce dernier effet peut être notamment obtenu en utilisant une cellule de Kerr où l'angle de polarisation de la lumière varie sous l'action d'un champ électrique.

Quant à la reproduction de son inscrit sur film par l'une des méthodes décrites ci-dessus, elle est obtenue en projetant un rayon lumineux sur une cellule photo-électrique à travers la partie marginale du film portant l'enregistrement du son.

Ajoutons que l'on peut également employer pour la sonorisation des films la méthode d'enregistrement magnétique. C'est ce que l'on fait notamment pour la « post-synchronisation » des films d'amateurs, en recouvrant leur marge d'une couche de fine poudre de fer.

Mécanique, magnétisme, lumière... Quel que soit le procédé employé, on parvient, de nos jours, à enregistrer et à reproduire les sons avec une fidélité parfaite.

La musique est ainsi largement répandue dans toutes les populations du monde. Et les voix des grands hommes leur survivent dans l'éternité. Le son et l'image ont parfaitement conquis les quatre dimensions de l'espace-temps pour le plus grand bien de l'humanité.

E. AISBERG

**HAUTE
FIDELITE
70**

LA HAUTE FIDÉLITÉ

Le terme « haute fidélité » est aujourd'hui appliqué à des matériels de reproduction sonore extrêmement divers. Il devient de plus en plus difficile de s'entendre sur sa signification concrète. Le problème de la haute fidélité est en lui-même fort complexe. Une installation haute fidélité prétend restituer des sons conformes aux sons originaux produits, par exemple, par un instrument de musique. La complexité du message musical (voir nos articles en tête de ce numéro), son inévitable altération à travers les opérations successives de prise de son, d'enregistrement, de transmission, de lecture, limite les prétentions des tenants de la haute fidélité. Les matériels proposés par les constructeurs s'éloigneront toujours, mais de façon variable, de la solution idéale. Des appareils spécialisés permettent de comparer de façon précise les ondes sonores diffusées par le haut-parleur avec celles qui, à l'autre extrémité de la chaîne, ont frappé le micro. On peut alors qualifier de façon objective une installation de reproduction sonore. Mais cette évaluation fondée sur des grandeurs physiques n'est pas la plus importante; ce qui compte, c'est l'appréciation subjective de l'auditeur. La réalité du message musical, la « fidélité » de sa transmission, sont d'ordre psychologique et, en l'état actuel de nos connaissances, incomplètement réductibles à des mesures physiques. Surtout, chacun sait que l'audition d'une œuvre musicale à l'intérieur même de la salle de concert

laisse des impressions différentes d'un auditeur à l'autre, si ce n'est chez le même auditeur, en fonction de son humeur, de sa disponibilité du moment. Le problème de la fidélité d'une chaîne de reproduction sonore est donc largement affaire d'appréciation individuelle.

A la limite des domaines objectif et subjectif interviennent aussi les caractéristiques du local d'écoute ou la disposition des haut-parleurs adoptée par l'amateur. De ces données, essentiellement variables, le constructeur ne peut évidemment tenir compte. Elles ont pourtant une influence souvent déterminante sur la qualité de la reproduction sonore.

Les données objectives sur le fonctionnement d'une chaîne sonore sont le seul terrain solide pouvant servir de base à une comparaison — même incomplète — entre divers matériels. Malheureusement, ces caractéristiques sont souvent mal comprises, parce que trop imprécises.

Le critère principal retenu est la puissance électrique que peut fournir l'amplificateur. Cette puissance électrique n'a qu'un lointain rapport avec l'impression de niveau sonore. Le même signal appliqué à un casque d'écoute ou à des enceintes acoustiques disposées dans une grande pièce pourra donner des niveaux sonores très différents. Il n'existe pas, d'ailleurs, de parallélisme entre le signal de sortie de l'amplificateur et la sensation sonore. Si le niveau obtenu à l'aide de l'instal-

EXISTE-T-ELLE ?

lation est de 100 dB (ce qui est très élevé), doubler la puissance conduira à un niveau de 103 dB, soit 3 % seulement d'augmentation. Pour un niveau de 20 dB, doubler la puissance donnera 15 % d'augmentation de la sensation auditive. Les taux de distorsion annoncés par les constructeurs appellent aussi quelques remarques. Les taux infinitésimaux souvent affichés sont de toutes façons inaudibles. La distorsion harmonique ne devient perceptible, pour une oreille exercée, qu'à partir de 1 %. Encore n'est-elle généralement indiquée que pour l'amplificateur (qui n'en produit que très peu) et non pour la cellule de lecture ou pour les haut-parleurs, qui en produisent bien davantage.

La distorsion d'intermodulation, la plus grave puisqu'elle introduit des fréquences indésirables, n'est jamais mentionnée. Il est vrai qu'à une distorsion harmonique faible correspond souvent une intermodulation peu gênante.

Ce grossissement, souvent maladroit, de l'importance des définitions techniques est un aveu d'impuissance devant la difficulté de comparer des matériels essentiellement soumis à appréciation subjective. Il faut tout de même tenter d'établir une classification.

Deux éléments entrent en jeu pour faciliter le choix du futur acheteur. Tout d'abord, l'expérience a prouvé qu'un auditoire appelé à choisir entre deux installations tombera d'accord, dans un grand nombre de cas, sur le

classement à établir. La qualité de la reproduction sonore est reconnaissable comme telle, même si on ne sait pas dire très bien pourquoi, ni comment, on choisit. Par ailleurs, les matériels produits dans le monde, très divers il y a quelques années, tendent à se rapprocher d'une sorte d'étalement universel de qualité reconnu par les auditeurs.

Après avoir écarté le matériel techniquement insuffisant, l'amateur a le choix entre deux méthodes. La première consiste à écouter plusieurs chaînes, solution qu'il doit préférer si son goût personnel tend à s'écartier des « canons ». La seconde est de faire confiance aux critiques spécialisés dans la mesure où ils parviennent à un choix unanime.

Quoi qu'il en soit, pour faciliter la tâche des uns et des autres, une normalisation des conditions d'écoute s'impose. Il faudrait en particulier définir un local type, dont le temps de réverbération soit précisé, ainsi que la disposition des éléments de la chaîne à l'intérieur du local. Le vocabulaire utilisé pour caractériser les sonorités reproduites doit être aussi l'objet d'une normalisation.

Dans l'état actuel des choses, de telles tentatives ont surtout lieu outre-Rhin. En France, la situation laisse encore beaucoup à désirer, les efforts demeurant insuffisants ou trop dispersés.

Yves MARZIO

LES TABLES DE LECTURE

Descendantes directes du phonographe des années 30, qui était équipé d'un moteur à ressort, les modernes tables de lecture n'ont certes rien de comparable avec cet instrument qui, pourtant, eut son heure de gloire.

A l'époque, il est vrai, les seuls disques existants étaient en cire et très éloignés, sur le plan de la qualité, des actuels microsillons stéréophoniques. Et les mélomanes se montraient assez peu exigeants en matière de fidélité sonore et ne se souciaient guère de la précision et de la régularité de la vitesse d'entraînement du plateau tourne-disques, qui tournait plus ou moins bien à 78 tr/mn.

A la veille de la guerre, les choses avaient pourtant sensiblement progressé, nombre d'amateurs étant pourvus de tourne-disques à moteur électrique et d'installations préfigurant les actuelles chaînes à haute fidélité. Le pas décisif ne fut toutefois franchi qu'à l'avènement du microsillon, dont les premiers exemplaires virent le jour aux U.S.A. en 1947. Dès lors, les progrès furent très rapides. En même temps que le pas des sillons se resserrait, la vitesse des disques diminuait. De 78 tr/mn, elle passait à 45 tr/mn, puis à 33 1/3 tr/mn, et même à 16 tr/mn pour certains disques de spectacle, assez peu répandus il est vrai.

La technique n'est cependant pas stabilisée. En effet, elle a régulièrement progressé au cours des années écoulées, augmentant le fossé qui sépare le tourne-disques monté sur un électrophone de la table de lecture équipant une chaîne haute fidélité.

Dans un cas comme dans l'autre, il est vrai, un changement de vitesses s'avère indispensable pour passer d'un type de disque à un autre. Mais, s'il y a peu de temps encore, les tables de lecture, à l'instar des tourne-disques, étaient, sans exception, équipées pour les quatre vitesses normalisées, actuellement un nombre sans cesse grandissant de constructeurs ne retiennent plus que les deux vitesses de base : 33 1/3 tr/mn et 45 tr/mn.

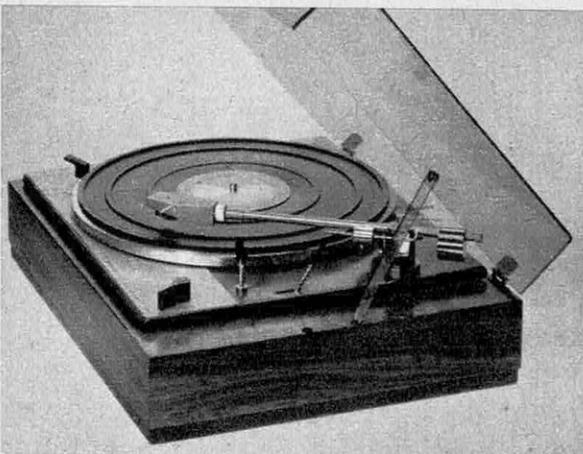


Table Dual 1209.



Bang et Olufsen Beogram 1 800.



Table Braun PS 420.



Platine Barthe Rotofluid.

LES TABLES DE LECTURE

MARQUE Importateur	Type	Vitesses tr/mn	Moteur	Entrainement	Masses du plateau kg	Diamètre du plateau cm	Pleurage Ronronnement	Longueur du bras mm	Réglage de la force d'appui	Lève-bras
ACOUSTICAL	3100/AB	33 ¹ / ₃ , 45	synchrone	courroie	1,6	30	0,07 % — 45 dB	230	par ressort	à viscosité
BARTHE	Rotofluid	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₃ , 45, 78	synchrone	galet	3,5	30	0,05 %	315	par contre-poids	oui
B et O Vibrasson	Beogram 1000	33 ¹ / ₃ , 45, 78	asynchrone	courroie	1,6	30	0,2 % — 35 dB	265	ressort	pneumatique
B et O Vibrasson	Beogram 1800	33 ¹ / ₃ , 45	asynchrone	courroie	1,6	30	0,2 % — 35 dB	265	ressort	pneumatique
BRAUN Major Electronic	PS 420	16, 33 ¹ / ₃ , 45, 78	asynchrone	galet	2,8	26	0,12 % — 60 dB		ressort	hydraulique
BRAUN Major Electronic	PS 500	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₃ , 45, 78	asynchrone	galet	3	30	0,1 % — 65 dB		ressort	hydraulique
BRAUN Major Electronic	PS 600 changeur automatique	33 ¹ / ₃ , 45, 78	à courant continu commande électronique	galet	2,5	30	0,07 % — 65 dB	220	ressort	à viscosité
BRAUN Major Electronic	PS 1000	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₃ , 45, 78	asynchrone	courroie	3	30	0,1 %		ressort	hydraulique
DUAL Carobronze	1209 changeur automatique	33 ¹ / ₃ , 45, 78	synchrone	galet	1,9	27	0,1 %	280	ressort	à viscosité
DUAL Carobronze	1219 changeur automatique	33 ¹ / ₃ , 45, 78	synchrone	galet	3,1	30	0,1 %	300	ressort	à viscosité
ELAC Tekimex	Miracord 630 changeur automatique	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₃ , 45, 78	asynchrone	galet	2,3	30	0,07 % — 52 dB	198	ressort	à viscosité
ELAC Tekimex	Miracord 50 H	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₃ , 45, 78	synchrone	galet	2,3	30	0,07 % — 60 dB	204	ressort	hydraulique
EMPIRE	598	33 ¹ / ₃ , 45, 78	synchrone	courroie		30	0,1 % — 90 dB		contrepoids	hydraulique
ERA	MK 4	33 ¹ / ₃ , 45	synchrone	courroie	1,7	30	0,1 % — 70 dB		contrepoids	pneumatique
ERA	Eramatic	33 ¹ / ₃ , 45	synchrone	courroie	1,7	30	0,1 %		contrepoids	oui
ERA	MK 35	33 ¹ / ₃ , 45	synchrone		1,7	30	0,1 % — 70 dB		contrepoids	pneumatique
GARRARD Film et Radio	SL 95	33 ¹ / ₃ , 45, 78	asynchrone	galet	1,6	29			contrepoids	à viscosité
GARRARD Film et Radio	401	33 ¹ / ₃ , 45, 78	asynchrone	galet	2,7	30	0,05 %			
GARRARD Film et Radio	SP 25	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₃ , 45, 78	asynchrone	galet	1,6	27			ressort	à viscosité

MARQUE Importateur	Type	Vitesses tr/mn	Moteur	Entrainement	Masse du plateau kg	Diamètre du plateau cm	Pleurage Ronronnement	Longueur du bras mm	Réglage de la force d'appui	Lève-bras
LENCO Universal Audio	L 75	33 ¹ / ₂ , 45, 78	asynchrone	galet		30	0,1 %		contrepoids	hydraulique
ORTOFON Irid	bras de lecture RS 212							228	contrepoids	hydraulique
PERPETUUM EBNER Cami	2010	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₂ , 45, 78	asynchrone	galet	1,2	26	1 %	260		oui
PERPETUUM EBNER Cami	2014, 2016, 2018	33 ¹ / ₂ , 45, 78	asynchrone	galet	1,8	26	0,5 %	275		oui
PERPETUUM EBNER Cami	2020	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₂ , 45, 78	asynchrone	galet	3,2	29	0,1 %	285		oui
PHILIPS	GA 202 (1)	33 ¹ / ₂ , 45, 78	continu commande électronique				0,13 % — 60 dB		contrepoids	hydraulique
PHILIPS	GA 317 (2)	33 ¹ / ₂ , 45	synchrone	courroie		26	0,2 % — 55 dB		contrepoids	hydraulique
PIONEER Setton	PL 31 D (3)	33 ¹ / ₂ , 45	synchrone à hystérésis	courroie	1,3	30	0,1 %		contrepoids	hydraulique
PIONEER Setton	PL 41 A	33 ¹ / ₂ , 45	synchrone à hystérésis	courroie	2,6	30	0,08 % — 50 dB		contrepoids	hydraulique
SANSUI Hencot	SR 20 20	33 ¹ / ₂ , 45	synchrone	courroie	1,1	30	0,1 % — 45 dB		contrepoids	à viscosité
SANSUI Hencot	SR 30 30	33 ¹ / ₂ , 45	synchrone à hystérésis	courroie			0,09 % — 45 dB		contrepoids	à viscosité
SANSUI Hencot	SR 40 40	33 ¹ / ₂ , 45	synchrone	courroie	3	31	0,08 % — 46 dB		contrepoids	à viscosité
SCIENTELEC	Vulcain 2000	33 ¹ / ₂ , 45	2 moteurs synchrones	courroie	3,2	30	0,1 %	260	contrepoids	électrique
SME Film et Radio	bras de lecture 3012							300	contrepoids	à viscosité
SME Film et Radio	bras de lecture 3009							230	contrepoids	à viscosité
SONY Tranchant	TTS 3000	33 ¹ / ₂ , 45	à courant continu commande électronique		1,5	30	0,05 %		contrepoids	hydraulique
TELEFUNKEN	W 250	16, 33 ¹ / ₂ , 45, 78	asynchrone	galet	3,5	29	0,1 %			oui
THORENS Diedrichs	TD 125	16 ² / ₃ , 33 ¹ / ₂ , 45	synchrone commande électronique	courroie	3,2	30	0,08 % — 68 dB	230		à viscosité
THORENS Diedrichs	TD 150	33 ¹ / ₂ , 45	synchrone	courroie	3,2	30	0,09 % — 65 dB	230	contrepoids	à viscosité

(1) vendue avec cellule GP 411/412

(2) vendue avec cellule GP 233

(3) vendue avec cellule PC 35



Platine Empire 598.



Table de lecture Eramatic.



Vulcain 2 000 Scientelc.



Sony PS 3000, platine stéréo.



Platine Garrard SP 25.

Les transmissions

Habituellement, le changement de vitesses utilisé fait appel à un démultiplicateur constitué par une poulie à étages, disposée entre l'arbre du moteur d'entraînement — dont la vitesse est de l'ordre de 1 500 tr/mn — et le plateau tourne-disques proprement dit, dont la mise en mouvement est assurée par une roue caoutchoutée commandée par un système de cannes et se déplaçant en regard de la poulie.

Bien que fonctionnant de façon satisfaisante, ce système présente quelques inconvénients qui ont amené les constructeurs à l'améliorer, afin de l'adapter aux exigences des tables de lecture.

Diverses solutions ont vu le jour, qui, toutes, tendent à filtrer les inévitables vibrations mécaniques ayant pour origine le moteur d'entraînement et qui sont transmises au plateau tourne-disques par l'ensemble démultiplicateur, et de là au phonocapteur, puis aux amplificateurs de l'installation de reproduction sonore.

Dans le cas d'un électrophone, ces vibrations à basse fréquence (que l'on désigne du nom de *rumble*) sont généralement peu gênantes en raison de la réponse déficiente de l'ensemble aux fréquences basses. Il n'en va pas de même lorsque l'on a affaire à une installation haute fidélité, car celle-ci est capable de reproduire les sons les plus graves du spectre audible, dont ceux en provenance de la table de lecture.

Pour les filtrer, on a été amené à utiliser des courroies de transmission élastiques, associées au système démultiplicateur. Compte tenu des excellents résultats obtenus par ce procédé, certains constructeurs en ont profité pour faire un pas de plus vers la simplicité. C'est ainsi qu'une nouvelle génération de tables de lecture a vu le jour.

Caractérisées par l'abandon du classique changement de vitesses mettant en œuvre une roue caoutchoutée intermédiaire, ces tables de lec-

LES CELLULES DE LECTURE

MARQUE Importateur	Type	Principe	Force d'appui	Elasticité latérale	Niveau de sortie pour 1 cm/s	Diaphonie	Courbe de réponse	Diamant	Dimensions de la pointe lectrice
ADC Film et Radio	ADC 25	aimant mobile	0,5 à 1,5 g	50×10^{-6} cm/dyne	0,75 mV	30 dB	10 Hz — 24 kHz ± 2 dB	elliptique ou conique	7 × 18 µm ou 15 µm
ADC Film et Radio	ADC 10 E	aimant mobile	0,5 à 1,5 g	35×10^{-6} cm/dyne	0,75 mV	30 dB	10 Hz — 20 kHz ± 2 dB	elliptique	7 × 18 µm
ADC Film et Radio	ADC 550	aimant mobile	0,75 à 1,5 g	35×10^{-6} cm/dyne	1 mV	25 dB	10 Hz — 20 kHz	elliptique	7 × 18 µm
ADC Film et Radio	ADC 220 X	aimant mobile		20×10^{-6} cm/dyne	1,5 mV	20 dB	10 Hz — 20 kHz ± 3 dB	elliptique ou conique	7 × 18 µm ou 17 µm
B et O Vibrasson	SP 8	magnétique	1,5 g	15×10^{-6} cm/dyne	1,2 mV	28 dB	20 Hz — 20 kHz	elliptique	5 × 17 µm
B et O Vibrasson	SP 12	magnétique	1 à 2 g	25×10^{-6} cm/dyne	1 mV	25 dB	15 Hz — 25 kHz	elliptique	5 × 17 µm
ELAC Tekimex	STS 444 E	magnétique	0,75 à 1,5 g	33×10^{-6} cm/dyne	1 mV	26 dB	10 Hz — 24 kHz	elliptique	6 × 20 µm
ELAC Tekimex	STS 344 E	magnétique	1 à 2 g	25×10^{-6} cm/dyne	1 mV	24 dB	20 Hz — 22 kHz	elliptique	6 × 20 µm
ELAC Tekimex	STS 244	magnétique	2 à 3 g	18×10^{-6} cm/dyne	1,5 mV	22 dB	20 Hz — 20 kHz	conique	17 µm
EMPIRE	999	magnétique	1 g	35×10^{-6} cm/dyne	1 mV	35 dB	20 Hz — 20 kHz ± 2 dB	elliptique	5 × 23 µm
EMPIRE	1000 Z E	magnétique	1 g		1,5 mV	35 dB	20 Hz — 20 kHz ± 1 dB		
ORTOFON Irad	SL 15	dynamique	0,7 à 1,5 g	25×10^{-6} cm/dyne	0,32 mV	30 dB	10 Hz — 40 kHz	elliptique	8 × 18 µm
ORTOFON Irad	MF 15	magnéto-dynamique	2 g		0,9 mV	30 dB	20 Hz — 20 kHz	elliptique	8 × 18 µm
PHILIPS	GP 233 (1)	céramique	1,5 à 3 g	10×10^{-6} cm/dyne	2 mV	20 dB	20 Hz — 15 kHz ± 3 dB	conique	15 µm
PHILIPS	GP 411/412 (2)	magnéto-dynamique	1 à 4 g	15×10^{-6} cm/dyne	1 mV	20 dB	20 Hz — 20 kHz ± 2,5 dB	conique ou elliptique	15 µm ou 5 × 23 µm
PICKERING Hifox	XV 15 750 E	magnétique	0,5 à 1 g		0,7 mV	35 dB	10 Hz — 25 kHz	elliptique	5 × 23 µm
PICKERING Hifox	XV 15 AME	magnétique	0,75 à 1,5 g		1 mV	35 dB	10 Hz — 30 kHz	elliptique	5 × 23 µm
PICKERING Hifox	V 15 AME 3	magnétique	0,75 à 1,5 g		1 mV	32 dB	20 Hz — 25 kHz	elliptique	5 × 23 µm
PIONEER Setton	PC 35 (3)	magnétique	2 à 3 g	10×10^{-6} cm/dyne	0,75 mV	25 dB	10 Hz — 25 kHz	conique	15 µm
SCIENTELEC	TS 1	à jauge de contrainte	3 g	15×10^{-6} cm/dyne	10 mV	22 dB	10 Hz — 50 kHz	conique	13 µm
SCIENTELEC	TS 2	à jauge de contrainte	2 g	25×10^{-6} cm/dyne	10 mV	25 dB	10 Hz — 50 kHz	elliptique	5 × 23 µm
SHURE Cineco	V 15	magnétique	0,75 à 1,5 g		0,7 mV	25 dB	20 Hz — 20 kHz ± 1 dB	elliptique	5 × 18 µm
SHURE Cineco	M 75 SE	magnétique	0,75 à 1,5 g		1 mV	25 dB	20 Hz — 20 kHz	elliptique	5 × 18 µm
SHURE Cineco	M 55 EE	magnétique	0,75 à 2 g	20×10^{-6} cm/dyne	1,2 mV	25 dB	20 Hz — 20 kHz	elliptique	5 × 23 µm
SHURE Cineco	M 44 E	magnétique	0,75 à 4 g	15×10^{-6} cm/dyne	2 mV	25 dB	20 Hz — 20 kHz	elliptique	5 × 23 µm

(1) vendue avec table GA 202

(2) vendue avec table GA 317

(3) vendue avec tables PL 31 D et PL 41 A



Gros plan sur une cellule de lecture magnétique (Empire 999).

ture, qui ont aujourd'hui très largement fait école, n'utilisent plus qu'une poulie à gradins — montée en bout d'arbre d'un moteur à vitesse constante — dont les différents diamètres permettent d'obtenir les vitesses souhaitées, ou mieux, une poulie à diamètre fixe, associée à un moteur à vitesse variable.

Cette dernière solution, qui constitue le *nec plus ultra* de la technique, fait toutefois intervenir l'électronique pour commander la vitesse de rotation du moteur d'entraînement, dont le mouvement est toujours transmis au plateau tourne-disques par l'intermédiaire d'un démultiplicateur à courroie.

Changeurs et tables automatiques

Tout autre est le problème posé par les changeurs automatiques, que l'on pouvait concevoir à l'époque des disques 78 tr/mn, mais qui ne conviennent guère à une écoute haute fidélité, malgré les nombreux progrès réalisés. Indépendamment du fait que ces appareils malmènent quelque peu les disques qui leur sont confiés (ceux-ci étant empilés les uns sur les autres et tombant d'une certaine hauteur sur le plateau, exception faite de quelques rares modèles extrêmement complexes), les changeurs de disques présentent deux défauts qui



Table Philips, avec cellule GA 317.

les rendent improches à une écoute Hi-Fi : d'une part, la hauteur variable d'empilage des disques qui se traduit par des distorsions de lecture ; d'autre part les glissements inévitables entre disques qui donnent lieu assez souvent à des variations de la hauteur des sons enregistrés, tout comme si la vitesse de rotation n'était pas rigoureusement constante.

Ces remarques ne s'appliquent pas aux tables de lecture automatiques, qui sont conçues de façon à libérer l'usager de toute intervention manuelle (départ, pose, relevage, retour du « bras » et arrêt du moteur) et utilisent un mécanisme, fort complexe, que l'on programme ou non — selon le degré d'automatisme — en fonction du diamètre des disques à jouer.

Les suspensions

Les mécanismes des tables de lecture ne sont pas les seuls à avoir connu une évolution intéressante. Les systèmes de suspension ont, eux aussi, sensiblement progressé.

A l'origine, tant que les disques étaient monophoniques, que les phonocapteurs travaillaient avec des forces d'appui élevées et que les systèmes amplificateurs et reproducteurs présentaient quelque carence dans le registre grave, on ne s'inquiétait guère des vibrations parasites, dues au mécanisme d'entraînement ou ayant une origine externe.

Cette situation changea rapidement surtout avec l'avènement du disque stéréophonique. En effet, dès cet instant, les phonocapteurs utilisés cessèrent d'être sensibles aux seules vibrations horizontales, les techniques du disque stéréophonique obligeant à tenir compte de la composante de gravure verticale.

Le problème numéro un était, évidemment, l'élimination des vibrations mécaniques du moteur d'entraînement, nettement plus sensibles à un phonocapteur stéréophonique que monophonique. Cela conduisit, ainsi que nous l'avons vu, à une refonte complète des techniques de transmission, heureusement facilitée par l'emploi de courroies souples.

Restait l'élimination des chocs d'origine externe auxquels réagissent d'autant mieux les phonocapteurs que leur force d'appui est plus faible. Or, en une décennie, celle-ci avait diminué dans un rapport de dix.

Une fois encore, ce fut la simplicité qui l'emporta. Puisqu'il fallait soustraire le plateau tourne-disques, ainsi que le bras de lecture, aux vibrations mécaniques, on pensa à monter l'ensemble sur amortisseurs souples, et à l'inverse de ce qui avait été fait jusqu'alors, à ne pas y incorporer le moteur d'entraînement. Tant que la transmission se faisait par galets, la chose ne pouvait être envisagée. En revanche, avec l'emploi de courroies souples, le problème ne soulevait plus aucune difficulté. C'est ainsi que l'on vit apparaître les tables de lecture à contre-platine suspendue, pratiquement adoptées par tous les constructeurs et indispensables à une écoute en haute fidélité qui doit, avant toute chose, être exempte de bruits mécaniques parasites.

Evolution des bras de lecture

Monté d'origine et intégré à la platine mécanique, lorsqu'il s'agit de tables de lecture automatiques, le « bras » de pick-up, qu'on ne saurait dissocier des têtes de lecture (ou phonocapteurs), a lui aussi bénéficié au cours des années écoulées de très nombreux perfectionnements.

Par un curieux retour des choses, les bras de lecture les plus perfectionnés sont actuellement conçus de façon à se déplacer tangentiallement au sillon, tout comme dans les phonographes à cylindres. Mais à l'époque — de même que pour les premières réalisations « modernes » de bras tangentiels — l'énergie nécessaire au déplacement radial du « bras » était empruntée au sillon *via* la pointe lectrice. Aujourd'hui il n'en est plus de même. C'est, en effet, un servomécanisme qui se charge de l'opération, le moteur nécessaire au déplacement tangentiel de la pointe du phonocapteur à la surface du disque étant commandé à partir de micro-contacts, ou mieux, au moyen d'un circuit d'asservissement électronique déclenché par cellules photoélectriques, ce qui supprime toute contrainte mécanique.

Pour remarquables qu'elles soient, ces solutions sont toutefois loin d'être généralisées, l'immense majorité des tables de lecture étant équipées de bras de pick-up classiques, se déplaçant à la surface des disques selon un arc de cercle. Techniquement parlant, ceci n'est pas tout à fait satisfaisant puisque, à l'enregistrement, les disques sont gravés par un burin se déplaçant selon un rayon, tout comme les bras tangentiels.

Quel que soit le modèle considéré, les bras de pick-up font appel à un double système de pivotement (hormis les modèles unipivot) permettant leur articulation dans le sens vertical et dans le sens horizontal, système dont les forces de frottement doivent être réduites au strict minimum. S'il n'en était ainsi, des contraintes mécaniques non négligeables seraient transmises aux phonocapteurs et donneraient naissance à des distorsions.

C'est pourquoi nombreux constructeurs font appel, pour les systèmes de pivotement, à des solutions mécaniques éprouvées, roulements à billes, pivots à rubis ou encore dispositifs à couteaux, usinés avec une très grande précision.

Négligés avant l'avènement du disque micro-sillon, puis du disque stéréophonique, certains problèmes figurent maintenant au premier rang des préoccupations des constructeurs. C'est ainsi que, petit à petit, ils ont été amenés à considérer les notions d'équilibrage dynamique (permettant aux bras de pick-up de demeurer stables, même montés sur des tables de lecture présentant un défaut d'horizontalité), de masse dynamique et de force centripète, l'importance de ces derniers se manifestant surtout dans le cas de la lecture de disques stéréophoniques.

Tant que l'on était en monophonie, que les forces d'appui étaient élevées et que les phonocapteurs étaient relativement « rigides », ces problèmes n'avaient qu'une importance secondaire. Avec le temps et les progrès de la technique phonographique, ils devinrent très rapidement préoccupants. Ainsi, la force centripète, phénomène qui tend à faire glisser la pointe de lecture vers le centre du disque, vit son importance grandir. D'où l'emploi et la généralisation de dispositifs compensateurs (ou « d'anti-skating »), ainsi que celle de bras de lecture à faible masse dynamique.

Car, en même temps que les forces d'appui diminuaient, les phonocapteurs voyaient l'élasticité de leur équipage mobile (ensemble mécanique chargé de traduire le profil des sillons en signaux électriques) augmenter considérablement.

Evolution des têtes de lecture

Comme on peut le constater, l'évolution des « bras » et des « têtes » de lecture s'est faite simultanément, les bras à grande masse ayant cédé le pas aux bras à faible masse, capables notamment de réagir très vite en présence d'un disque voilé ou excentré, et d'éviter la transmission de contraintes mécaniques aux équipages mobiles des phonocapteurs.

En ce qui concerne ces derniers, on a très rapidement assisté à l'élimination des modèles

électromagnétiques, au profit des modèles magnétodynamiques ou électrodynamiques qui constituent l'immense majorité des phonocapteurs Hi-fi.

Très récemment, des modèles à jauge de contraintes, à condensateurs ou à cellules photoélectriques ont vu le jour. Sans nul doute, un brillant avenir leur est promis, car ils présentent des caractéristiques que sont loin de posséder les modèles piézoélectriques.

D'une manière générale, les phonocapteurs du type magnétique engendrent des signaux électriques de très faible amplitude qui résultent de la modulation d'un champ magnétique par l'intermédiaire d'un équipage mobile fournissant un travail mécanique.

A l'inverse, les phonocapteurs à jauge de contraintes, à condensateurs, ou à cellules photoélectriques n'utilisent pas directement l'énergie mécanique recueillie par la pointe de lecture, mais s'en servent pour moduler une tension continue, un signal haute fréquence ou un faisceau lumineux. Ce qui explique à la fois leur plus grande sensibilité et leur meilleur comportement en tant que transducteurs.

Actuellement, ces différents types de phonocapteurs présentent des performances assez voisines, qui sont notamment fonction de l'élasticité (que les Anglo-Saxons désignent du nom de « compliance ») de l'équipage mobile, de la réponse en fréquence des circuits transducteurs, et, pour les modèles stéréophoniques, du taux de diaphonie (séparation entre voies). Taillées d'abord coniquement et plus ou moins « pointues » afin de tenir compte de la largeur des sillons, les pointes de lecture sont, actuellement, très souvent de forme elliptique, cette disposition ayant été retenue afin de mieux suivre les plus fines inflexions des sillons. Là n'est d'ailleurs pas la seule raison de cette taille elliptique. Elle évite, en effet, à la pointe de talonner dans le fond du sillon, ce qui diminue sensiblement les bruits parasites causés par les poussières accumulées. En outre, les pointes elliptiques, ayant un profil très proche de celui du burin graveur, réduisent nombre de distorsions de lecture.

Enfin, il n'est pas sans intérêt de remarquer que les pointes en diamant, à « durée de vie » nettement supérieure aux pointes en saphir, ménagent beaucoup mieux les disques que ces dernières, car elles ne se laissent que très difficilement entamer, évitant ainsi la formation de méplats qui auraient tôt fait d'abîmer les fragiles sillons.

Cet aspect de la question est loin d'être négligeable car, sur certains types de phonocapteurs (électrodynamiques), l'échange de la pointe lectrice ne peut être effectué par l'usager.

LES MAGNETOPHONES

Le mot magnétophone couvre de nombreux produits qui n'ont en commun que la bande magnétique, utilisée dans tous les cas qui nous intéressent comme support d'information musicale. A la différence du disque, la bande peut être effacée et recevoir un nouvel enregistrement. La plupart des magnétophones auront donc deux fonctions : ils seront lecteurs et enregistreurs. Les amateurs ont nettement accordé leur préférence à un appareil autorisant des enregistrements. Cependant, nous le verrons, il existe des magnétophones uniquement lecteurs. Nous voici déjà avec deux classes d'appareils qui s'inscrivent en superposition dans deux autres classes : les appareils à bobines et les appareils à cassettes. Ces derniers se répartissent encore en appareils à cassettes proprement dits et en appareils à cartouches. Entre les trois types, il n'y a aucune compatibilité : les bandes utilisées sur l'un ne peuvent servir sur aucun des deux autres. De plus, dans les appareils à bobines, il existe différents standards de vitesses de défilement et différents standards de pistes.

Les vitesses standardisées pour les magnétophones d'amateurs sont : 2,4 cm/s, 4,75 cm/s, 9,5 cm/s, 19 cm/s. On trouve dans le commerce des appareils à deux, trois et quatre vitesses. Plus la vitesse de défilement est élevée, meilleure est la qualité de l'enregistrement.

Les standards de pistes sont moins nombreux. Ils sont définis par le nombre de pistes inscrites sur la bande — deux ou quatre —, mais les appareils peuvent être monophoniques ou stéréophoniques.

Dans les appareils à cassettes « compact », la situation est un peu plus claire : la vitesse de défilement a été fixée à 4,75 cm/s. Le nombre de pistes est limité à deux pour les appareils monophoniques et quatre pour les appareils stéréophoniques. Une astuce technologique permet de « lire » les enregistrements stéréophoniques sur les appareils monophoniques et vice-versa. Mais un appareil monophonique ne permettra évidemment aucun effet stéréophonique, même avec une bande « stéréo ». Les appareils à cartouches sont des « lecteurs » uniquement destinés à reproduire des bandes préenregistrées. Il en existe deux types spécialisés, l'un pour la lecture de bandes à quatre pistes, l'autre de bandes à huit pistes. Les premiers donnent deux programmes stéréophoniques, les autres quatre programmes stéréo-

phoniques. Il existe aussi des appareils compatibles capables de lire des bandes quatre pistes ou huit pistes.

Quoi qu'on puisse en penser, toutes les catégories qui viennent d'être passées en revue comprennent des appareils méritant le titre Hi-fi. Cela complique sérieusement les problèmes qui se posent à un amateur. Mais le choix est dicté par deux considérations fondamentales : l'oreille de l'auditeur et son budget. L'amateur très « évolué » se dira immédiatement que c'est dans la gamme des appareils à bobines qu'il trouvera l'appareil qui lui convient. Ce jugement est en partie vrai.

Les nouveaux systèmes d'enregistrement et de lecture — système Dolby par exemple — permettent d'obtenir sur des appareils à cassettes compact (défilement 4,75 cm/s), des reproductions musicales au moins égales à celles des disques du commerce. Les cartouches préenregistrées à huit pistes donnent même des reproductions meilleures que les disques.

Le choix de l'appareil est en définitive déterminé par l'emploi qu'on en fera. Ceci nous amène à définir exactement les possibilités des différents types d'appareils.

Pour l'essentiel, une chaîne haute-fidélité se compose d'un amplificateur stéréophonique et de deux enceintes acoustiques. C'est ce système de reproduction qu'il faudra raccorder aux transducteurs, c'est-à-dire aux appareils capables de transformer les informations inscrites sur les disques ou sur les bandes (ou transmises par radio) en signaux acoustiques. Les transducteurs sont des cellules phonocaptrices (les têtes magnétiques, les tuners). Nous ne parlerons ici que des transducteurs intéressant la bande magnétique.

Une tête magnétique (de magnétophone) ne se raccorde pas directement à un amplificateur Hi-fi comme une cellule phonocaptrice. (Nous faisons ici abstraction de la mécanique d'accompagnement.) Les signaux engendrés dans la tête magnétique par le défilement de la bande enregistrée sont trop faibles. Il convient donc de les amplifier avant de les introduire dans l'amplificateur.

Si l'on dispose le système d'amplification dans le boîtier du magnétophone, pourquoi ne pas y introduire un amplificateur complet ? Mais si un amplificateur est incorporé dans un magnétophone, ce qui est le plus souvent le cas, pourquoi lui substituer un autre amplificateur dans une chaîne Hi-fi ? Nous revenons à notre point de départ : Qu'attend-on du magnétophone dans la chaîne Hi-fi ?

Les sources d'enregistrement

Les lecteurs quatre-pistes et huit-pistes mis à part, tous les autres appareils sont enregistreurs et lecteurs.



Magnétophone Philips « Stereo » N 4 500, quatre pistes, trois vitesses.

Pratiquement, il n'existe pas de bandes préenregistrées en bobines. Le répertoire enregistré sur cassettes « compact », déjà très étendu, s'accroît chaque jour. Toutes les grandes compagnies de disques éditent maintenant des bandes en cassettes.

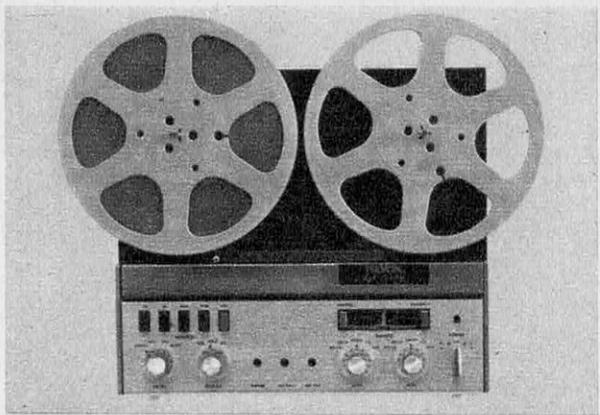
Si l'on achète un appareil à cassettes, ou à cartouches, on disposera de programmes, tandis qu'avec un appareil à bobines, il faudra enregistrer des bandes.

Les sources dont dispose l'amateur pour faire des enregistrements sont :

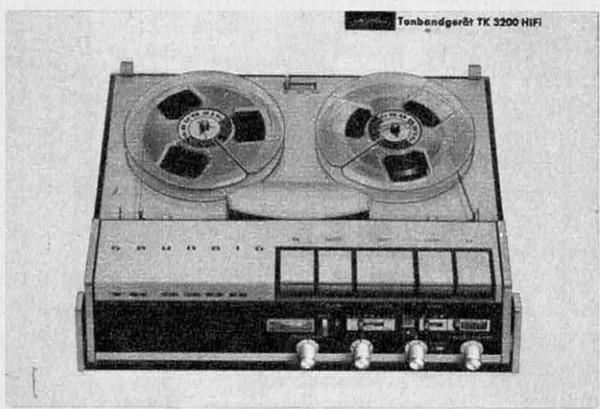
- les émissions radio en modulation de fréquence,
- les disques du commerce,
- les enregistrements que nous appellerons «musique vivante»,
- les enregistrements documentaires ou familiaux.

MAGNÉTOPHONES

CONSTRUCTEUR Importateur	Type	Nbre de mo- teurs Dia- mè- tre bo- bi- nes (cm)	Vitesses cm/s	Pistes	Nombre de têtes	Entrées (mV)				Bande passante	Signal/bruit (dB)	Puissance ampli- incorpore (W)	Dimensions (cm)	Poids (kg)
						microphone	radio	pick up	auxiliaire					
B ET O Vibrasson	Beocord 1800	1 18	4,75 9,5 19	2 ou 4	3	0,035	2,5	50	250	30 Hz — 18 kHz ± 2 dB	— 60	—	45 × 36 × 23	16
B ET O Vibrasson	Beocord 2400	1 18	4,75 9,5 19	4	3	0,035	50	1	2,5	20 Hz — 18 kHz ± 2 dB	60	2 × 10	45 × 36 × 23	16
BRAUN Major Electronic	TG 502 — TG 504	3 18	9,5 19	2 ou 4	3	0,1	5	100	—	20 Hz — 20 kHz	— 55	—	42 × 17 × 28	—
BRAUN Major Electronic	TG 1000	3 22	4,75 9,5 19	2	3	0,1	5	100	—	20 Hz — 25 kHz	60	—	45 × 32 × 14	20
CARAD Cami	R 59	3 27	9,5 19	2	3	1	20	—	160	30 Hz — 20 kHz ± 3 dB	—	2 × 15	48 × 48 × 21	21
DUAL Carobronze	TG 28 CV	1	9,5 19	4	2	0,15	0,15	50	—	35 Hz — 18 kHz	— 54	—	39 × 30 × 14	6
FERGUSON Universal Electronics	3244	1	4,75 9,5 19	4	2	0,2	0,2	100	50	40 Hz — 18 kHz	45	2 × 5	42 × 36 × 18	13
GRUNDIG	TK 3200	1 15	4,75 9,5 19	2	3	0,22	0,22	45	—	40 Hz — 16 kHz	50	2	31 × 24 × 9	5
GRUNDIG	TK 248	1 18	9,5 19	4	3	1	1	50	—	40 Hz — 16 kHz	50	2 × 4	43 × 20 × 35	14
HENCOT	H 67 B	3 27	9,5 19	2	3	2	—	—	20	30 Hz — 20 kHz ± 2 dB	46	—	50 × 40 × 14	17
NORDMENDE Cami	6001	3 18	4,75 9,5 19	2 et 4	4	—	—	—	—	40 Hz — 18 kHz	50	2 × 3	—	—
NORDMENDE Cami	8002/T 20	3 18	4,75 9,5 19	4	3	—	—	—	—	—	52	2 × 3	16 × 50 × 36	17
PHILIPS	N 4500	1	4,75 9,5 19	4	3	0,2	2	100	—	40 Hz — 18 kHz	— 50	—	49 × 34 × 18	11
PHILIPS	N 4407	1 18	4,75 9,5 19	2, 4	2	0,2	2	100	—	40 Hz — 18 kHz	— 45	2 × 4	48 × 34 × 19	11
PHILIPS	N 4408	1 18	4,75 9,5 19	4	2	0,2	2	100	—	40 Hz — 18 kHz	— 45	2 × 6	48 × 33 × 22	13
PHILIPS	PRO 12	1 18	9,5 19	2	3	0,15	2	—	40	40 Hz — 18 kHz 0 + 5 dB	— 50	—	52 × 34 × 24	23
PIONEER Setton	T 600	1 18	9,5 19	4	3	0,5	700	—	45	50 Hz — 15 kHz ± 3 dB	— 50	—	43 × 20 × 43	15
REVOX Revox France	A 77	3 26	9,5 19	2 ou 4	3	0,2	2	—	40	30 Hz — 20 kHz	— 54	2 × 8	52 × 23 × 38	15
SABA Driva	543	1 18	9,5 19	4	2	0,5	2	150	—	40 Hz — 18 kHz	55	2 × 5	49 × 18 × 33	—
STELLAVOX Tradelec	SP 7	1 13	19	2	4	0,15	200	—	200	30 Hz — 16 kHz ± 2 dB	— 60	—	8 × 22 × 27	2,9
TANDBERG Barthe	6 X	1 18	4,75 9,5 19	2 ou 4	3 + 1 préma- gné- fisation	1,5	4	50	50	30 Hz — 20 kHz ± 2 dB	—	—	39 × 30 × 17	11
TANDBERG Barthe	1200 X	1	4,75 9,5 19	2 ou 4	2 + 1 préma- gné- fisation	0,1	6	2	6	30 Hz — 20 kHz ± 2 dB	—	2 × 10	39 × 30 × 17	11
TELEFUNKEN	203	1 18	9,5 19	2	—	0,2	0,2	150	—	40 Hz — 18 kHz	— 52	2,5	40 × 32 × 17	9
TELEFUNKEN	28	3 26	9,5 19	2	3	0,2	5	—	—	25 Hz — 17 kHz	— 53	—	16 × 46 × 41	17
TRUVOX Universal Electronics	PD 202/204	3 18	4,75 9,5 19	2 ou 4	3	1	50	50	—	30 Hz — 18 kHz	— 50	—	41 × 42 × 20	13
UHER	Royal	1 18	2,38 4,75 9,5 19	2 ou 4	3	0,12	1,2	40	200	20 Hz — 20 kHz	54	2 × 10	47 × 19 × 35	14
UHER	4200	1 13	2,38 4,75 9,5 19	2 ou 4	2	0,1	2	30	—	40 Hz — 20 kHz	52	2 × 1	30 × 10 × 23	3,8



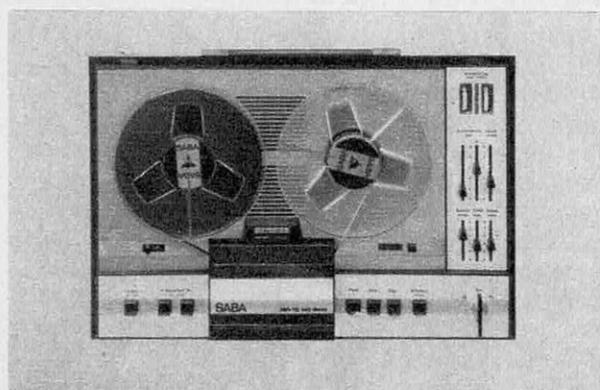
Revox A 77, deux ou quatre pistes.



Grundig TK 3 200, deux pistes.



Tandberg 1 200 X, deux ou quatre pistes.



Saba 543, deux têtes, quatre pistes.

Les programmes radio émis en modulation de fréquence sont une source pratiquement gratuite ; les enregistrements sont faciles à réaliser, puisque les ingénieurs du son ont fait le nécessaire à l'émission (¹).

La copie des disques du commerce pose des problèmes en matière de droit, mais en fait, tout le monde ferme les yeux. On copie donc ses propres disques ou les disques des amis. Là encore aucune difficulté pour faire de l'enregistrement.

Les enregistrements de musique vivante posent plus de problèmes. Ils sont d'ordre technique (studio d'enregistrement, microphones de haute qualité, orchestre), donc d'ordre financier.

Les enregistrements de conférences ou de cours posent des problèmes de mobilité et d'alimentation des appareils, qui sont maintenant résolus. Tous les grands constructeurs présentent aussi bien des appareils à bobines que des appareils à cassettes haute-fidélité répondant parfaitement aux exigences des enregistrements de musique vivante et de conférences.

Les appareils à deux et trois têtes compliquent la situation

Nouvelle subtilité, il existe des appareils à deux têtes et à trois têtes. Les premiers sont équipés d'une tête d'effacement et d'une tête d'enregistrement-lecture. Ils permettent l'écoute pendant l'enregistrement, mais c'est l'écoute de ce qu'on inscrit sur la bande. Le contrôle de la qualité de l'enregistrement se fait sur un appareil de mesure appelé Vu-mètre. Les appareils à trois têtes sont équipés d'une tête d'effacement, d'une tête d'enregistrement et d'une tête de lecture. Un commutateur permet d'écouter soit ce qu'on est en train de mettre sur la bande, soit ce qu'on a déjà enregistré. Cette possibilité est appelée **monitoring**. Nous estimons que dans une chaîne haute-fidélité de grande classe, seuls les appareils à trois têtes doivent être utilisés, car ils permettent un contrôle permanent de la qualité de l'enregistrement en cours d'exécution. Ceci n'empêche pas ces appareils d'être munis de Vu-mètre.

Le magnétophone, base de la chaîne Hi-fi

Grâce à la transistorisation, on peut très bien incorporer dans un boîtier de magnétophone un amplificateur stéréophonique de 2×4 watts efficaces, ou même de 2×8 watts efficaces. Ces amplificateurs peuvent être

(¹) Nous admettons que conformément à la loi, l'amateur utilise les enregistrements réalisés par lui-même et sans les transporter.

d'une technique évoluée, comporter par exemple des contrôles de tonalité indépendants pour les basses et les aiguës. Ils peuvent servir de base pour une chaîne haute-fidélité. Il faut pourtant faire certaines réserves. Les haut-parleurs incorporés ou les enceintes détachables ne correspondent pas à la qualité réelle des amplificateurs ni des enregistreurs. Pour utiliser les magnétophones ainsi conçus comme base d'une petite chaîne Hi-fi, on doit leur adjoindre des enceintes de qualité. La puissance des amplificateurs est suffisante pour un appartement, la qualité des enregistrements réalisables correspond aux normes Hi-fi, mais pour les enregistrements définis plus haut, il faudra, suivant le cas, prévoir un tuner F M, un tourne-disques, et des microphones de qualité. Pour le tuner, les constructeurs offrent des matériels très sérieux à des prix raisonnables. Pour les tourne-disques, le problème doit être posé d'une façon différente. A de très rares exceptions près, aucun magnétophone ne possède une entrée pour pick-up magnétique (une telle entrée doit être en effet équipée d'un étage préamplificateur-correcteur). Il faut se tourner vers la cellule phonocaptrice dont est équipée le tourne-disques. Ou bien elle est de type céramique (il en existe d'excellentes), et on peut faire un raccordement direct à l'entrée du magnétophone prévue pour le P U, ou bien elle est de type magnétique, et il faut alors ajouter un préamplificateur-correcteur entre la cellule phonocaptrice et l'entrée du magnétophone. Presque tous les constructeurs de tourne-disques fabriquent des préamplificateurs incorporables dans les socles. Les magnétophones avec amplificateurs incorporés peuvent servir de base pour de petites installations Hi-fi.

Le magnétophone incorporé dans une chaîne Hi-fi

Les magnétophones avec amplificateurs complets peuvent être incorporés dans une chaîne Hi-fi importante. C'est une très bonne solution, car le magnétophone conserve toute l'indépendance d'un appareil autonome chaque fois qu'on voudra l'utiliser sans la chaîne Hi-fi.

Lorsqu'un magnétophone est ainsi incorporé dans une chaîne Hi-fi, seule la partie préamplificateur est employée. Les amplificateurs incorporés sont muets. L'incorporation du magnétophone dans la chaîne est facilement réalisable, car il existe, aussi bien sur les amplificateurs que sur les magnétophones, des prises permettant les raccordements par des cordons.

Si les magnétophones ainsi employés sont du type à trois têtes, il faut, pour utiliser toutes leurs possibilités, les raccorder à des ampli-

ficateurs munis d'un dispositif de monitoring qui permet de passer de l'écoute directe à l'écoute du son enregistré. La chaîne Hi-fi et le magnétophone devront être de la même classe. Ceci découle d'une règle absolue : dans une chaîne Hi-fi, tous les maillons doivent être de la même valeur. La condition est d'autant plus facile à réaliser qu'en ce moment il se crée un marché de chaînes de seconde main garanties par les constructeurs.

Les magnétophones adaptateurs

Certains amateurs peuvent considérer comme inutile d'avoir un magnétophone complet dans une chaîne haute-fidélité, puisqu'il ne sera jamais utilisé à l'extérieur. Ce raisonnement est valable.

De deux choses l'une : ou bien l'on se contente de copier des disques ou des émissions radio-phoniques et un appareil stationnaire conçu comme un adaptateur suffit largement s'il est muni de trois têtes (c'est toujours le cas dans ce genre d'appareil), ou bien on envisage des enregistrements à l'extérieur, et dans ce cas le mieux est d'acheter un deuxième appareil qui sera alimenté par batterie et qui permettra des enregistrements aux mêmes standards de pistes et de vitesses.

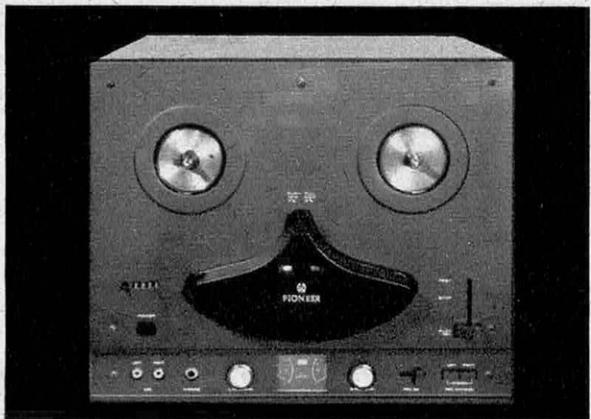
Tous les constructeurs ont dans leur gamme de produits des appareils adaptateurs ou/et des magnétophones autonomes.

Notons que nous sommes ici uniquement dans la catégorie des appareils à bobines, alors que tout ce que nous avons envisagé auparavant pouvait s'appliquer aussi bien aux appareils à cassettes.

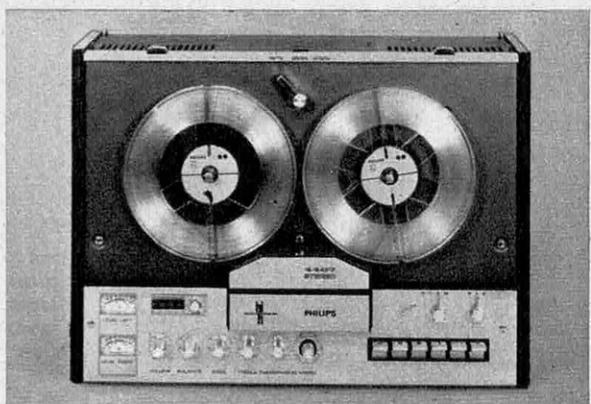
Magnétophones lecteurs à cassettes

Beaucoup de constructeurs ont cru à ce genre d'appareils. Malgré d'énormes dépenses publicitaires, ils n'ont pas été admis par le public, la qualité des lecteurs étant un peu faible pour permettre leur incorporation dans une chaîne Hi-fi. D'autre part l'alimentation se faisait sur piles, ce qui est pratiquement incompatible avec une installation complémentaire fonctionnant sur le secteur. Cependant ce genre d'appareil rencontre un vif succès dans la sonorisation des automobiles. Dans ce domaine, les progrès techniques et les exigences des amateurs sont tels que les constructeurs ont dû réviser leurs conceptions. Peut-être verrons-nous dans un avenir plus ou moins lointain un développement considérable de la gamme des appareils lecteurs de cassettes stéréophoniques pour la sonorisation des automobiles.

Ceci nous amène à parler des lecteurs de cartouches.



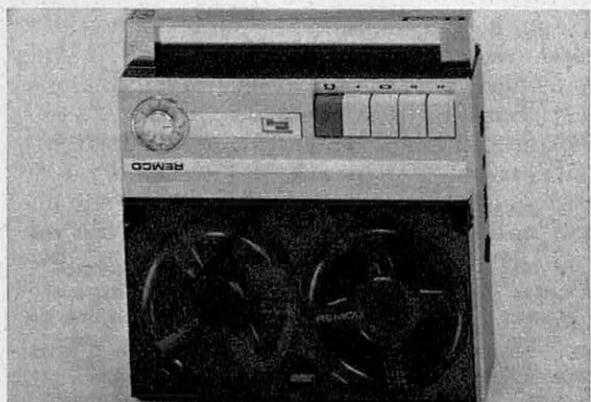
Pioneer T 600, quatre pistes.



Philips N 4407, dit « Stereo ».



Normende 8002, quatre pistes.



Remco 3000, deux pistes.

Les lecteurs de cartouches

Nous avons vu qu'il existe des appareils capables de lire les deux types de cartouches, à huit pistes ou à quatre pistes. Les programmes enregistrés sont stéréophoniques. Dans les deux cas, la durée des enregistrements est d'environ une demi-heure, la vitesse de défilement de 9,5 cm/s.

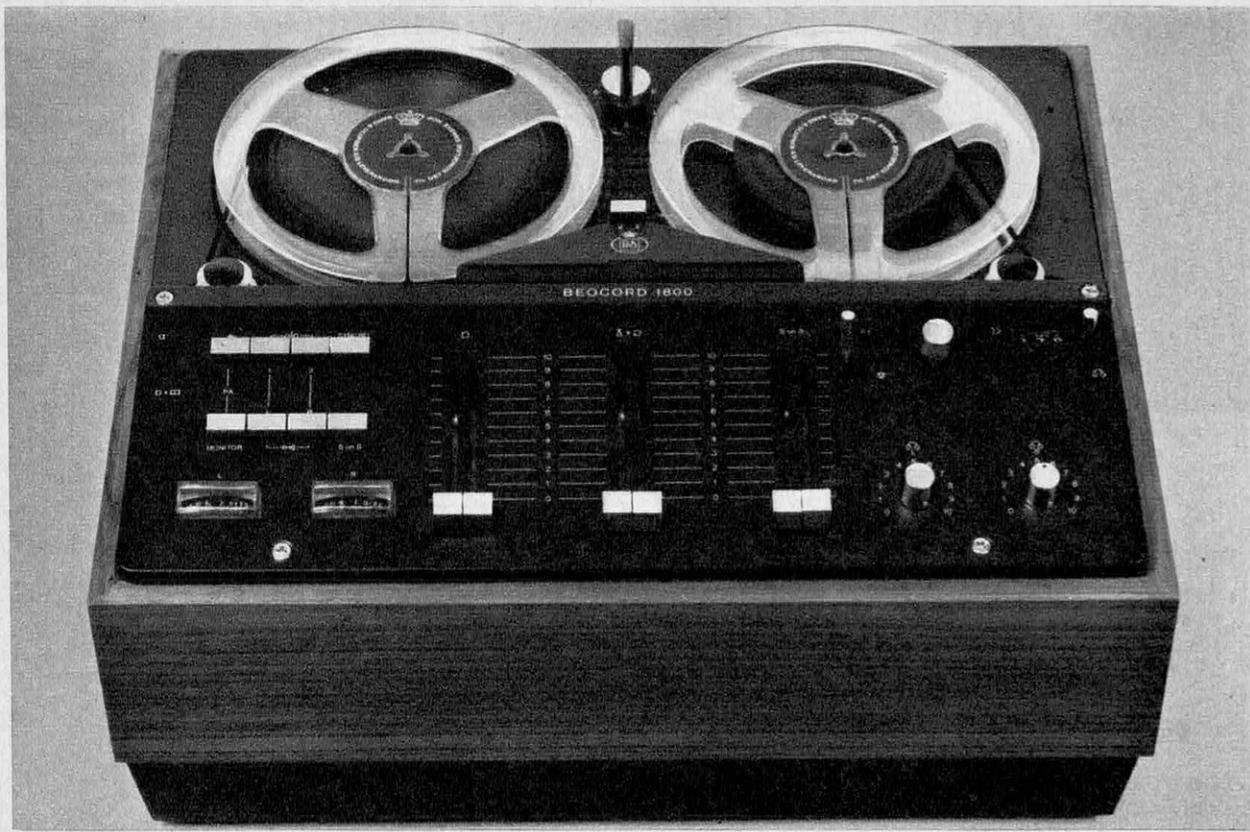
Aux Etats-Unis, les distances parcourues en automobile sont énormes. Il existe des « trous » importants pour la réception des émissions radiophoniques de qualité. Il était donc normal que l'automobiliste américain demande à l'industrie, dans sa voiture, une musique de qualité : exempte de parasites, de publicité, etc. Telle est l'origine de ces « produits ».

La bande magnétique préenregistrée répondait aux exigences musicales et aux exigences technologiques. Ainsi se créa l'industrie des lecteurs de cartouches. Les appareils à quatre pistes prirent un bon départ, puis furent surclassés par les appareils à huit pistes.

La bande est enroulée de telle sorte qu'elle est sans fin : on n'a jamais besoin de retourner la bobine ou de rebobiner la bande. Le défaut principal est que la bande sort par le centre de la bobine et est reçue sur l'extérieur. Toutes les spires doivent donc continuellement glisser les unes sur les autres.

Pour un programme de même durée, il y a deux fois plus de bande dans une cartouche quatre pistes que dans une cartouche huit pistes. En conséquence, les efforts de traction sont plus grands dans le premier cas que dans le second. Ces efforts finissent par bloquer la bande qui se « serre ». C'est pourquoi la formule huit pistes a surclassé rapidement le quatre-pistes. Mais les vibrations aidant, le même phénomène de blocage finit par apparaître dans les bandes huit-pistes lorsque les lecteurs sont utilisés sur des véhicules automobiles. Ce défaut n'apparaît pas sur les lecteurs de cassettes « compact » et il semble qu'aux Etats-Unis ce dernier type de lecteur soit en train de supplanter les deux autres.

La qualité des enregistrements commerciaux réalisés avec le système huit-pistes a ouvert un nouveau marché, celui des lecteurs de cartouches incorporables dans une chaîne haute-fidélité. La mécanique peut être mieux étudiée ; au lieu d'être alimenté sur 12 volts en courant continu, le moteur peut être celui d'un magnétophone classique alimenté sur 110-220 volts en alternatif, etc. L'absence de vibrations protégeant la bande, certains constructeurs japonais et italiens ont étudié des appareils de qualité comportant les préamplificateurs de lecture qui permettent d'adoindre ces lecteurs de bandes à une chaîne Hi-fi.



Les enregistrements

Pour dresser un inventaire précis des possibilités d'adjonction des différents magnétophones dans les chaînes Hi-fi, il faut tenir compte de la qualité intrinsèque des divers enregistrements magnétiques.

Bandes enregistrées sur bobines. Elles peuvent passer sur tous les magnétophones à bobines du commerce. La qualité musicale est bonne, mais le répertoire disponible est mince. Il est surtout composé de musique de variétés américaine.

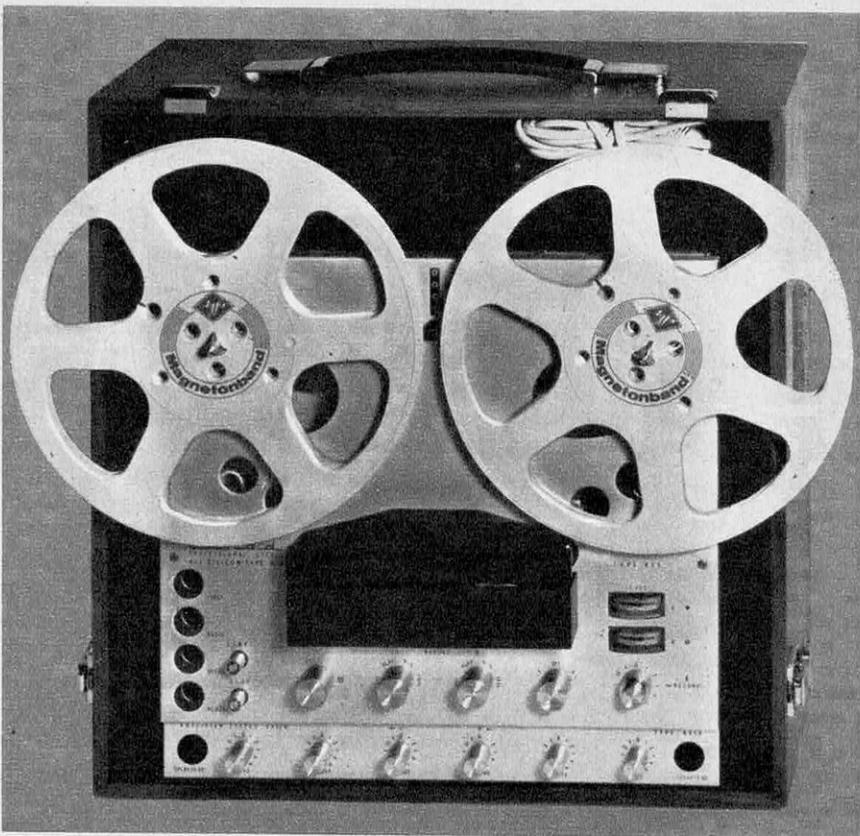
Bandes préenregistrées en cassettes « compact ». Elles portent toutes des enregistrements stéréophoniques. Le répertoire, déjà considérable, s'étend chaque jour. Philips a donné le coup d'envoi, toutes les grandes sociétés de disques suivant le mouvement. La vitesse de défilement de 4,75 cm/s limite actuellement la bande passante à 10 000 Hz, mais, grâce aux travaux de Dolby, elle a déjà été prolongée jusqu'à 12 500 Hz et le rapport signal-bruit considérablement amélioré. On peut donc penser que, dans un proche avenir, on pourra utiliser les bandes préenregistrées en cassettes « compact » comme source haute fidélité. Encore faudra-t-il que la mécanique des lecteurs soit améliorée. Le moteur d'entraînement ne devra plus être un moteur à collecteur fonctionnant sur 6 ou 7 volts,

comme c'est le cas général aujourd'hui, mais un moteur sans collecteur, asservi par un système électronique, comme dans les magnétophones à bobines de qualité.

Bandes enregistrées en cartouches. De nombreux éditeurs de disques français font reproduire chez Major Electronic leur répertoire sur cartouches huit-pistes. Le catalogue prend chaque jour de l'ampleur. Il existe d'excellents lecteurs de bandes, comme Voxon. Les appareils sont sérieusement construits, bien conçus, robustes ; l'électronique est soignée. Le défilement à 9,5 cm/s donne une bande passante relativement large, la dynamique est bonne. Cette source de musique enregistrée est maintenant utilisable en appartement. Comme la précédente, elle connaît une grande vogue dans les « sonorisations itinérantes », c'est-à-dire à bord des véhicules automobiles et des bateaux.

Les enregistrements réalisés par les amateurs. Nous arrivons au cœur du problème : la valeur des enregistrements réalisés par des amateurs. Bien que, nous l'avons dit, les copies de disques ou d'émissions soient faciles à réaliser puisque l'essentiel du travail a été fait par les ingénieurs du son, la qualité de l'enregistrement demeure fonction directe de la qualité du magnétophone. Nous considérons ici cette qualité globalement, en admettant que le magnétophone est relié pour la reproduction à

Magnétophone Bang et Olufsen Beocord 1800, à deux ou quatre pistes, trois vitesses, trois têtes, bande passante 30 Hz-18 kHz.



Carad R 59, deux vitesses, deux pistes, trois têtes.

une chaîne haute fidélité. Certains vendeurs de matériel Hi-fi vont jusqu'à affirmer dans leurs catalogues que ces enregistrements d'amateurs n'ont aucune valeur et ne valent pas le plus mauvais disque. C'est profondément injuste et manifestement faux, avec la classe de matériel bénéficiant chez les fabricants du label Hi-fi.

Il faut admettre que, souvent, les enregistrements réalisés avec les magnétophones amateurs étaient entachés de colorations particulières différentes du son original. Mais c'est de plus en plus rare, surtout avec les magnétophones à trois têtes où l'on peut continuellement comparer le son original à l'enregistrement. Les colorations indésirables apparaissent presque toujours du fait de l'utilisateur : il faut obligatoirement utiliser la bande recommandée par le constructeur à la vitesse recommandée. Les bancs d'essais publiés chaque mois par les revues spécialisées permettent de comparer les performances des appareils. Ceux dont la courbe de réponse présentent le moins d'accent dans la gamme 40 Hz - 12 000 Hz sont ceux qui donnent le moins de coloration. Dans les magnétophones de classe, le rapport signal-bruit est toujours meilleur que celui des disques et des émissions FM. La séparation des voies stéréophoniques est également plus grande. Donc, en choisissant bien son appareil, on peut dire que la bande magnétique enre-

gistree à domicile est une excellente source de musique.

Les enregistrements vivants. Ils exigent beaucoup de qualités de ceux qui veulent les réaliser : tempérament artistique, connaissances musicales étendues, appareillages de haute qualité, etc. Rares sont les amateurs capables de faire de tels enregistrements.

Pour conclure ...

Techniquement parlant, tous les magnétophones, quel qu'en soit le type, sont incorporeables dans une chaîne Hi-fi. Cela ne veut pas dire qu'on peut coupler une minicassette avec un amplificateur Mac Intosh. Tout est question de jugement, et pour juger on peut avoir recours aux bancs d'essais.

Beaucoup de magnétophones peuvent servir de base à de petites chaînes haute-fidélité. Cependant le choix des « grands » amateurs se portera sur des magnétophones adaptateurs à trois têtes. On trouve des appareils répondant à ces conditions dans les marques Telefunken, Akai, Aiwa, Sony, Philips, Grundig, Uher, Carad, Bang et Olufsen, etc., puis dans une classe supérieure, chez Revox, Philips Pro 12, Braun, Teac. A citer enfin, un Telefunken de classe professionnelle dont le prix est encore abordable.

C. OLIVERS

LES AMPLIFICATEURS

L'élément terminal d'un système électroacoustique est, dans la très grande majorité des cas, un haut-parleur. Le haut-parleur est un transducteur établissant le lien entre l'énergie électrique qu'il reçoit sous forme de courants audiofréquence et l'air ambiant ; les oscillations de son diaphragme se traduisent à l'oreille sous forme de sons ou de bruits. Notre propos n'est pas d'examiner le fonctionnement d'un haut-parleur. Indiquons seulement que l'énergie électrique dont il a besoin va, selon les cas, de quelques centaines de milliwatts à plusieurs watts ou dizaines de watts. Le petit haut-parleur d'un récepteur à transistors ou d'un magnétophone autonome peut demander 500 mW ; celui d'un récepteur de radio, d'un électrophone portable, d'un téléviseur, 2 à 3 W. Les haut-parleurs des chaînes haute-fidélité peuvent demander 25, 30, voire 50 W. Les sonorisations pour le théâtre, surtout en plein air, exigent des puissances encore plus élevées.

Ce ne sont là que des ordres de grandeur, car tout dépend du rendement des haut-parleurs, c'est-à-dire du rapport existant entre l'énergie électrique qu'ils demandent et le niveau sonore qu'ils délivrent.

L'élément initial d'un système électroacoustique est une source de modulation, par exemple un microphone, un phonolecteur (le pickup proprement dit), la tête de lecture d'un magnétophone, les détecteurs AM et FM d'un « tuner ».

Les tensions ou courants fournis par ces sources sont très faibles ; elles s'évaluent en fractions de millivolt ou de volt, donc hors de proportion avec la puissance demandée par un haut-parleur. Ces tensions ou ces courants alternatifs sont de forme généralement complexe (parole, chant, musique, bruits). Leurs fréquences s'étendent de 20 Hz à 20 000 Hz, correspondant à la gamme des fréquences audibles (audiofréquences). Le niveau qu'elles délivrent est essentiellement variable. Le rapport peut être de 1 à 1 000 (60 dB) entre les composantes les plus faibles et les plus fortes d'un signal.

Le haut-parleur demande une puissance que la source de modulation ne peut lui fournir ; il faut donc intercaler un amplificateur entre la source et le haut-parleur.

Dans un récepteur portatif à transistors, dans un magnétophone ou dans un récepteur de télévision, cet amplificateur est étroitement enchevêtré aux autres circuits et organes. Dans la chaîne haute-fidélité, il se présente au contraire comme une unité sinon autonome, du moins distincte des autres éléments qui constituent la chaîne.

Le rôle de l'amplificateur

Pour situer la valeur technique (et commerciale) d'un amplificateur, on se réfère à la puissance ; elle s'exprime de deux façons : en watts efficaces, c'est la puissance en régime sinusoïdal permanent ; en watts musicaux, qui correspondent à la puissance de crête, laquelle n'est atteinte qu'épisodiquement, comme cela a lieu avec la musique. Il est préférable d'exprimer la puissance en watts efficaces, car l'expression « watts musicaux » laisse place à l'arbitraire. A 20 watts efficaces correspondent environ 35 watts musicaux.

Une autre caractéristique est la gamme de fréquences que l'amplificateur est susceptible de transmettre. Elle doit s'étendre de 20 Hz à 20 000 Hz. Encore faut-il que, tout au long de cette gamme, le niveau sonore reste constant. S'il demeure constant, on dit que la gamme de fréquences est 20 — 20 000 Hz à 0 dB. C'est rarement le cas, et les dérives en niveau réel se situent dans une fourchette exprimée en $\pm n$ dB (ordinairement ± 1 dB, ce qui est tout à fait correct, surtout si l'amplificateur fonctionne, durant cette mesure de qualité, à la puissance nominale). Les amplificateurs de classe professionnelle ont une dérive de seulement $\pm 0,5$ dB, et même moins, de quelques Hz à 50 000 Hz.

A ces caractéristiques importantes, s'ajoute le taux de distorsion, qui s'exprime en pourcentage. C'est le défaut de proportionnalité qui peut se manifester entre le niveau du signal disponible à la source par rapport au signal disponible à la sortie de l'amplificateur. Si l'on fait fonctionner l'amplificateur notablement en dessous de sa puissance nominale, la distorsion est peu élevée. En augmentant le volume sonore, on élève le taux de distorsion. A la puissance maximale, il risque de devenir désagréable à l'oreille. Cette forme de distorsion est dite « harmonique » : si on applique à l'entrée du système une fréquence pure, sinusoïdale, la distorsion se traduit par l'adjonction d'un certain pourcentage d'harmoniques paires (fréquence double, quadruple) et impaires. C'est ce que montre l'instrument de mesure approprié (distorsiomètre). Bien entendu, cette distorsion peut altérer les sons musicaux, complexes par nature. A l'audition, il est toutefois difficile d'en évaluer le pourcentage. Habituellement, les constructeurs indiquent le pourcentage — ou le taux — de distorsion har-

monique « totale » (intégration des harmoniques de tous rangs). Un amplificateur de classe moyenne peut avoir 1 % de distorsion. En fait, le taux de distorsion est lié non seulement à la puissance à laquelle on fait fonctionner l'amplificateur, mais aussi à la fréquence à laquelle on le mesure. Souvent, il est indiqué pour la fréquence de 1 000 Hz, considérée comme fréquence de référence. A puissance égale, même moyenne, le taux de distorsion risque d'être sensiblement plus élevé aux fréquences extrêmes, par exemple à 30 Hz et 15 000 Hz.

Il est conseillé, de toutes façons, de choisir un amplificateur dont la puissance nominale efficace soit plusieurs fois supérieure à celle employée pour un niveau normal d'audition, si l'on veut être certain que, tout au long de la gamme des fréquences audibles, le taux de distorsion reste inférieur à 0,1 %. pratiquement indécelable à l'oreille. Il ne faut donc pas s'étonner que l'on propose au grand public des amplificateurs de 20, 40, 50 watts efficaces. Ces puissances se justifient aussi par les progrès accomplis dans la technique des haut-parleurs dont la fidélité s'améliore, dont les dimensions se réduisent, mais qui en revanche demandent, pour diffuser un volume sonore équivalent à celui des modèles moins récents, une énergie plus élevée.

Il existe une autre forme de distorsion exprimée, elle aussi, en pourcentage. C'est la distorsion par intermodulation. Lorsqu'une fréquence basse (moins de 400 Hz) est mélangée à une fréquence élevée (plus de 5 000 Hz), cette dernière est modulée par la première, d'où une distorsion parfois gênante, délicate à mesurer car il faut pour cela un laboratoire bien outillé.

Un procédé universellement adopté dans la technique des amplificateurs est la contre-réaction. Elle consiste à appliquer au niveau de l'étage d'entrée une fraction de la tension en fréquences audibles prise à la sortie de l'amplificateur. La contre-réaction diminue le gain de l'amplificateur, c'est-à-dire le rapport des tensions de fréquences audibles appliquées à l'entrée à celles disponibles à la sortie. Le gain s'exprime en dB : un gain de 30 dB indique une tension à la sortie multipliée par 32. Si, pour une cause accidentelle due à la non linéarité en fonction de la fréquence, le gain de l'amplificateur est supérieur à ce qu'il devrait être, cette tension « d'erreur » s'oppose à l'entrée à celle émanant de la source. Cette régulation, ce « feed-back », rétablit, sur toute la gamme des fréquences, un rapport constant entre les tensions appliquées à l'entrée et celles disponibles à la sortie de l'amplificateur.

La contre-réaction combat les phénomènes de distorsion harmonique, aplanit la courbe de réponse, réduit l'impédance interne de l'ampli-

ficateur et contribue à l'amortissement des résonances indésirables du haut-parleur en l'asservissant étroitement à la forme du signal à reproduire.

Pour bien adapter un haut-parleur à la sortie d'un amplificateur, l'impédance de cette sortie doit correspondre à celle du haut-parleur utilisé. Cette impédance, dite nominale, généralement située entre 4 et 15 ohms, ne doit pas être confondue avec l'impédance interne de l'amplificateur, laquelle doit être la plus faible possible afin que le haut-parleur soit amorti au maximum. Cet abaissement de l'impédance interne dépend du taux de contre-réaction appliquée : un taux de contre-réaction de 20 dB correspond à un énergique asservissement du haut-parleur.

Le préamplificateur

Les indications qui viennent d'être données concernent la partie finale de l'amplificateur, c'est-à-dire l'ensemble des circuits, étages, transistors (ou tubes) englobés dans la boucle de contre-réaction. Cet ensemble constitue ce que l'on appelle l'amplificateur de puissance. Il est précédé du préamplificateur, qui comporte les corrections de courbe de réponse, les filtres de coupure, le réglage de volume sonore, etc.

Certaines chaînes haute-fidélité présentent un amplificateur de puissance séparé du préamplificateur ; un câble relie ces deux appareils. Cette formule s'est répandue il y a une douzaine d'années, au début de la haute-fidélité « grand public ». Elle a toujours cours dans les installations importantes ou destinées aux usages professionnels.

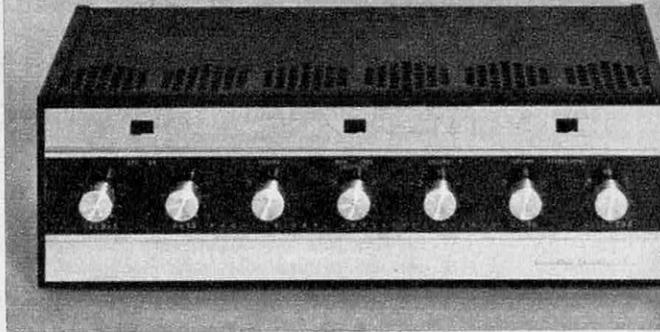
L'utilisation des transistors, des circuits imprimés, des circuits intégrés, la miniaturisation des composants électroniques ont au contraire permis, dans de nombreux cas, d'intégrer préamplificateur et amplificateur de puissance en un seul et même bloc. Mieux encore, on y intègre maintenant le tuner FM et AM et il est courant d'y adjoindre la table de lecture phonographique. Réduction des dimensions et simplification des branchements sont d'autant plus remarquables qu'en stéréophonie, il ne s'agit plus d'une seule chaîne mais de deux, rassemblées dans le même coffret.

Visible, comme naguère, ou invisible, la limite entre préamplificateur et amplificateur de puissance est affaire de technologie et de présentation, mais ne recouvre, en aucun cas, une différence de principe.

Le préamplificateur comporte une « entrée » sensible aux très faibles tensions engendrées par la source de modulation. La tension fournie par un pick-up magnétique est par exemple de l'ordre de 2 mV lorsqu'il lit un sillon dont les méandres correspondent à la gravure



Arena F 210, puissance 2 × 8 watts.



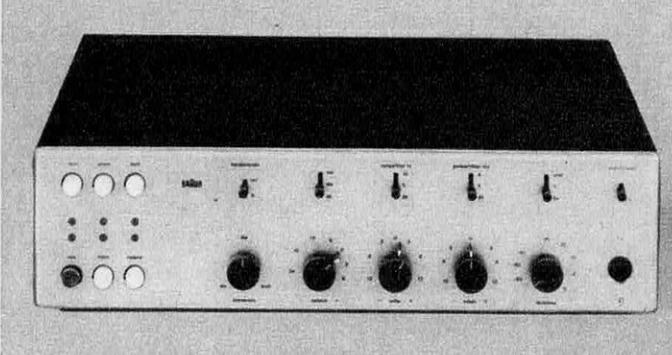
Carad PAS 60, 10 Hz-80 kHz.

LES AMPLIFICATEURS PREAMPLIFICATEURS

CONSTRUCTEUR Importateur	Type	Puisance efficacité (W)	Bande passante à puissance maximum	Distorsion à 1 kHz (%)	Entrées mV		Sorties	Efficacité réglages		Filtres de coupure graves	Filtres de coupure aigus	Dimensions (cm)
					Tuner	Microphone		Pu magnetique	Rappel/bruit (dB)	pu céramique	pu cristal	
ARENA Universal Audio	F210	2 × 8	40 Hz— 20 kHz	0,6	68	4	100	—	+ 10	+ 15	—	oui 26 × 19 × 7
AUDIO TECHNIC	PA 800 C	2 × 40	20 Hz— 40 kHz	0,1	76	2,5	100	—	+ 19	+ 18	—	— 13 × 38 × 32
AUDIO TECHNIC	PR 806 +2XA 860 2 × 70	2 × 100	10 Hz— 40 kHz	0,1	— 86	2,5	90	—	+ 20	+ 18	—	oui 3 châssis séparés
B ET O Vibrasson	BEOLAB 5000	2 × 60	20 Hz— 20 kHz	0,2	— 90	4	250	0,2	+ 17	+ 14	70 Hz— 6 kHz	oui 10 × 47 × 25
BARTHE	6732	2 × 16	20 Hz— 30 kHz	0,3	— 70	3,5	250	10	+ 14	+ 14	30 Hz— 6 kHz	oui 40 × 26 × 13
BRAUN Major Electronic	CSV 250/1	2 × 15	20 Hz— 30 kHz	0,5	70	2,5	200	0,2	+ 12	+ 12	oui	oui 26 × 11 × 32
BRAUN Major Electronic	CSV 1000	2 × 55	10 Hz— 35 kHz	0,5	70	2	—	0,2	+ 12	+ 12	40 Hz— 80 Hz— 8 kHz	oui 40 × 12 × 32
CABASSE	PAS 2 × 20 20 T Si	15 Hz— 120 kHz	0,15	70	2,5	16	0,8	250	—	+ 16	30 Hz— 6 kHz— 10 kHz	oui 10 × 42 × 25
CABASSE	Pré ampli PS T 14 Si	—	15 Hz— 120 kHz	0,3	—	3	20	1,5	+ 30	+ 30	30 Hz— 6 kHz— 10 kHz	oui 10 × 33 × 21
CARAD Cami	PAS 60	2 × 30	10 Hz— 80 kHz	0,25	72	3	300	2	+ 11	+ 12	—	oui 12 × 39 × 20
CARAD Cami	PPS 65	2 × 70	10 Hz— 24 kHz	0,25	60	3,7	200	2	140	oui	+ 14 — 12	oui 12 × 39 × 20
DUAL Carobronze	CV 80	2 × 32	10 Hz— 80 kHz	0,2	80	3	350	2,4	350	oui	+ 20	oui 42 × 11 × 29
DUAL Carobronze	CV 40	2 × 18	10 Hz— 45 kHz	0,3	60	4	350	350	oui	+ 20	+ 13	non 10 × 45 × 21
ERA	Stéréo 40	2 × 20	14 Hz— 45 kHz	0,2	— 70	5	—	20	200	oui	+ 10 — 9	oui 12 × 30 × 25
ERA	Stéréo 60	2 × 30	10 Hz— 50 kHz	0,1	80	3	—	5	100	oui	+ 18	15 8 kHz oui 12 × 34 × 25



Audiotronic PA 800 C, 10 Hz-40 kHz.



Braun CSV 1000, 2 × 55 watts.

ESART	E 100	2 × 20	10 Hz— 50 kHz	0,2	90	2	50	4	100	oui	oui	± 18	± 18	10 kHz	oui	13 × 36 × 31	
	E 250/S	2 × 50	10 Hz— 100 kHz	0,15	90	1	100	2	100	oui	oui	± 18	± 18	20 Hz— 10 kHz	oui	13 × 32 × 45	
FILSON	ATS 811	2 × 37	10 Hz— 80 kHz	0,15	70	2,5	100	—	100	oui	oui	± 18	± 16	7 kHz— 80 Hz	oui	38 × 22 × 13	
FISHER	TX 50	2 × 20	20 Hz— 25 kHz	0,5	85	2,5	—	1,8	250	oui	oui	—	—	—	—	39 × 13 × 23	
FISHER	TX 1000	2 × 50	20 Hz— 40 kHz	0,5	—	2	7,5	1,8	200	—	oui	—	—	oui	—	38 × 23 × 12	
GRUNDIG	SV 85	2 × 30	20 Hz— 20 kHz	0,5	—	80	4	200	—	oui	oui	+ 14 - 22	+ 14 - 14	5 kHz— 3 kHz	non	50 × 15 × 29	
GRUNDIG	SV 140	2 × 50	20 Hz— 20 kHz	0,5	—	5	250	—	—	—	—	± 12	+ 15	—	—	50 × 15 × 31	
KENNWODD Young Electronics	KA 4000	2 × 50	13 Hz— 30 kHz	0,5	—	77	2	200	2	200	oui	oui	± 10	± 10	80 Hz— 8 kHz	oui	42 × 14 × 31
KONTAKT Distrimex	C 7	2 × 15	20 Hz— 18 kHz	2	—	70	5	—	—	100	oui	—	—	—	—	39 × 19 × 6	
JB LANSING Auriema	SA 660	2 × 60	10 Hz— 130 kHz	0,2	85	4	250	—	—	—	—	± 18	± 16	—	—	41 × 35 × 13	
LEAK Eurocom	Stéréo 70	2 × 35	30 Hz— 20 kHz	0,1	—	66	2	10	2	60	oui	oui	± 16	± 16	6 kHz	oui	34 × 12 × 23
PHILIPS	RH 590	2 × 10	26 Hz— 18 kHz	0,3	—	80	3	100	—	100	oui	—	+ 16 — 14	+ 14 — 14	20 Hz— 6 kHz	oui	36 × 26 × 10
PHILIPS	RH 591	2 × 20	10 Hz— 50 kHz	0,15	—	90	3	100	—	100	oui	—	+ 16 — 16	+ 14 — 16	80 Hz— 5 kHz	oui	42 × 26 × 10
PIONEER Setton	SA 700	2 × 40	20 Hz— 40 kHz	0,1	—	100	3	200	—	200	oui	oui	+ 12 — 9	+ 12 — 9	50 Hz— 10 kHz	oui	10 × 35 × 30
REVOX	A 50	2 × 40	30 Hz— 20 kHz	0,2	74	3	—	3	50	oui	oui	± 12	± 12	100 Hz — 5 kHz	oui	—	
SANSUI Cotte	AU 777	2 × 30	20 Hz— 50 kHz	0,8	—	100	2	2	3,5	140	oui	oui	± 15	± 15	8 kHz— 80 Hz	oui	43 × 15 × 32
SCHNEIDER	Audio 5005	2 × 10	40 Hz— 20 kHz	0,4	—	58	—	—	—	oui	oui	+ 12 — 15	+ 14 — 20	—	oui	35 × 33 × 10	
SCHNEIDER	Audio 7007	2 × 20	16 Hz— 30 kHz	0,3	—	72	—	—	—	oui	oui	± 17	± 17	30 Hz— 8 kHz	oui	40 × 12 × 35	
SCIENTELEC	Elysée 15	2 × 15	20 Hz— 50 kHz	0,1	—	80	6	100	2	100	oui	oui	± 18	± 18	30 Hz— 10 kHz	oui	—
SCIENTELEC	Elysée 20	2 × 20	20 Hz— 50 kHz	0,1	80	3	50	1	100	oui	oui	± 18	± 18	30 Hz— 10 kHz	oui	40 × 27 × 8	
SCIENTELEC	Elysée 45	2 × 45	20 Hz— 50 kHz	0,1	80	3	50	1	100	oui	oui	± 18	± 18	30 Hz— 10 kHz	oui	40 × 27 × 8	
SCOTT Era	260 B	2 × 40	15 Hz— 30 kHz	0,4	—	2,8	4	—	250	oui	oui	± 12	± 10	30 Hz— 8 kHz	oui	40 × 27 × 8	
TELEFUNKEN	V 201	2 × 25	17 Hz— 30 kHz	1	—	57	7	320	5	320	oui	oui	+ 14 — 16	+ 15 — 13	60 Hz— 4 kHz	oui	47 × 15 × 33

d'un message de niveau mieux que moyen. En franchissant les divers étages d'un préamplificateur, ce faible signal atteint finalement une tension suffisante pour alimenter l'amplificateur de puissance, auquel il faut fournir des tensions audiofréquence de 500 mV à 1 V.

Dans la pratique, l'entrée d'un préamplificateur peut être commutée sur différentes sources de modulation. Par commodité, ces sources sont reliées en permanence à l'appareil. Il suffit d'agir sur le commutateur dit « sélecteur d'utilisations » pour passer d'une source à l'autre. Ces sources sont généralement un phonolecteur, un tuner de radio, un magnétophone. Le commutateur doit assurer une adaptation correcte de la sensibilité du préamplificateur au niveau délivré par la source. Ainsi, un tuner de radio peut délivrer un niveau nominal de 300 mV, alors qu'un phonolecteur magnétique, nous venons de le voir, ne délivre guère que 2 mV.

Avec un phonolecteur, les choses se compliquent du fait que la courbe amplitude-fréquence n'est ni linéaire, ni horizontale. En effet, lorsque l'on grave un disque, les fréquen-

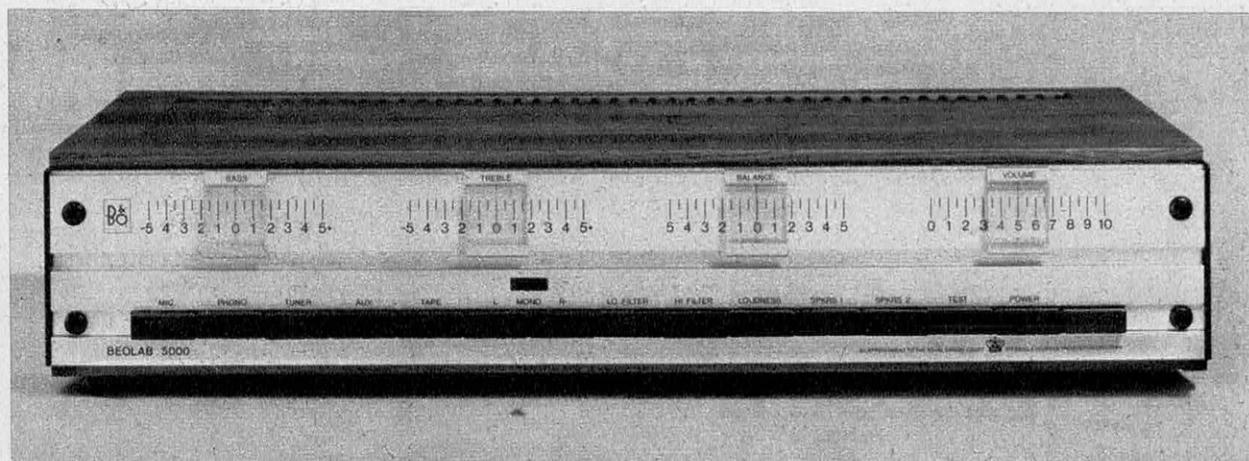
ces basses (50 à 500 Hz) sont considérablement atténuerées, surtout vers 50 Hz, et les fréquences élevées (2 000 à 15 000 Hz) considérablement relevées (surtout à 15 000 Hz). Pour lire un disque correctement, un circuit d'égalisation doit donc intervenir dans les étages initiaux du préamplificateur. Le sélecteur d'utilisations, en position « phono », se charge d'introduire ce circuit d'égalisation.

Le signal est ainsi ramené à une tension nominale de même ordre de grandeur, quelle que soit la source utilisée. Il est ensuite traité par le « filtre de ronronnement » qui coupe les fréquences inférieures à une centaine de hertz à raison de 18 dB/octave. Ce filtre « passe-haut » atténue les bruits à fréquence très basse qui peuvent être engendrés par une vibration mécanique de la table de lecture ou par tout autre défaut en provenance d'une source de modulation.

Puis viennent deux possibilités importantes de réglage dont l'usage est laissé à l'initiative de chacun. Le correcteur de « basses » permet de relever ou d'abaisser le niveau des fréquences situées en dessous de 1 000 Hz, sans agir sur



Cabasse PAS 10 TSI, 2 × 20 watts, 15 Hz-120 kHz.



Bang et Olufsen Beolab 5000, 2 × 60 watts.

cette fréquence de référence. L'action de ce correcteur atteint son plein effet vers 40 Hz. A cette fréquence, on peut aboutir à une atténuation ou, au contraire, à une remontée de l'ordre de 15 dB par rapport à la fréquence 1 000 Hz. Le *correcteur des « aiguës »* agit symétriquement pour toutes les fréquences supérieures à 1 000 Hz et atteint son plein effet vers 15 000 Hz.

Le rôle de ces deux corrections en fonction de la fréquence est d'adapter la reproduction au type de l'information sonore, de pallier un excès ou une carence imputable à la source et, surtout, de conformer l'allure de la courbe de réponse de l'ensemble électroacoustique au local, lorsque l'audition est faite par haut-parleur. On utilise également les possibilités offertes par ces réglages en fonction du niveau sonore. Il semble intéressant de relever d'autant plus les fréquences basses et élevées du spectre sonore que le niveau moyen de l'audition est faible, compte tenu de l'allure de la courbe fréquence-sensibilité de l'oreille. Certains appareils sont équipés d'un « correcteur physiologique » avec lequel les fréquences ex-

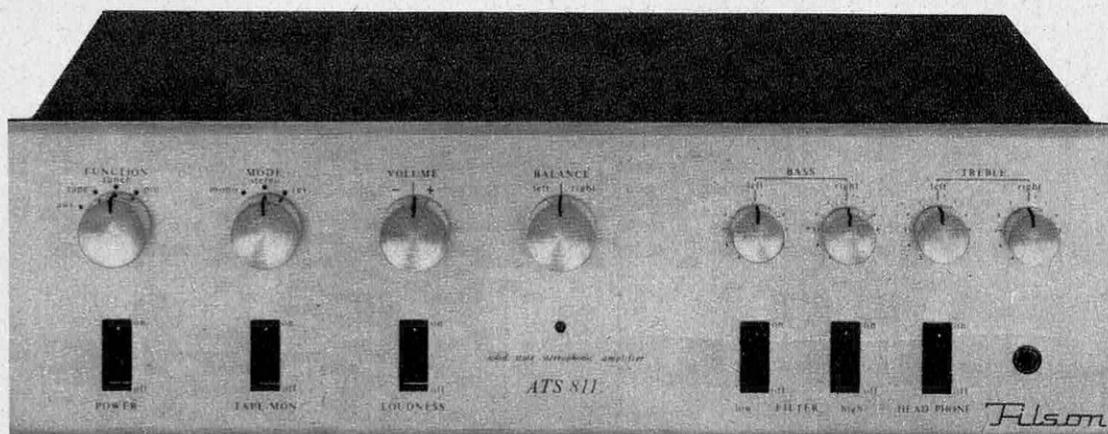
trêmes du spectre sonore se relèvent automatiquement à mesure que l'on diminue le volume sonore.

De même qu'il existe un filtre passe-haut, un filtre passe-bas (filtre de coupure) sert à atténuer brutalement (18 dB/octave) tout le spectre de fréquence supérieur à 8 000 Hz. Le filtre passe-bas permet de réduire les bruit de fond ou de souffle. Chaque filtre peut être supprimé ou rétabli par une commutation. Avec ces deux filtres à « front raide », on remédie à un rapport signal-bruit insuffisant lorsque ce bruit provient d'une source de modulation. Il ne faut pas confondre ce rapport avec le rapport signal-bruit intrinsèque de l'amplificateur de puissance et du préamplificateur, rapport souvent indiqué comme étant de 80 dB relativement à la puissance maximale nominale.

On associe souvent un magnétophone aux chaînes haute-fidélité. Pour le faire commodément, une prise permet l'insertion du magnétophone à une étape bien choisie du parcours du signal dans le système préamplificateur-amplificateur. En position enregistrement, l'entrée dite « li-



Dual CV 180, puissance 2 × 32 watts, 10 Hz-80 kHz.



Filson ATS 80, puissance 2 × 32 watts, 10 Hz-80 kHz.

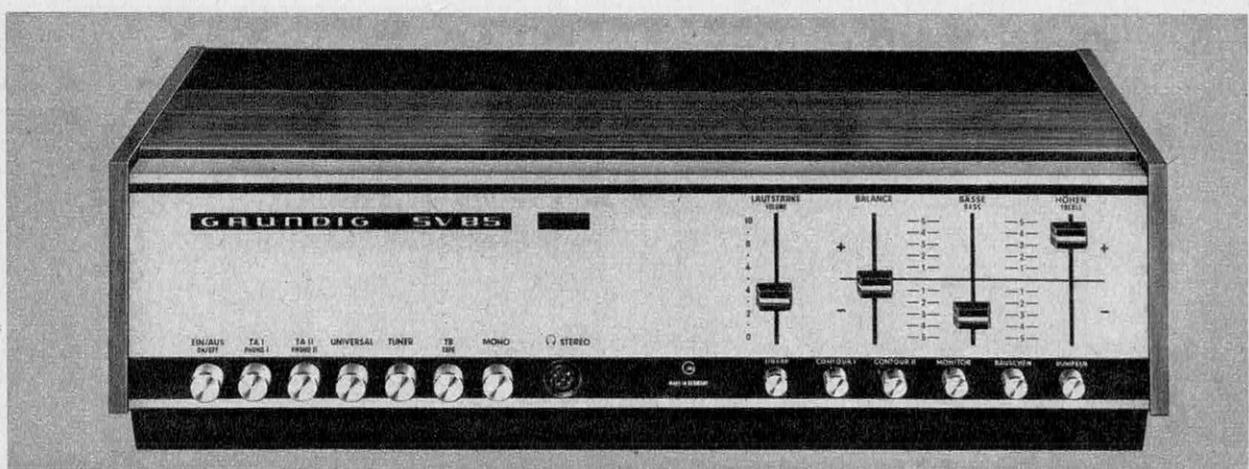
gne » du magnétophone est en parallèle sur le circuit précédent immédiatement les deux correcteurs de courbe de réponse. De cette façon, l'enregistrement sur la bande magnétique s'effectue linéairement en fréquence et à un niveau non réglé.

La sortie de l'amplificateur de lecture (elle se fait au niveau « ligne » du magnétophone), aboutit à un commutateur équipant le préamplificateur-amplificateur. Ce commutateur peut occuper deux positions. L'une d'elles assure l'écoute directe du signal venant d'une source quelconque. Tout se passe alors comme si le magnétophone n'existe pas, bien qu'il remplit discrètement son rôle d'appareil enregistreur.

L'autre position du commutateur — position « monitoring » — fait que le signal enregistré, immédiatement relu par la tête de lecture du magnétophone et amené au niveau « ligne » par l'amplificateur de lecture, est réinjecté dans le préamplificateur au point qui se situe immédiatement avant les deux correcteurs. Le délai séparant l'enregistrement de la lecture est égal à celui qu'il faut à un point de la bande

magnétique pour franchir l'espace séparant la tête d'enregistrement de celle de lecture, c'est-à-dire une fraction de seconde. L'audition « par retour de la bande », comme on dit, peut évidemment être traitée par les correcteurs et le filtre passe-bas.

Si l'amplificateur ne devait comporter qu'un seul réglage, ce serait évidemment celui de volume sonore. Ce réglage est assuré par un potentiomètre à variation logarithmique, la sensation de volume sonore augmentant (ou diminuant) proportionnellement à la rotation que l'on imprime au bouton de réglage, au moins pour un potentiomètre à bouton rotatif. On tend maintenant à adopter des potentiomètres à curseur effectuant un déplacement rectiligne ; ils « font » plus « professionnel », rappelant le matériel des studios de prise de son. Souvent, les amplificateurs comportent une prise pour casque d'écoute, particulièrement appréciée des mélomanes (et des professionnels). Malgré son caractère austère et anti-familial, le casque est le moyen suprême de jouir pleinement des vertus de la stéréophonie.



Grundig SV 85, 2 × 30 watts, 20 Hz - 20 kHz.



Pioneer SA 700, 2 × 40 watts, 20 Hz-20 kHz.

A propos de stéréophonie, il est temps d'indiquer que la quasi-totalité des « chaînes » pour le grand public sont stéréophoniques. Elles comportent deux systèmes complets en tous points analogues à celui que nous venons d'examiner. Les préamplificateurs-amplificateurs stéréophoniques possèdent, en double, les réglages déjà mentionnés. Certains, comme celui de volume sonore, se font toutefois en une seule manœuvre grâce à un couplage mécanique ou électrique d'un canal à l'autre. Sont également couplés le sélecteur d'utilisation du canal A avec celui du canal B, les filtres passe-haut et passe-bas, le correcteur physiologique, et parfois les deux correcteurs de courbe de réponse.

En revanche, la stéréophonie appelle quelques commutations supplémentaires : celle du « mode de fonctionnement », commutation permettant l'interversion des deux canaux ; et le fonctionnement en « mono » ou en « stéréo », les deux chaînes d'amplification pouvant travailler en parallèle à partir d'une source monophonique. Le volume sonore se règle à l'aide d'un

seul bouton, mais un réglage « balance » entre les deux canaux permet d'équilibrer le niveau d'un canal à l'autre.

L'alimentation se fait à partir du secteur, dont le courant alternatif doit être converti en courant rigoureusement continu. Les amplificateurs à transistors fonctionnant à l'aide de fortes variations d'intensité, leur alimentation doit être parfaitement stabilisée.

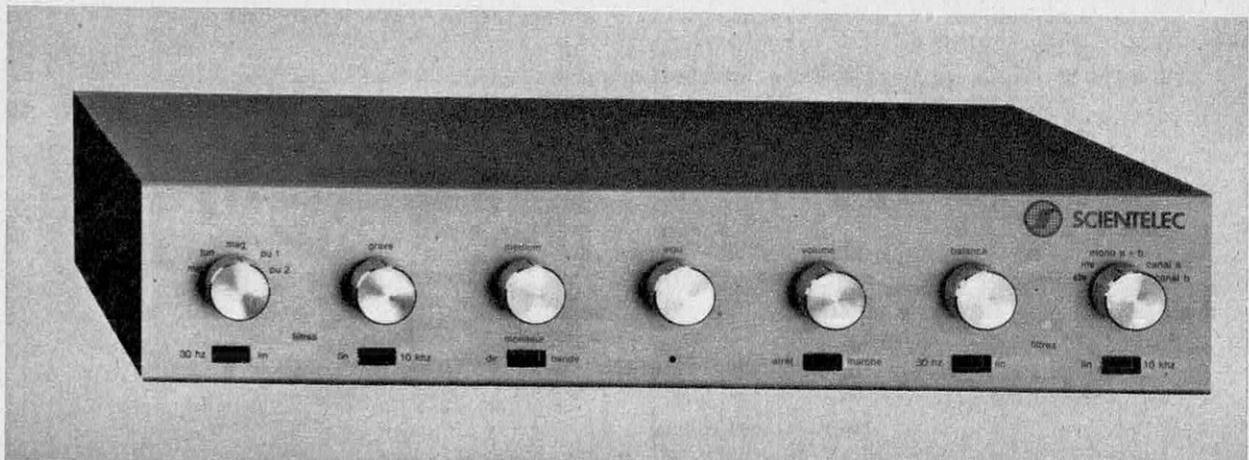
Outre leurs qualités foncières, les amplificateurs mis à la disposition du grand public ont, leur diffusion aidant, acquis une présentation qui leur est propre. Leur « design » tire son élégance d'une parfaite concordance entre le fonctionnel et le dépouillement des lignes.

Ce style est maintenant si bien assimilé qu'il n'a pas été sans réagir sur la présentation d'objets sans rapport avec l'amplification. Le tableau de bord des voitures et les rangées de robinets des cuisinières à gaz s'y apparentent d'une manière évidente. Ainsi va l'esthétique industrielle.

Guillaume COZANET



Revox A 50, 2 × 40 W, 30 Hz-20 kHz.



Scientelec Elysées 20, 2 × 20 watts, 20 Hz-50 kHz.

TUNERS ET STEREOPHONIE

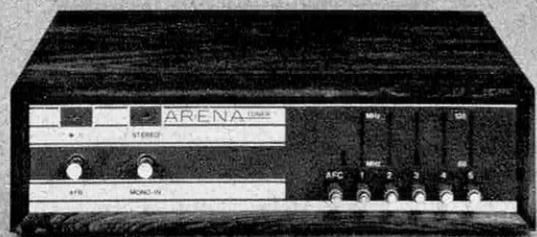
En tournant le bouton de son récepteur à modulation de fréquence, l'usager ne se doute guère de la complexité du mécanisme de la transmission ; il ne capte qu'une station d'émission et, pourtant, il perçoit deux voies sonores distinctes.

Autrefois, lorsqu'on voulait reconstituer une structure sonore à deux dimensions, de telle sorte que l'auditeur puisse distinguer les bruits venant de droite de ceux venant de gauche, on faisait appel à deux stations différentes ; un émetteur rayonnait la prise de son issue d'un microphone orienté vers la droite ; l'autre était réservé à la voie de gauche.

Aujourd'hui, on sait grouper, sans les mêler, deux informations sonores transmises sur une même longueur d'onde, grâce au procédé de la « sous-porteuse pilote », dû aux ingénieurs américains de la *Zenith Radio Corporation*.

Pour en saisir le fonctionnement, il faut connaître le processus de modulation d'une *porteuse haute-fréquence* par un *spectre d'audiofréquence*.

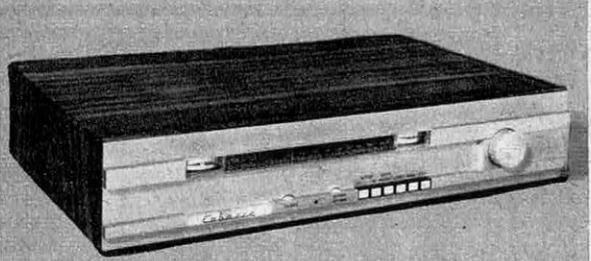
La « porteuse » est l'onde sur la longueur de laquelle l'auditeur accorde son récepteur. Quant au spectre d'audiofréquence, c'est celui que notre oreille établit à chaque instant en discernant des sons de hauteur et de tonalité différentes. Dans une émission monophonique normale, la porteuse, issue d'un maître-oscillateur de grande précision, reçoit, dans un appareil appelé modulateur, le spectre sonore traduit en variations électriques, soit par un microphone, soit par un lecteur de disques ou de bandes magnétiques. La porteuse n'est qu'un support véhiculant à travers l'espace l'information utile. Quand l'onde porteuse est modulée « en amplitude », la puissance de l'émission varie au rythme de celle du son à retransmettre. Si, au moyen d'un analyseur de fréquence, on étudie le spectre réellement rayonné par la station, on trouve, de part et d'autre de la fréquence porteuse, des composantes symétriques d'autant plus éloignées que la hauteur du son à retransmettre est elle-même plus élevée : ce sont les bandes latérales. A la réception, il conviendrait de respecter intégralement ces bandes latérales ; mais les récepteurs étant trop sélectifs, les



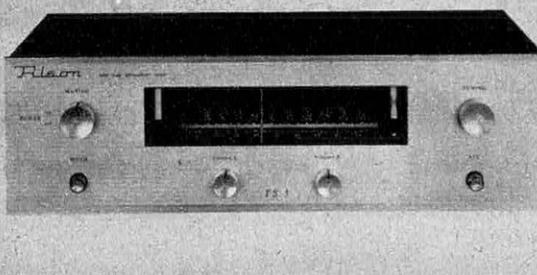
Arena F 214, sensibilité 3 microvolts



Audiotronic T 832, 5 stations préréglées



Cabasse FMT, sortie 770 millivolts



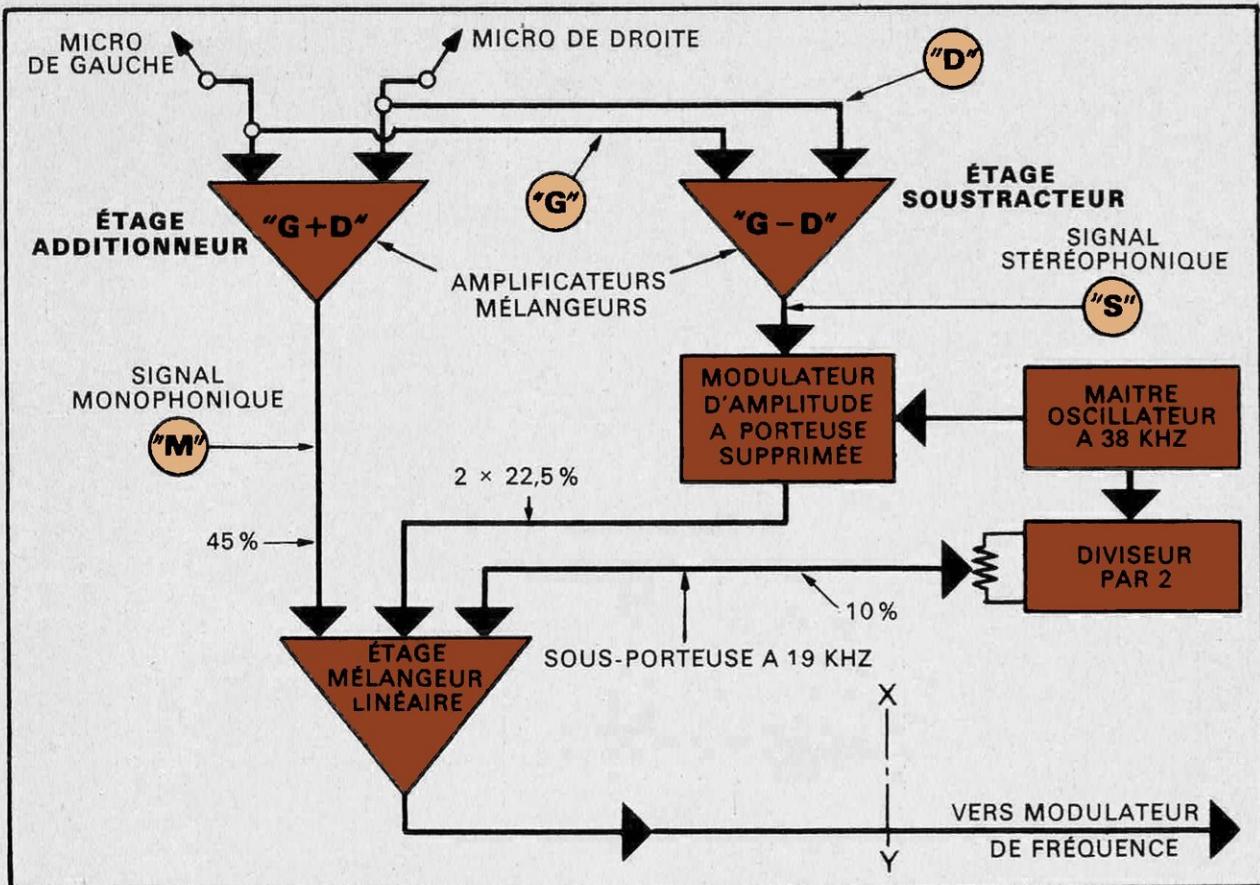
Filson TS 5, sensibilité 1 microvolt



Tuner Revox A 76, sortie 2 volts

LES TUNERS

CONSTRUCTEUR Importateur	Type	FM seulement	Sensi- bilité FM (micro- volts)	Bruit de fond (décibels)	Antenne	Dia- phonie en stéréo (déci- bels)	Niveau de sortie (millivolts)	Réglage
ARENA Universal Audio	F 214	oui	3	50 (pour 4 µV)	extérieure 75 ohms	30	700	5 stations préréglées
ARENA Universal Audio	F 211	oui	2,5	50 (pour 4 µV)	extérieure 75 ohms	35	—	5 stations préréglées
AUDIOTECHNIC	T 832	oui	1	60 (pour 10 µV)	extérieure 75 ohms	36	réglable	—
B ET O Vibrasson	Beolet 5000	oui	0,8	20 (pour 0,8 µV)	extérieure 75/300 ohms	40	réglable	—
BARTHE	TR 22	oui	1	26 (pour 1 µV)	extérieure 75/300 ohms	30	réglable	—
BRAUN Major Electronic	CE 251	oui	1	30 (pour 1 µV)	extérieure	35	fixe	—
BRAUN Major Electronic	CE 501 K	FM, GO, PO, OC	1	30 (pour 1 µV)	extérieure	35	fixe	—
CABASSE	FMTS	oui	3	—	extérieure 75/300 ohms	40	770	—
CARAD Cami	T 51	oui	1	26 (pour 1 µV)	extérieure 3 000 ohms	—	fixe	—
DUAL Carobronze	CT 16	FM, GO, PO, OC	1,5	26 (pour 1,5 µV)	extérieure 240 ohms	45	800	3 stations préréglées
ESART	FM Caisson	oui	0,7	26 (pour 0,7 µV)	extérieure	40	1 000	—
FILSON	TS 5	oui	1	26 (pour 1 µV)	extérieure	45	réglable	—
GOODMANS Mageco Electronic	Stereomax	oui	2	30 (pour 2 µV)	extérieure 75/300 ohms	38	réglable	—
HITONE	H FMTS	oui	0,8	40 (pour 2 µV)	extérieure 75 ohms	48	2 000	—
KONTACT	KM 67	FM, GO, PO, OC	1	65	extérieure	—	1 500	—
MARANTZ Radio Commercial	20	oui	2	70	extérieure	45	1 000	—
PHILIPS	RH 691	FM, GO, PO, OC	7	26 (pour 7 µV)	extérieure	35	1 400	—
REVOX Revox France	A 76	oui	1	70	extérieure 60/240 ohms	—	2 000	—
SANSUI Cotte	TU 777	oui	1,4	65 (pour 100 µV)	extérieure 75/300 ohms	35	fixe	—
SCHNEIDER	Techno 5005	FM, GO, PO, OC	1,2	—	extérieure 750 ohms	—	1 500	—
SCHNEIDER	Techno 7007	FM, GO, PO, OC	1,2	—	extérieure 75 ohms	—	1 500	3 stations préréglées
SCIENTELEC	Concorde	FM, GO, PO, OC	0,6	40 (pour 3 µV)	extérieure 75/300 ohms	25	600	—
SCIENTELEC	Vendôme	oui	1	30 (pour 2 µV)	extérieure 75 ohms	25	700	3 stations préréglées
TELEFUNKEN	T 201	FM, GO, PO, OC	1,2	26 (pour 1,2 µV)	incorporée et extérieure 240 ohms	26	900	—
THORENS Dietrichs	2000	oui	1,5	50	extérieure	66	600	—



Le codage «stéréo» en modulation de fréquence avec sous-porteuse «pilote»

«aigus» sont progressivement atténus et l'écoute ne peut se faire fidèlement. Dans les gammes en «modulation de fréquence» (MF), c'est la fréquence instantanée qui change au rythme de l'amplitude sonore. (On se rappelle que la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde.)

On utilise en MF des fréquences très élevées, de l'ordre de 100 MHz, de sorte que les problèmes de sélectivité se trouvent résolus et l'écoute devient «à haute fidélité». Les circuits employés dans ces récepteurs présentent une sélectivité moins grande que dans les récepteurs traditionnels; les variations de la dynamique sonore sont fidèlement transmises à l'oreille de l'auditeur. Si l'on veut reconstituer un son d'une grande pureté musicale, il convient toutefois de respecter scrupuleusement l'excursion de fréquence de la porteuse. La gamme MF employée (87 à 108 MHz), se prête à cette exigence.

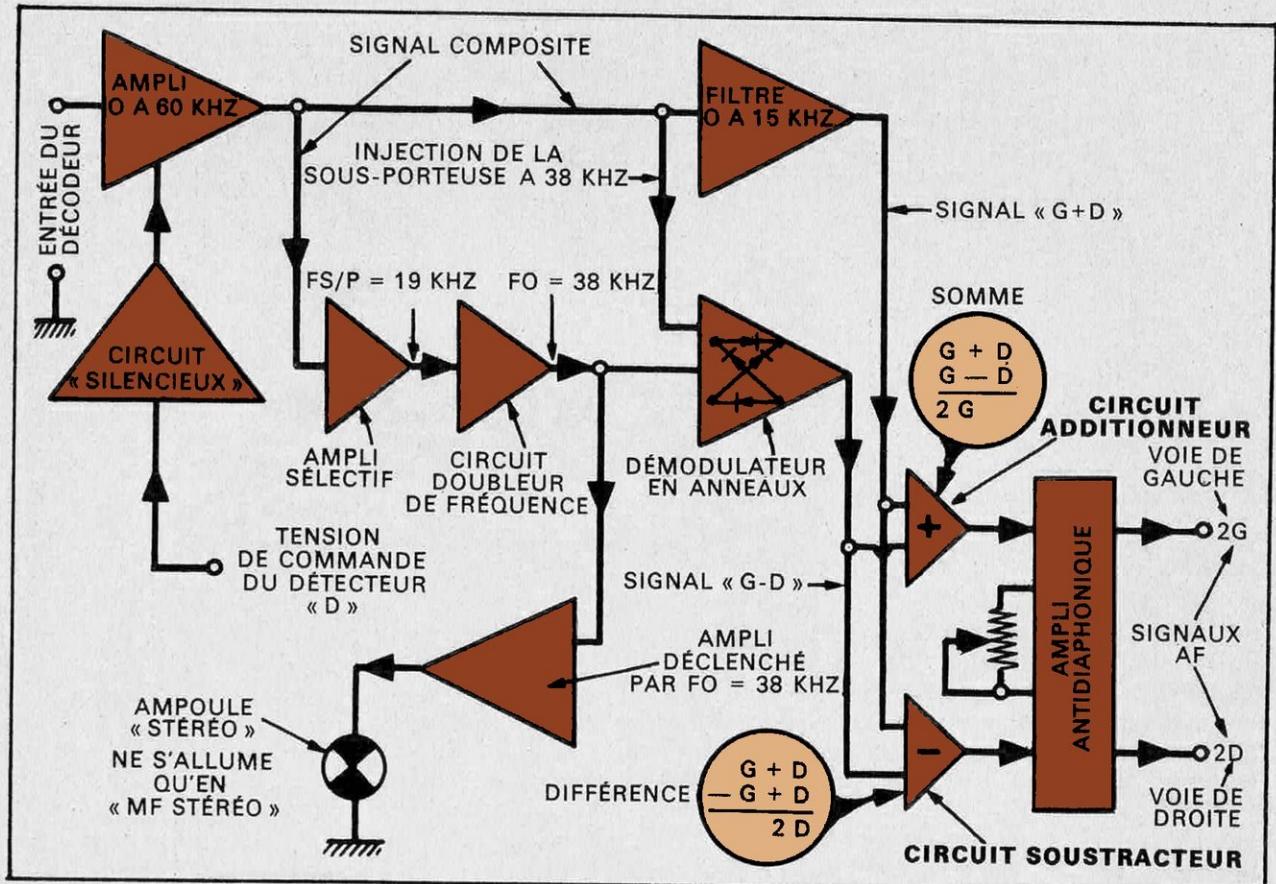
Le codage en stéréophonie

En modulation de fréquence, la porteuse vibre en fréquence plus ou moins forte selon l'amplitude de la séquence musicale et plus ou moins vite selon la hauteur du son retransmis. Rien ne semble limiter a priori cette vitesse de vibration, alors qu'on conçoit aisément

une limite à l'excursion en fréquence. (En France cette excursion ne dépasse pas ± 75 kHz, de sorte que la dynamique des séquences musicales se trouve nécessairement comprimée, moins toutefois qu'en modulation d'amplitude.)

L'astuce du codage stéréophonique réside dans le fait qu'on ajoute au spectre sonore, après les sons les plus aigus, une information à partir de laquelle il devient possible de reconstituer le relief sonore. On transmet un spectre complexe qui comporte, de 0 à 15 kHz, toutes les nuances de sons audibles et, au-delà, une sous-porteuse caractérisant une deuxième voie. Les signaux électriques fournis par les microphones débouchent, d'une part, sur un circuit additionneur «G + D», d'autre part sur un circuit soustracteur «G - D». Du premier, sort le signal monophonique «M» qui va occuper la bande de 0 à 15 kHz du spectre audiofréquence. Un tuner ordinaire, c'est-à-dire non équipé pour la stéréophonie, ne reçoit que cette bande de fréquence.

Du circuit soustracteur sort un signal de différence «S», de faible amplitude si les sons arrivent en phase aux microphones, et d'amplitude égale à celle de «M» si les sons frappent les capteurs acoustiques en opposition de phase. Cette composante, absolument inau-



A la réception, les signaux sont décodés pour reconstituer, en particulier, les voies droite et gauche

durable, est soumise à un modulateur spécial dont la sous-porteuse à 38 kHz se supprime automatiquement, afin de ne pas gaspiller de l'énergie pour la transmission. Cette modulation d'amplitude sans porteuse se présente sous la forme de bandes latérales qui s'étendent à $\pm 15 \text{ kHz}$ de la fréquence centrale supprimée (donc de 23 à 53 kHz). Comme il serait

très délicat de reconstituer à la réception, à partir de ces bandes latérales, la différence « S », on intercale, entre la fréquence la plus élevée du signal « M » et la fréquence la plus basse de la première bande latérale, une partie de sous-porteuse à 19 kHz, fréquence égale à la moitié de celle de la sous-porteuse supprimée. Un mélangeur linéaire additionne

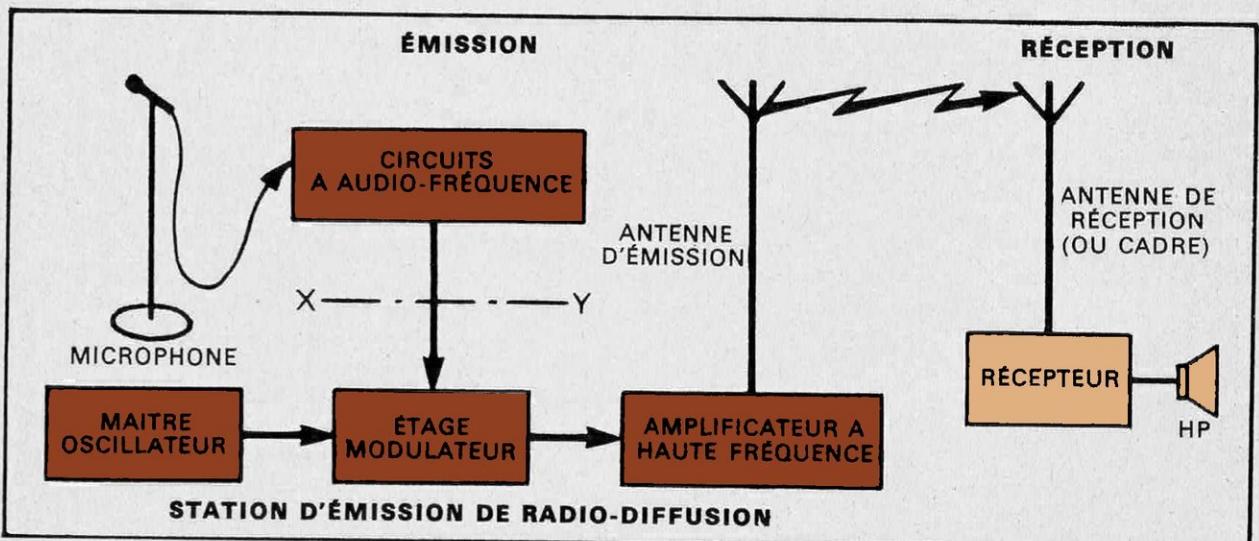
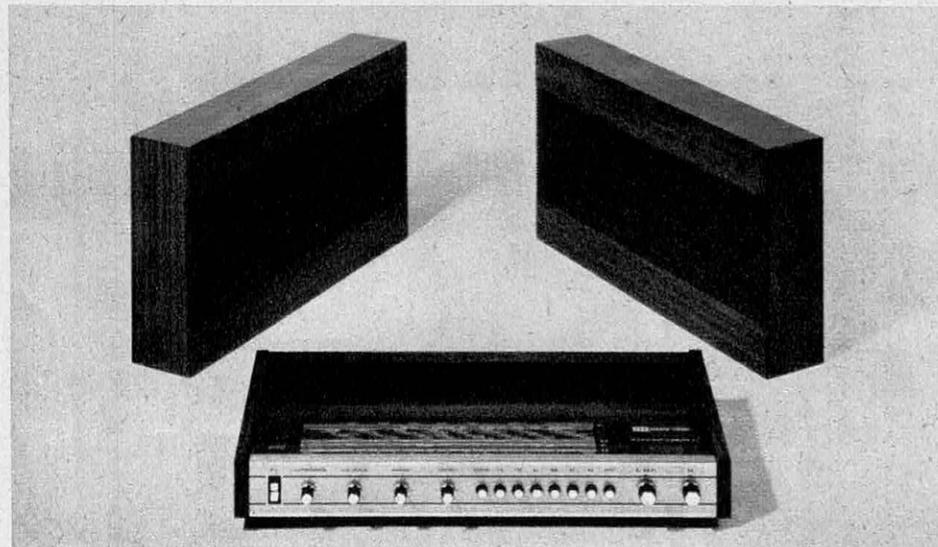


Schéma analytique de la transmission hertzienne à modulation d'amplitude ou modulation de fréquence

Ampli-tuner LMT
Stéréo 4 000,
 2×18 watts,
bande passante
40 Hz - 17 kHz,
réception
FM, GO, PO, OC



le tout avant d'appliquer ce spectre composite au modulateur de fréquence. Au cours d'une séquence musicale, les signaux « M » et « S » occupent respectivement 45 % et $2 \times 22,5\%$ de l'excursion modulante ; les 10 % qui restent sont réservés à la sous-porteuse résiduelle à 19 kHz. Toutefois, lorsque l'effet stéréophonique est nul, l'amplitude des bandes latérales disparaît alors que celle du signal « M » grimpe à 90 %. Au contraire, lorsque l'effet stéréophonique est maximum, c'est le signal « M » qui s'annule, tandis que les bandes latérales montent à 45 %.

Analyse de la réception

L'antenne est un élément trop souvent méprisé dans la chaîne de transmission, alors qu'on devrait l'installer avec un soin méticuleux. Un bout de fil traînant derrière un meuble est une hérésie. L'antenne sur le toit est conseillée si l'on veut tirer tout le parti possible de la stéréophonie.

Une tête VHF⁽¹⁾ composée d'un étage préamplificateur, d'un oscillateur « local » et d'un étage « changeur de fréquence » transforme la porteuse à 100 MHz en une fréquence intermédiaire de 10,7 MHz, plus facilement amplifiable.

L'amplificateur est à très grand gain, de telle sorte qu'il attaque à fort niveau le système démodulateur. En chemin, un étage « écrêteur » supprime toute modulation d'amplitude, éliminant ainsi les parasites et ne conservant que la modulation de fréquence. C'est ce qui explique la pureté de la transmission MF. Le détecteur « D » (système démodulateur) fournit deux composantes :

— le signal composite « M + S »,

— une tension de commande qui n'apparaît en plus ou en moins que si l'accord du tuner sur la fréquence de la station est mal fait. C'est le *contrôle automatique de fréquence* ou « CAF », qui agit directement sur la fréquence de l'oscillateur local. Avec un tel circuit, l'usager n'a qu'à se rapprocher de la station désirée pour que le poste secale automatiquement sur la bonne fréquence.

Le signal composite est soumis au décodeur, qui en extrait les signaux de gauche « G » et de droite « D » ; les amplificateurs de puissance les orientent vers les haut-parleurs correspondants.

Comment fonctionne le décodeur ?

Le signal composite est, avant tout amplifié et filtré. (Un réseau de désaccentuation réduit l'importance des aigus, fréquences très relevées à l'émission afin de les rendre prépondérantes sur le bruit de fond des récepteurs.) Un étage d'amplification sélective sélectionne tout d'abord la composante à 19 kHz. Un doubleur de fréquence la transforme en sous-porteuse à 38 kHz. On la mélange judicieusement avec les bandes latérales du spectre composite et des démodulateurs en anneaux en extraient la différence « S = G — D ».

Là, commence le matriçage avec la bande de fréquence « M = G + D » : les signaux « M » et « S » sont appliqués simultanément sur des circuits additionneur et soustracteur qui délivrent la somme et la différence : M + S = 2 G et M — S = 2 D, nettement séparées. On conçoit que l'équilibrage des mélanges n'est correct que pour des amplitudes précises des signaux « S » et « M ». Une technologie stable et bien élaborée, une mise au point parfaite s'imposent, d'où le prix relativement élevé des tuners « MF stéréo ».

Un étage antidiaphonique fournit enfin les

(1) V.H.F. = Very High Frequency = très haute fréquence (gamme des fréquences comprises entre 30 et 300 MHz environ).

signaux de gauche et de droite que les amplificateurs augmentent en puissance avant de les orienter vers les haut-parleurs.

On peut même alors ajouter un voyant qui, alimenté par la tension précédente, indique que l'accord est convenablement réalisé.

Les performances du tuner M.F. « stéréo »

L'usager qui consulte les notices techniques des constructeurs se trouve souvent noyé par une abondance de caractéristiques et de chiffres plus ou moins ésotériques. Pour l'aider à s'y retrouver, voici quelques explications.

Nous allons commencer par l'antenne, pour terminer par les sorties « G » et « D ».

Impédance d'entrée. — C'est la caractéristique de la descente d'antenne. Lorsque la liaison est coaxiale, c'est-à-dire blindée, elle est de 75 ohms (Ω). Une descente bifilaire se fait à 300 Ω . La liaison coaxiale est dissymétrique, son blindage la protège des inductions parasites (moteurs de réfrigérateurs, étincelles des voitures, etc.). Son rendement est parfois moins grand que celui de la descente à 300 Ω , qui véhicule des tensions deux fois plus élevées.

Sensibilité. — C'est la tension minimum que l'on doit appliquer pour obtenir sur les haut-parleurs une puissance « utilisable ». Celle-ci a été fixée arbitrairement à 50 mW ; elle peut être qualifiée d'« utilisable » dans la mesure où le bruit de fond est négligeable. Plus cette tension minimum est basse, meilleur est l'appareil, car sa portée de captation des émetteurs éloignés est plus grande. On est plus exigeant en modulation « stéréo » qu'en monophonie, car le décodeur ajoute son propre bruit... En monophonie, 1 à 3 microvolts sont des chiffres courants, mais il faut compter sur 5 à 10 V pour la « stéréo ».

Quand le tuner est vendu sans amplificateur d'audiofréquence, la référence précédente de 50 mW est remplacée par la tension nominale de sortie (0,1 à 0,5 V selon les modèles).

Rapport signal/bruit. — Cette notion accompagne généralement la sensibilité. Elle exprime, pour la tension d'attaque, le rapport entre le signal utile et le bruit de fond. Il est chiffré en dB, soit 20 fois le logarithme du rapport des tensions. Pour la sensibilité, on donne en principe 26 dB (rapport de 20). Un fonctionnement normal, pour une réception locale, requiert au moins 40 dB (rapport de 100). L'attaque atteint alors plusieurs dizaines de microvolts : plus la tension captée est grande, meilleur est le rapport signal/bruit.

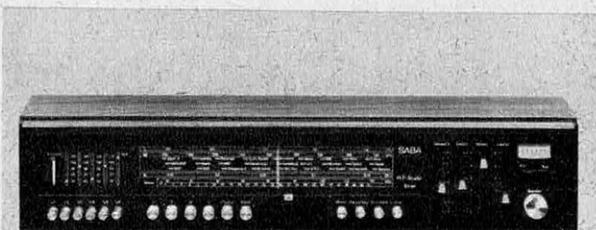
Sélectivité. — L'amplification à fréquence intermédiaire englobe toute l'excursion de fré-



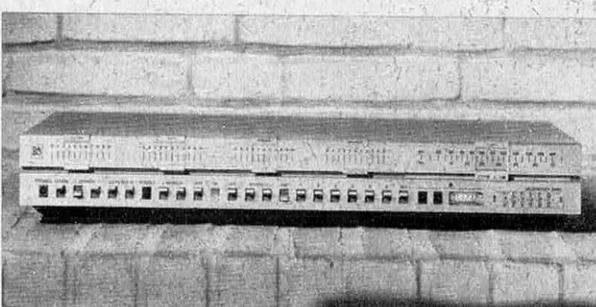
Ampli-tuner Hi-Tone 6 000 T



Ferguson 3 403, 2 × 15 watts



Saba 8 040, 2 × 15 watts, 10 Hz - 30 kHz



Beomaster 3 000, 2 × 30 watts



Philips RH 790, 2 × 20 watts

AMPLIFICATEURS A TUNER INCORPORÉ

CONSTRUC-TEUR Importateur	Type	Puissance efficace (W)	Bande passante à puissance maximum	Distortion	Entrées (mV)				Sorties		Efficacité réglages (dB)		Filtres de coupure	Monitoring
					PU magnétique	PU céramique	Microphone	Auxiliaire	Enregistrement	Casque	graves	aigus		
ARENA Universal Audio	T 2700	2 x 25	25 Hz — 40 kHz	0,6 %	—	150	—	150	oui	—	+ 13 — 15	+ 12 — 11	30 Hz	oui
ARENA Universal Audio	T 9000	2 x 75	10 Hz — 25 kHz	0,5 %	3	150	1,5	150	oui	—	+ 13 — 15	+ 12 — 11	120 Hz 7 kHz	oui
B et O Vibrasson	Beomaster 1200	2 x 15	30 Hz — 40 kHz	1 %	4	200	—	200	oui	—	+ 17 — 18	+ 14 — 13	—	oui
B et O Vibrasson	Beomaster 1400 M	2 x 15	30 Hz — 25 kHz	1 %	4	200	—	100	oui	—	+ 10 — 16	+ 13 — 16	—	oui
B et O Vibrasson	Beomaster 1000	2 x 15	30 Hz — 25 kHz	1 %	4	200	—	200	oui	—	+ 10 — 17	+ 12 — 16	—	oui
B et O Vibrasson	Beomaster 3000	2 x 30	40 Hz — 20 kHz	1 %	4	250	—	250	oui	oui	± 17	± 14	80 Hz 4 kHz	oui
BLAUPUNKT	Florenz	2 x 40	10 Hz — 20 kHz	0,5 %	2	200	2	200	oui	—	+ 14 — 18	± 12	30 Hz 6 kHz	oui
BRAUN Major Electronic	Régie 501	2 x 30	30 Hz — 30 kHz	0,5 %	2	315	20	—	oui	oui	± 12	± 12	oui	oui
DUAL Carobronze	CR 40	2 x 16	20 Hz — 30 kHz	0,3 %	3	400	—	400	oui	—	± 14	± 14	—	oui
FERGUSON Universal Electronics	3403	2 x 15	30 Hz — 20 kHz	0,3 %	6,8	220	—	20	oui	oui	± 14	+ 12 — 15	—	oui
FERGUSON Universal Electronics	3415	2 x 30	30 Hz — 20 kHz	0,1 %	2	—	—	—	oui	oui	—	—	30 Hz 6 kHz	oui
HI TONE	6000 T	2 x 30	18 Hz — 45 kHz	—	2	—	1,5	40	oui	—	± 15	± 12	—	oui
KENWOOD Young Electronic	TK 140 X	2 x 55	20 Hz — 30 kHz	0,5 %	2	100	—	160	oui	oui	± 10	± 10	100 Hz 10 kHz	oui
LMT Schaub Lorenz	Stéréo 4000	2 x 18	40 Hz — 17 kHz	1 %	4	7	—	200	oui	—	± 17	± 17	30 Hz	oui
LMT Schaub Lorenz	Stéréo 5000	2 x 25	15 Hz — 40 kHz	0,1 %	4	7	—	200	oui	—	± 18	± 18	30 Hz	oui
NORDMENDE Cami	8001	2 x 30	20 Hz — 20 kHz	1 %	—	—	—	—	oui	oui	± 30	± 20	30 Hz 10 kHz	oui
PHILIPS	RH 790	2 x 20	10 Hz — 50 kHz	0,5 %	4	80	—	80	oui	—	+ 16 — 14	± 14	—	—
PIONEER Setton	SX 1500 TD	2 x 70	10 Hz — 100 kHz	0,5 %	3,3	24	3,2	200	oui	oui	+ 11 — 16	+ 10 — 9	50 Hz 10 kHz	oui
SABA Driva	8040	2 x 15	10 Hz — 30 kHz	0,1 %	2,6	50	—	200	oui	—	± 15	± 15	60 Hz 8 kHz	oui
SABA Driva	8080	2 x 30	10 Hz — 30 kHz	0,1 %	2,5	45	—	250	oui	—	± 15	± 15	60 Hz 8 kHz	oui
SANSUI Cotte	5000 A	2 x 75	15 Hz — 30 kHz	0,8 %	2,5	—	—	150	oui	oui	± 11	± 12	50 Hz 10 kHz	oui
SCOTT Era	3141	2 x 22	18 Hz — 25 kHz	0,8 %	2,8	4	—	350	oui	oui	—	—	—	oui
TANDBERG Barthe	HI FI FM	2 x 15	30 Hz — 25 kHz	1 %	—	—	—	—	oui	—	± 15	± 12	—	oui
TELEFUNKEN AEG Telefunken	Concertino	2 x 10	20 Hz — 20 kHz	1 %	—	—	—	—	oui	—	+ 20 — 5	+ 9 — 12	—	oui
WEGA Eurocom	3105	2 x 20	20 Hz — 25 kHz	1 %	2	230	—	300	oui	—	± 18	± 16	—	oui

Gamme de réception	Sensibilité FM (signal/bruit)	Diaphonie en stéréo (dB)	Accord	Dimension (cm)
FM	1,5 µV (30 dB)	35	par cadran 5 stations prérégées	—
FM PO GO	2 µV (30 dB)	35	par cadran	15 × 52 × 30
FM PO GO	1,5 µV (26 dB)	35	par cadran 3 stations prérégées	8 × 55 × 21
FM PO GO OC	2 µV (26 dB)	40	par cadran 4 stations prérégées	12 × 42 × 26
FM	2 µV (26 dB)	30	par cadran stations prérégées	51 × 9 × 26
FM	2 µV (26 dB)	—	par cadran 6 stations prérégées	10 × 26 × 53
FM	1 µV (26 dB)	30	par cadran	58 × 19 × 35
FM PO GO	1 µV (26 dB)	35	par cadran	40 × 11 × 32
FM PO GO OC	1,5 µV (26 dB)	45	par cadran 3 stations prérégées	42 × 11 × 29
FM	1 µV	35	par cadran 5 stations prérégées	56 × 100 × 25
FM	2 µV (26 dB)	35	par cadran stations prérégées	56 × 30 × 10
FM	2 µV	—	par cadran	—
FM	2 µV	35	par cadran	40 × 13 × 30
FM PO GO OC	3 µV	—	par cadran	55 × 8 × 28
FM PO GO OC	2 µV	—	par cadran	55 × 28 × 8
FM PO GO OC	—	36	par cadran 5 stations prérégées	50 × 16 × 35
FM PO GO OC	8 µV (26 dB)	—	par cadran	52 × 26 × 10
FM PO	2 µV (60 dB)	38	par cadran	45 × 13 × 35
FM PO GO OC	1,5 µV (30 dB)	32	par cadran 5 stations prérégées	61 × 14 × 30
FM PO GO OC	1,5 µV (30 dB)	50	par cadran 5 stations prérégées	61 × 14 × 30
FM PO	1 µV (20 dB)	35	par cadran	43 × 10 × 35
FM PO GO OC	2 µV (30 dB)	40	par cadran	38 × 13 × 30
FM	1 µV	—	par cadran 5 stations prérégées	40 × 14 × 22
FM PO GO OC	1,5 µV (26 dB)	26	par cadran 5 stations prérégées	62 × 17 × 19
FM PO GO OC	2,5 µV (26 dB)	35	par cadran 5 stations prérégées	60 × 12 × 26

quence de la porteuse. Comme celle-ci s'élève à ± 75 kHz, dans les cas extrêmes, le sommet de la *courbe de sélectivité* (2) sera plat sur 150 kHz, au moins. Ceci correspond à une bande passante évidemment plus large : pour une atténuation de 3 dB du gain de l'amplificateur, la longueur de bande atteindra 280 kHz au moins.

Cette bande passante doit inclure, en effet, le spectre fort complexe équivalant à la vibration de la porteuse pour la fréquence la plus élevée à retransmettre. A mesure qu'on rétrécit cette bande au-dessous de 280 kHz, le signal démodulé s'accompagne de distorsion harmonique, déformation qui s'apparente à un écrêtage des fortes dynamiques sonores. *Distortion*. — Elle résulte directement du phénomène précédent et s'exprime en pourcentage de signaux parasites vis-à-vis du signal utile. Pour une bande passante des circuits à fréquence intermédiaire égale à 280 kHz et pour une *courbe de discrimination* (3) parfaitement linéaire sur ± 75 kHz, ce taux reste bien inférieur à 1 %. Il croît à mesure que la bande passante ci-dessus diminue, mais sans effet catastrophique tant qu'elle reste égale ou supérieure à 240 kHz. Au-dessous, cela peut devenir gênant.

Dans tous les cas, la courbe de discrimination doit rester absolument linéaire sur ± 75 kHz, sans quoi les risques de déformation s'accroissent très vite.

On ne confondra pas ce taux de distorsion avec celui qui est propre aux circuits « basse fréquence » des amplificateurs d'audiofréquences.

Diaphonie. — Dans le processus de décodage au niveau du récepteur, si une partie des sons de gauche passe dans le canal de droite et inversement, le relief sonore disparaît peu à peu, surtout sur les aigus.

Ce mélange intempestif est la *diaphonie*. On le retrouve au téléphone lorsqu'on entend en fond sonore une voix autre que celle de l'interlocuteur. L'absence de diaphonie mesure le sérieux avec lequel le décodeur a été mis au point : on l'exprime aussi en dB ; son niveau doit avoisiner 40 dB.

Il décroît, hélas, un peu, pour les composantes élevées du spectre sonore.

Mais dans ce domaine comme dans beaucoup d'autres, l'évolution de la technique reste prometteuse : de beaux jours semblent réservés à la stéréophonie.

Roger Ch. HOUZÉ

(2) Variation relative de gain de part et d'autre de la fréquence centrale (10,7 MHz).

(3) Réponse en tension du détecteur « D » en fonction de la dérive de fréquence autour du point central de 10,7 MHz.

LES ENCEINTES ACOUSTIQUES

Le transducteur électroacoustique, qui traduit les signaux électriques à audiofréquence en leur correspondant acoustique audible, joue, dans notre monde actuel de la communication et de l'information, un rôle capital. Il est, en effet, en dehors du « direct », le seul moyen d'expression de tout ce qui est sonore. Et pourtant, depuis plus de quarante ans, il fait toujours appel (à quelques rares exceptions près) au principe électrodynamique. Le haut-parleur est envisagé, dans cet article, en tant que « groupe haut-parleur » complet, c'est-à-dire monté en une enceinte acoustique, qui peut d'ailleurs comprendre plusieurs haut-parleurs élémentaires spécialisés, avec filtres de répartition : fréquences graves et aiguës, lorsqu'il s'agit d'un groupe à deux voies (formule qui tend à se généraliser aujourd'hui, en place du seul diffuseur « solo » à large bande) ; ou encore à trois voies, se partageant les fréquences graves, médianes, et extrême-aiguës. Tel est donc le schéma général des groupes haut-parleurs du type qui a été retenu ici : de classe *haute-fidélité* et à *usage domestique*.

Cet engin devient un véritable produit de consommation, les modèles les plus modestes, d'une qualité plus qu'honorables, étant devenus accessibles à tous.

Si le mécanisme fondamental est demeuré immuable, l'évolution générale, non seulement technologique et acoustique, mais encore artistique et sociale, porte sur un nombre de facteurs assez élevé pour que l'on puisse parler de progrès très sensibles.

L'amélioration des matériaux

Avant tout, c'est l'amélioration des matériaux de base, actuellement à la disposition des constructeurs, qui a permis de faire un pas en avant décisif, conjointement avec le perfectionnement constant des procédés de fabrication. Les *aimants céramiques* (« ferrites »), se substituant de plus en plus aux aimants métalliques classiques, conduisent à l'obtention, pour un moindre coût (et, accessoirement, un moindre encombrement en profondeur), de champs magnétiques plus élevés. En revanche, en ce qui concerne les *diaphragmes*, le recours à diverses matières plastiques est loin d'avoir détrôné complètement

les traditionnels feutrages cellulosiques. Si la meilleure rigidité des premières peut amener une amélioration aux fréquences basses, où l'on s'approche mieux d'un véritable fonctionnement en piston, et si les vibrations partielles du diaphragme apparaissent plus haut dans le spectre, elles ont fréquemment une amplitude plus grande, ce qui complique la construction du filtre de répartition.

Une des acquisitions les plus marquantes de la technologie des transducteurs de sortie est la *suspension souple*, permettant d'abaisser la fréquence de résonance mécanique de l'équipage mobile ; elle est inévitable, mais peut désormais être reculée très bas dans le registre sous-grave, même en association avec une enceinte de faible volume. Il est bien entendu que l'extension de l'excursion de la bobine mobile que cela entraîne impose plus de précautions du point de vue de sa réalisation propre et de son centrage. Ce seul exemple montre combien l'usinage doit devenir précis.

Mesures objectives et tests subjectifs

Une meilleure compréhension, par les professionnels, de la corrélation entre mesures objectives et tests subjectifs a constitué un deuxième facteur d'évolution. C'est d'ailleurs là la clé de toute l'électroacoustique. Nonobstant l'existence d'un équipement métrologique très développé, certains essais purement physiques demeurent fort académiques.

Chiffrer, même avec grande précision, un paramètre qui n'est qu'un « échantillon » parmi d'autres qui ont bien des chances de le dominer du point de vue sensoriel, ne peut mener à des conclusions qualitatives rigoureuses. C'est le cas d'une série de caractéristiques qui tentent de décrire objectivement les distorsions de timbre, tant en signaux stables qu'en régime transitoire, et qui, mises en évidence par certains auteurs, ont été mises en doute par d'autres quant à leurs effets subjectifs :

- taux de distorsion dans le registre grave,
- intermodulation dans les groupes à plusieurs voies,
- distorsion « Doppler », par modulation de fréquence,
- réponse aux signaux carrés.

La psychoacoustique moderne commence à pénétrer dans ce domaine, et les méthodes expérimentales sont de plus en plus adoptées. Devant cette situation ambiguë, on comprendra que la normalisation internationale soit, en matière de haut-parleurs, très peu avancée.

La qualité des programmes

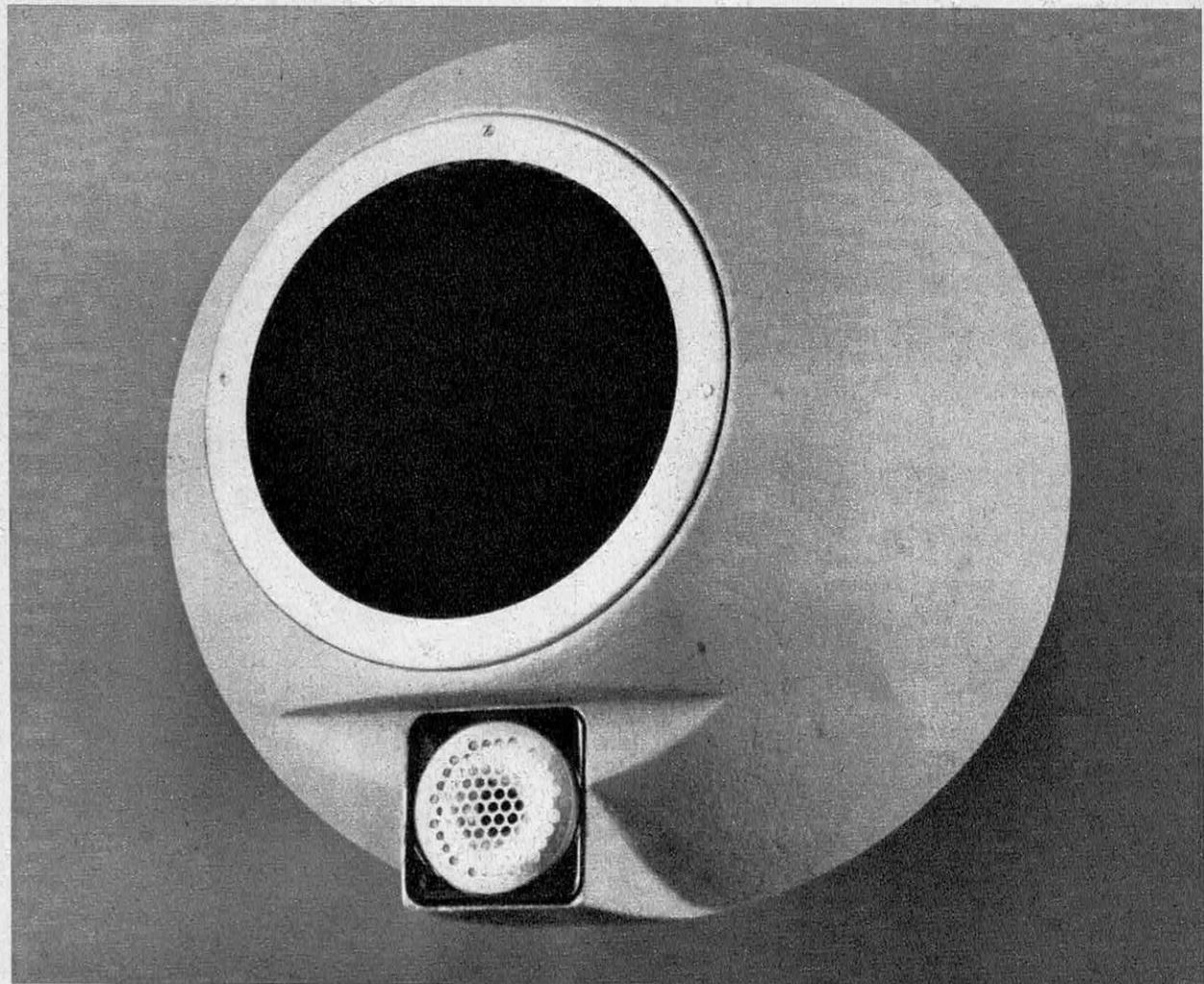
L'accroissement progressif de la qualité sonore des programmes enregistrés ou diffusés a créé

l'obligation d'une amélioration des transducteurs électroacoustiques, tout d'abord sous l'angle de la bande passante. Parallèlement, le goût musical d'un public de plus en plus vaste exige aujourd'hui une « haute-fidélité » moins spectaculaire mais plus esthétique. On en trouvera une preuve dans le succès des haut-parleurs de conception « neutre », suivant celle des modèles de contrôle de prise de son utilisés par la radiodiffusion et l'industrie du disque.

me), une autre bosse, dite de « présence », autour de 2 kHz, sollicitant indûment la crête de sensibilité de l'oreille, au détriment de l'équilibre musical.

Volume des enceintes acoustiques

La diminution du volume des enceintes acoustiques a été dictée par des exigences domestiques très compréhensibles, devenues impéra-



Elipson BS 40, enceinte sphérique à deux haut-parleurs, puissance nominale 20 watts

Il est évident qu'un diffuseur doit être considéré comme d'autant meilleur qu'il n'ajoute ni ne retranche rien à l'information sonore de quelque genre qu'elle soit. Il doit être *universel* et *passif*. Quoiqu'on ne puisse imaginer ce que pourrait être le « haut-parleur idéal », il ne fait pas de doute que deux défauts majeurs, cependant largement appréciés durant de longues années, devraient avoir complètement disparu. Il s'agit de la bosse de « coloration » typique vers 150 Hz, procurant une fausse impression de plénitude du registre grave (qu'elle existe ou non dans le program-

tives à l'heure de la stéréophonie. Elle a été rendue possible par le développement, évoqué plus haut, de haut-parleurs graves à suspension souple.

L'application d'un asservissement électronique permet une miniaturisation encore plus poussée du coffret, sans même recourir à une suspension ultra-souple.

Il existe encore, sur le marché, des haut-parleurs chargés par pavillon replié. Leur avantage principal réside dans un rendement énergétique élevé (moins de watts d'amplification pour une puissance rayonnée égale), mais

la complication et l'encombrement du meuble font qu'on les retient de moins en moins pour l'usage privé. Une diminution, même très sensible, de l'efficacité (qui n'est nullement un paramètre qualitatif) est largement compensée par les puissances élevées qu'autorisent désormais les amplificateurs à transistors. Si l'on ajoute que la puissance électrique admise par les groupes haut-parleurs modernes suivant la formule de l'enceinte close est également élevée, on s'expliquera la préférence d'une majorité d'amateurs pour une combinaison coffrets de faible encombrement avec amplificateur relativement puissant, plutôt que celle d'un mastodonte à haute efficacité. D'autant plus que, si l'on aborde l'aspect pécuniaire, il y a nette économie, grâce aux progrès de l'audioélectronique associés à ceux du transducteur de sortie.

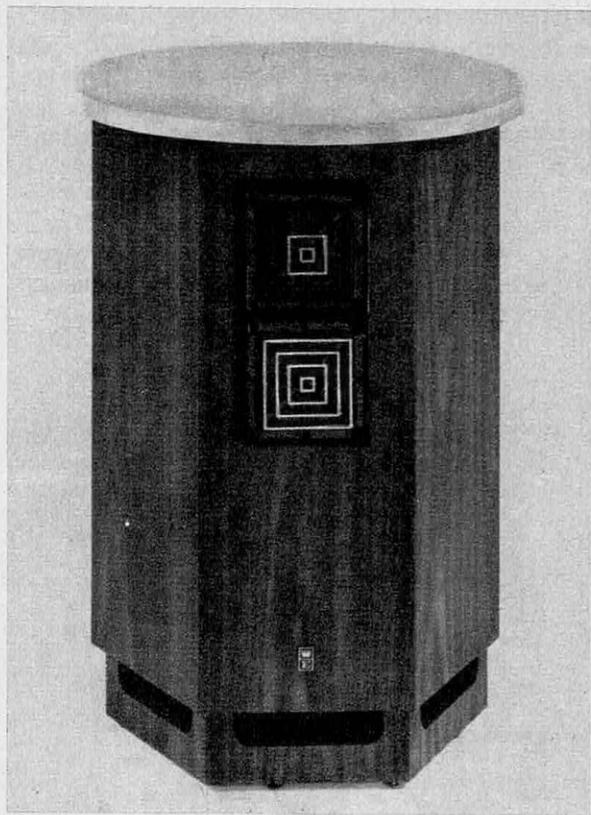
Des groupes complets

La logique commande, au stade actuel du marché de l'électroacoustique, d'acquérir des groupes haut-parleurs complets, en enceintes équipées. Les coffrets eux-mêmes ne sont pas aussi aisés à construire que se l'imaginent les amateurs : ils demandent une étude préalable, ne fût-ce que pour prévenir toute vibration de panneaux. C'était une source courante, il y a quelques années seulement, lorsque les enceintes étaient de plus grandes dimensions, de rayonnement acoustique excédant celui du haut-parleur grave lui-même.

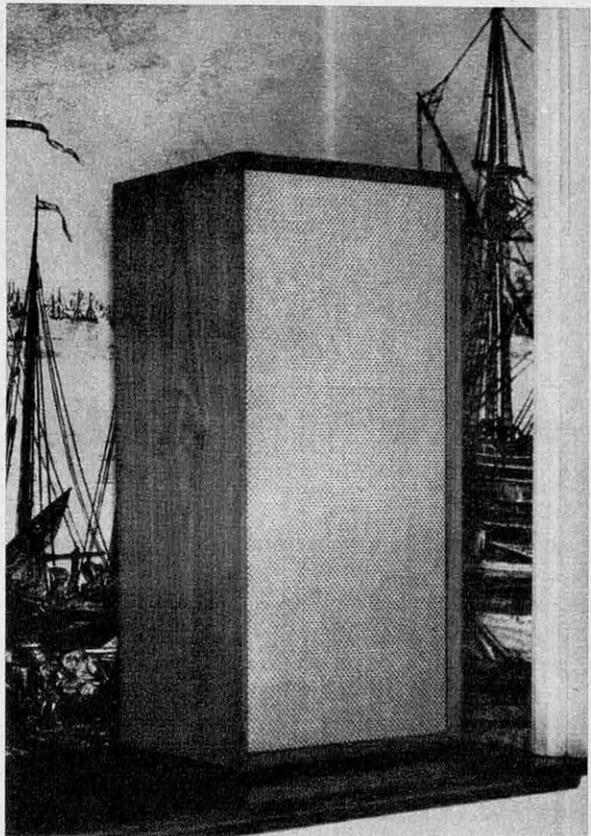
L'acquisition « en bloc » offre encore, sinon l'incorporation d'un amplificateur-correcteur adapté qui demeure rare, au moins celle d'un filtre à inductances-capacités qui, de simple répartiteur qu'il était, tend à devenir aussi un véritable correcteur. On est loin du réseau classique à valeurs strictement calculées pour une fréquence de répartition à un point « -3 dB ». Ce, pour des impédances constantes... et pour n'importe quel haut-parleur les mesures électriques étant considérées comme critères valables. Or, il n'en est rien, et l'on a compris que c'est le résultat *acoustique* qui compte.

Le local d'écoute

Ce n'est que plus récemment encore que l'on s'est penché sur les caractéristiques acoustiques du local d'écoute, qui constitue le dernier maillon (physique) de la chaîne de transmission. C'est que l'influence d'un environnement clos et semi-réverbérant, en combinaison avec diverses implantations des enceintes acoustiques, est décisive dans les registres grave et, en partie, médium musical. A tel point qu'une mesure en chambre insonore ne donne aucune idée de la réponse réelle en conditions nor-



Royal Grenadier (Empire),
trois haut-parleurs 40 cm, 125 W

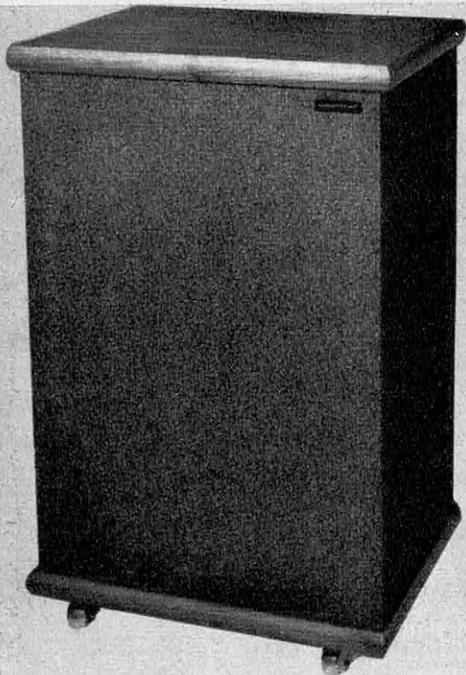


Dinghy II (Cabasse), 1 haut-parleur
24 cm, puissance 25 W

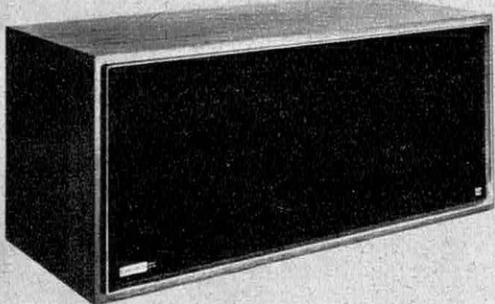
ENCEINTES ACOUSTIQUES

CONSTRUCTEUR Importateur	Type	Nombre de haut-parleurs	Diamètre des haut-parleurs (cm)	Puissance nominale (watts)	Impédance (ohms)	Dimension de l'enceinte (cm)
ACOUSTIC RESEARCH Radio Commercial	AR 4 X	2	20; 6	25	8	48,5 × 25,5 × 23
ACOUSTIC RESEARCH Radio Commercial	AR 5	3	25; 4; 2	40	8	63 × 36 × 29
ARENA Mood Music	HT 20	2	6; 21	35	4	43 × 28 × 24
ARENA Mood Music	HT 27	3	10 × 15; 10 × 15; 6	15	4	40 × 14 × 21
AUDAX	Audimax 501	3	24; 8; 8	30	8	57 × 33 × 30
AUDIOTECHNIC	E 65 N	4	21 × 32; 21 × 32; 10; 6,5	50	15	86 × 53 × 42
AUDIOTECHNIC	B 65 N	3	21 × 32; 10; 6,5	40	15	65 × 30 × 38
AUDIOTECHNIC	A 67	3	17; 10; 6,5	15	15	45 × 24 × 28
BANG ET OLUFSEN Vibrasson	Beovox 4000	4	—	60	4	35 × 65 × 28
B ET O Vibrasson	Beovox 2600	3	—	35	4	60 × 24 × 28
B ET O Vibrasson	Beovox 3000	2	—	60	4	28 × 64 × 31
B ET O Vibrasson	Beovox 5000	4	—	80	4	47 × 73 × 33
BARTHE	21 B	1	21	30	8	60 × 30 × 30
BRAUN Major Electronic	L 300/2	2	13; 6	20	4	16 × 24 × 14
BRAUN Major Electronic	L 410	2	18; 2	25	4	32 × 21 × 17
BRAUN Major Electronic	L 710	4	21; 21; 4; 2	40	4	55 × 31 × 24
BRAUN Major Electronic	L 610	2	21; 2	35	4	45 × 25 × 22
BRAUN Major Electronic	L 910	5	—	6	8	42 × 85 × 33
CABASSE	Dinghy II	1	24	25	4 ou 8 ou 15	29 × 24 × 60
CABASSE	Brigantin III VT	3	36; 12; 3	amplificateurs incorporés 3 × 20 W	adaptée à une sortie préamplificateur	58 × 40 × 100
CABASSE	Dinghy II VT	2	24; 12	amplificateurs incorporés 2 × 20 W	adaptée à une sortie préamplificateur	29 × 24 × 60
CELESTION Universal Electronics	Ditton 15	2 + 1 passif	21; 3	15	4 - 8	54 × 24 × 24
CELESTION Universal Electronics	Ditton 25	4 + 1 passif	31; 3; 3; 1	25	4 - 8	81 × 36 × 28
DUAL Carobronze	CL 100	4	24; 10; 10; 2	40	4	66 × 36 × 24
DUAL Carobronze	CL 30	2	13; 7	20	4	26 × 16 × 20
ELIPSON	C 12	1	12	10	4	17 × 19 (cylindre)
ELIPSON	BS 40	2	21; 6	20	8	40 (sphère)
ELIPSON	4040	3	28; 21; 6	30	8	40 × 40 × 120
EMPIRE	Royal Grenadier	3	40	125	8	cylindre 55 × 75
ERA	M 3	3	21; 17; 7	40	8	60 × 34 × 29
ERA	M 2	3	17; 17; 7	25	8	42 × 33 × 27
FILSON	Organum	4	—	30	15	78 × 39 × 35

CONSTRUCTEUR Importateur	Type	Nombre de haut-parleurs	Diamètre des haut-parleurs (cm)	Puissance nominale (watts)	Impédance (ohms)	Dimension de l'enceinte (cm)
GECO	Orthophase OR 18	18	—	180	4	72 × 88 × 19
GOODMANS	Mezzo II	2	—	15	8	31 × 50 × 23
GRUNDIG Grundig France	Projecteur d'aigus	6	—	50	4	cube 14 × 14 × 14 pied 8
GRUNDIG Grundig France	Box 731 complément des projecteurs d'aigus	6	—	50	4	62 × 40 × 14
GRUNDIG Grundig France	300	2	—	20	4	46 × 21 × 23
HECO Hifox	SM 35	3	10; 13; 24	35	4	48 × 28 × 25
HECO Hifox	P 2000	2	18; 3	40	4 - 8	36 × 22 × 18
HECO Hifox	P 5000	4	24; 13; 4; 3	70	4 - 8	60 × 32 × 25
HITONE	X 8	8	—	100	8	—
HITONE	X 3	3	21; 17; 7	35	8	—
KEF Mood Music	Concord	2	33 × 22; 6	50	8 - 15	61 × 38 × 25
KEF Mood Music	Cresta	2	14 × 8; 3	30	4 - 8	33 × 23 × 18
JB LANSING Auriema	Lancer 77	2 + 1 passif	25; 4	60	8	35 × 59 × 30
JB LANSING Auriema	Lancer 101	2	35 + chambre de compression	40	8	58 × 44 × 31
LEAK Eurocom	Mini sandwich	2	31 × 20; 8	35	4 - 8	74 × 28 × 18
NORD MENDE Cami	LB 60	3	—	30	8	70 × 36 × 16
PERPETUUM EBNER Cami	LB 30 H	2	—	20	4	58 × 27 × 25
PHILIPS	RH 497	3	25; 12; 3	40	8	54 × 40 × 23
PHILIPS	RH 496	3	20; 12; 3	20	8	46 × 35 × 23
PIONEER Setton	CS 53	2	—	40	8	29 × 25 × 49
PIONEER Setton	CS 88	5	—	60	8	36 × 63 × 33
SABA Driva	Box V	6 + tweeter à compression	40; 15 × 22; 12 × 17; 12 × 17; 11; 11	50	4 - 8	85 × 53 × 33
SABA Driva	Box 820	2	20; 12 × 17	25	4 - 8	49 × 27 × 25
SANSUI Cotte	SP 2000	6	30; 16; 13; 5; 5; 2	70	8	67 × 39 × 33
SCHNEIDER	E 17	2	17; 6	15	4	33 × 13 × 48
SCIENTELEC Scientelec	Eole 45	3	21; 21; 2	45	4 - 8	85 × 45 × 60
SCIENTELEC Scientelec	Eole 15	2	21; 7	15	8	44 × 30 × 24
SCOTT Era	S 15	3	25; 11; 8	50	8	30 × 60 × 23
SCOTT Era	S 17	2	20; 8	35	8	27 × 46 × 22
TANDBERG Barthe	Hi Fi 15	3	30; 12; 6	45	4	70 × 35 × 28
VOXON	B 210	2 + 1 passif	25; 7	20	8	67 × 37 × 32
VOXON	B 211	2 + 1 passif	30; 7	35	8	70 × 39 × 29



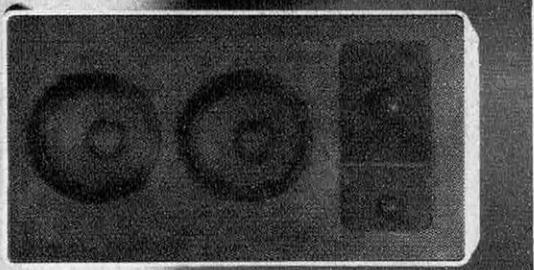
Enceinte Audiotechnic E 65 N,
quatre haut-parleurs, 50 W



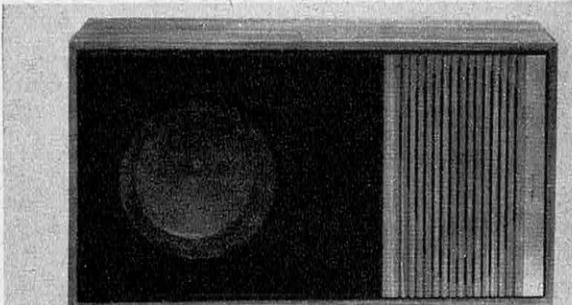
Celestion Ditton 15, 2 haut-parleurs actifs,
15 watts

males d'exploitation. Car, en définitive, « ce qu'on entend » c'est la courbe de réponse du transducteur plus le canal acoustique formé par le local. Celui-ci est, en effet, le siège de résonances propres qui s'installent, pour les habituelles dimensions réduites, dans la bande de 60 Hz à 300 Hz, que l'on ne peut combattre par des absorbants acoustiques courants. Cette bande inclut donc la « coloration » à 150 Hz déjà évoquée qui, lorsque les groupes haut-parleurs sont de classe, n'est plus due qu'au local lui-même, à l'excitation de ses fréquences propres. C'est la raison pour laquelle l'installation en encoignure est une conception erronée : c'est elle qui accentuera au maximum ladite « bosse » au voisinage de 150 Hz...

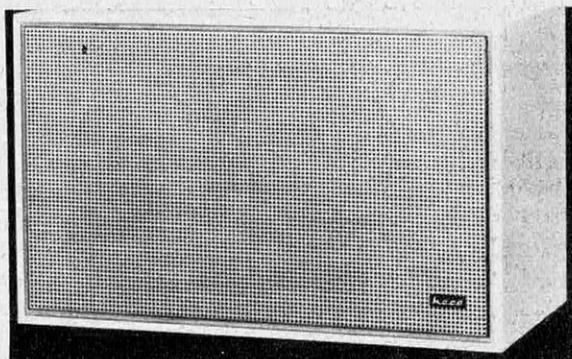
Du côté des fréquences élevées — pour fixer les idées : à partir de 800 Hz — apparaît l'effet de *direction*, qui n'existe pas aux fréquences basses où le rayonnement d'un haut-parleur



Braun L 710, 4 haut-parleurs, puissance 40 W



Hitone X 3, 3 haut-parleurs, 35 W



Heco P 2000, 2 haut-parleurs, 40 watts

est toujours isotrope. La projection sonore s'opère en un pinceau de plus en plus étroit lorsqu'on monte dans le spectre audible. On pourrait croire que cette caractéristique est favorable à une localisation stéréophonique précise. Il est vrai que certains apprécient cet effet de « présence », provoqué cette fois par un rétrécissement de l'angle de rayonnement, autrement dit par son affaiblissement rapide lorsqu'on s'écarte de l'axe, dans la zone de sensibilité auditive maximale (les deux octaves qui vont de 1 à 4 kHz, où cette caractéristique est plus sensible encore qu'aux fréquences plus élevées).

Plus ouvert sera l'angle rayonné à 2 kHz, meilleur sera un haut-parleur. La traduction subjective de cette propriété, qui correspond d'ailleurs à celle de l'émission vocale humaine, sera une sensation de naturel et une absence de fatigue d'écoute.

Jacques DEWÈVRE

IMPLANTER UNE CHAINE HAUTE-FIDELITE

Les premiers appareils de reproduction sonore à amplification électronique étaient faits d'éléments reliés par des câbles apparents et inesthétiques. Dès l'avènement de montages plus élaborés, on a groupé les dispositifs de réception, de reproduction et d'amplification, ainsi que les haut-parleurs, dans des coffrets, sinon dans des meubles. Avec la chaîne sonore à haute fidélité, nous sommes revenus, en partie, au principe des éléments séparés, mais sous une forme nouvelle au point de vue technique et esthétique.

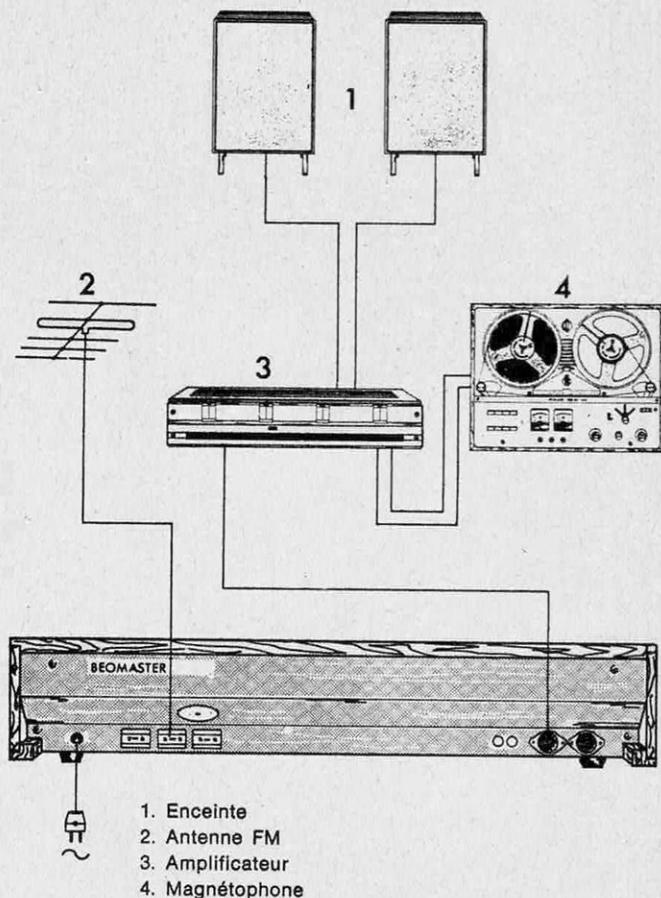
Le rôle de la chaîne sonore

Les sons musicaux reproduits par les haut-parleurs sont le fruit de multiples transformations d'un signal appliqué à l'entrée de la chaîne. Une série d'amplifications, de corrections et de sélections sont nécessaires pour assurer un résultat final de qualité. Pour effectuer ces opérations, on doit recourir à une série d'appareils électroacoustiques ou électroniques. Ils constituent les divers maillons de la chaîne sonore, depuis le microphone du studio jusqu'au haut-parleur de notre living-room.

Les divers types d'ensembles de haute fidélité sont étudiés, — tout comme les montages techniques — suivant les lois de l'esthétique industrielle. Les différents matériaux électro-acoustiques sont présentés sous des formes fonctionnelles ; les coffres, les meubles, les tableaux de contrôle sont sobres et dépouillés ; ils font désormais partie intégrante du décor familier.

Une première solution consiste à utiliser des éléments complètement séparés, mais de caractéristiques compatibles. Mais on trouve aussi, à l'inverse, des meubles combinés, qui contiennent dans un même ensemble tous les éléments de la chaîne, y compris même les haut-parleurs stéréophoniques, lesquels doivent pourtant rester plus ou moins écartés l'un de l'autre.

Entre ces deux extrêmes, il est aujourd'hui d'heureuses solutions mixtes, des chaînes comportant des éléments séparés et d'autres combinés (par exemple, tuner associé à l'amplifi-



Implantation typique d'une chaîne
(document Bang et Olufsen)

cateur). L'amplificateur unique permet aussi bien l'amplification des radio-concerts captés par le tuner que celle des enregistrements inscrits sur la bande magnétique, ou la reproduction des disques.

Les premières chaînes sonores à haute fidélité comportaient, à part, un pré-amplificateur destiné à augmenter les tensions des signaux acoustiques, et un amplificateur de puissance actionnant les haut-parleurs. Ces deux montages sont désormais intégrés, d'où un emplacement réduit, des réglages simplifiés, des résultats techniques meilleurs.

L'avantage des maillons séparés

La disposition des chaînes sonores en maillons séparés augmente la souplesse, permet de mieux adapter l'installation à l'emplacement qui lui est réservé et aux goûts de l'auditeur. Elle facilite des modifications éventuelles inspirées par les progrès de la technique ou par des circonstances individuelles d'utilisation.

Il n'est plus nécessaire d'acquérir simultanément tous les éléments de l'installation complète. L'amateur peut choisir d'abord les maillons essentiels, par exemple ceux qui permet-

tent la lecture des disques, et compléter ensuite cette installation en y ajoutant un magnétophone et un tuner. L'amplificateur combiné constitue évidemment le premier élément à acquérir.

Du point de vue technique, cette séparation aide à mieux étudier et à adapter rationnellement les caractéristiques optimales des éléments séparés.

La séparation matérielle permet aussi d'éviter parfois des interactions gênantes. Le tourne-disques ne subit plus les vibrations des haut-parleurs qui déterminent des bruits parasites. Il en est de même pour le microphone adapté à un magnétophone : la séparation évite les risques d'induction mutuelle génératrice de ronflements parasites, sans doute moins graves depuis l'avènement des transistors, mais qui n'ont pas complètement disparu.

Du point de vue acoustique, les haut-parleurs stéréophoniques séparés présentent l'avantage de se prêter à une installation rationnelle aux emplacements les plus favorables.

Pratiquement, cette fragmentation de la chaîne facilite aussi les réglages.

Un problème de solidarité

Le mot « chaîne » a une signification bien réelle. Une chaîne ne vaut que par ce que valent ses maillons ; qu'un seul présente un défaut, et l'ensemble ne peut donner de bons résultats. Chacun d'eux a des fonctions bien

déterminées et pose un problème particulier. Considéré séparément, il doit présenter les caractéristiques optimales.

Même avec des appareils de grand prix, l'audition musicale obtenue peut devenir déplorable par la faute d'un seul organe médiocre, par exemple la tête de lecture d'un phonocapteur. Avec des éléments de haute qualité, le résultat final n'est pas toujours assuré. Ils ne suffit pas qu'individuellement, leurs caractéristiques soient suffisantes ; elles doivent encore être telles que les éléments s'adaptent convenablement les uns aux autres.

Certaines distorsions sont causées par un renforcement ou une diminution d'une gamme de sons musicaux par rapport à une autre. Les éléments extrêmes, phonocapteurs et haut-parleurs, peuvent provoquer une amplification excessive des graves par rapport aux aigus. Le maillon amplificateur central doit posséder des organes de contrôle précis, capables, s'il y a lieu, de diminuer ou d'amplifier les sons graves ou aigus.

L'ouïe elle-même est imparfaite ; elle modifie la tonalité pour les faibles niveaux sonores. Des systèmes compensateurs doivent préserver la fidélité subjective quel que soit le niveau. L'effet de « présence » sonore est assuré par un renforcement des sons médium. On ne l'obtient pas sans une correction spéciale assurée par un montage particulier de l'amplificateur et du haut-parleur.



Chaîne Beomaster 1 000, avec ampli à tuner incorporé



Chaîne LMT Schaub-Lorentz « Loretta »

Sans doute, peut-on ainsi renforcer ou atténuer une partie de la gamme de fréquence musicale ; l'étendue de la bande passante n'en constitue pas moins un critère indispensable, à condition, bien entendu, que l'indication fournie par le constructeur soit exacte. Il ne suffit pas de fixer les fréquences limites reproduites ; il faut encore préciser, en décibels, les variations de niveau constatées sur l'étendue de cette gamme.

L'importance de l'installation

Il ne suffit pas de choisir avec soin les éléments de la chaîne ; il faut les disposer correctement dans la chambre d'écoute, et s'en servir rationnellement. Les conditions d'une audition réellement « haute fidélité » sont beaucoup plus complexes qu'on ne le croit généralement. Beaucoup trop d'amateurs s'imaginent encore qu'on peut placer les éléments de la chaîne ou le meuble combiné dans un coin quelconque, et disposer les haut-parleurs un peu au hasard. Cette erreur cause de graves insuccès, surtout en stéréophonie.

Une audition médiocre est parfois imputable aux caractéristiques de la chambre d'écoute : forme des murs et du plafond, disposition des fenêtres et des portes, nature des revêtements au sol et aux murs, disposition des tentures et du mobilier.

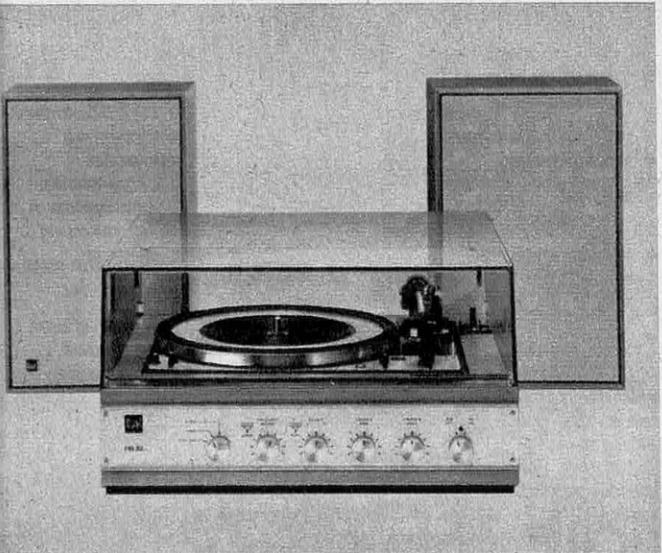
La meilleure disposition d'une chaîne

Il est essentiel de disposer la table de lecture sur une surface plane et à l'abri des vibrations. Les sons graves et intenses, en particulier, peuvent faire naître des vibrations excessives qui, transmises à la tête de lecture, produisent à leur tour des sons parasites amplifiés par le haut-parleur.

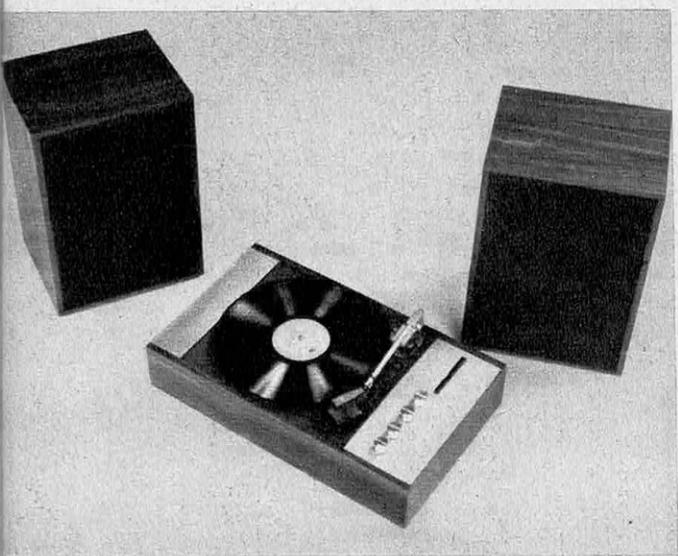
L'amplificateur ne doit pas être trop écarté de la table de lecture, de façon à éviter tout risque d'affaiblissement des sons aigus. De même, le tuner ne doit pas être trop éloigné de l'amplificateur. C'est pourquoi la solution du bloc tuner-amplificateur est particulièrement recommandable.

Les câbles de liaison au haut-parleur peuvent au contraire être assez longs, si leur section est suffisante ; il n'est cependant pas recommandé de les rapprocher des câbles d'alimentation reliés au secteur.

La liaison entre les différents éléments n'offre généralement plus guère de difficultés, puisque les câbles blindés nécessaires avec les prises normalisées sont fournis par les fabricants ; mais les fils d'entrée doivent tous être blindés, et chaque canal stéréophonique doit comporter son câble de liaison propre. Les blindages doivent être reliés à la masse métal-



Chaîne intégrée Dual HS 50



Chaîne intégrée GECO



Chaîne Servo Sound

lique de l'amplificateur ou du tourne-disque ; tout défaut de liaison, d'une soudure par exemple, peut être la cause de troubles gênants : craquements, parasites ou ronflements. Les montages et les démontages fréquents peuvent ainsi être cause de pannes plus ou moins gênantes, qu'il faut savoir localiser.

La disposition des haut-parleurs

La disposition des enceintes acoustiques joue un rôle primordial et trop souvent mal compris. Elle doit dépendre avant tout des caractéristiques acoustiques de l'environnement. Il existe aujourd'hui des enceintes de volume réduit, pouvant être disposées sur les rayons d'une bibliothèque, mais les enceintes de haute qualité restent souvent plus ou moins encombrantes.

De toute façon, l'emplacement des enceintes doit être étudié pour assurer une distribution sonore uniforme et aussi agréable que possible. L'effet directionnel se manifeste surtout pour les sons aigus au-delà de 3 000 à 4 000 Hz, d'où l'importance de haut-parleurs adaptés, si l'on veut obtenir une audition dont la qualité varie le moins possible suivant la position de l'auditeur.

Contrairement à ce qu'on croit souvent, la stéréophonie n'est pas réservée aux grands locaux. L'effet stéréophonique ne dépend que des distances relatives entre auditeurs et haut-parleurs, et non des distances absolues dans la salle. Si l'auditeur est très rapproché, il n'obtiendra une sensation d'ensemble que si les haut-parleurs sont très proches l'un de l'autre. Si l'auditeur est plus éloigné, le champ sonore doit être élargi pour produire le même effet de volume ; les haut-parleurs doivent donc être plus écartés. On admet, en pratique, un écartement des deux enceintes de l'ordre des 3/4 de la distance qui les sépare de l'auditeur.

La hauteur des haut-parleurs n'est pas non plus indifférente. Ils doivent être placés, en principe, à hauteur de la tête des auditeurs assis, ou un peu au-dessous. Si l'on est obligé de les disposer plus bas ou plus haut, on peut les incliner légèrement vers les auditeurs ; on favorise ainsi les sons aigus, d'où un meilleur équilibre des tonalités, et un effet stéréophonique efficace. Mais il faut se garder d'exagérer : les sons qui proviennent d'en haut ou d'en bas ne peuvent fournir une impression de musique naturelle.

Tout dépend, enfin, des caractéristiques acoustiques de la chambre et de la façon dont les sons réfléchis par les murs, le plancher et le plafond, parviennent aux auditeurs. Mais c'est là une question d'acoustique architecturale.

Pierre HEMARDINQUER

MICROPHONES ET CASQUES D'ECOUTE

Les amateurs négligent trop souvent les deux extrémités d'une chaîne sonore. A l'une, nous trouvons le haut-parleur ou les écouteurs ; à l'autre (bien qu'il ne soit pas toujours présent) le microphone. Il a été traité, par ailleurs, des haut-parleurs ; nous limitons donc ici notre propos aux microphones et aux écouteurs.

Le microphone permet, généralement à l'aide d'un magnétophone, l'enregistrement direct, lequel offre des avantages indéniables d'originalité. C'est par ce moyen qu'on peut constituer de véritables archives sonores, familiales ou documentaires, sinon artistiques ou didactiques.

Les qualités de l'« oreille électrique » choisie doivent correspondre à celles de l'appareil d'enregistrement et aux conditions d'utilisation. Le microphone est un transformateur d'énergie, de rendement plus ou moins faible ; il traduit les ondes sonores en vibrations mé-

caniques, puis en oscillations électriques à fréquence musicale. Pour donner de bons résultats, surtout en musique, le microphone doit être fidèle : quelle que soit la fréquence des sons, il doit produire des signaux électriques avec une intensité proportionnelle à l'amplitude des vibrations sonores qui mettent en action sa membrane.

Avec le microphone actuel de haute qualité, on peut assurer une traduction presque uniforme des sons de différentes hauteurs proportionnellement aux diverses intensités, entre 40 et 20 000 Hz, avec une tolérance qui ne dépasse pas 2,5 dB ; la qualité du microphone arrive ainsi à dépasser celle du magnétophone.

De tels microphones classiques à large bande permettent à l'amateur de réaliser d'excellents enregistrements d'orchestre, de chœur ou de musique de chambre.

Pour enregistrer seulement la parole, la gamme des fréquences n'a pas besoin, en principe, d'une gamme de fréquences débordant au-delà de 100 et 5 000 Hz. Mais, même en ce cas, il ne faut pas négliger les avantages d'un microphone de qualité. Avec un modèle simplifié, la parole est seulement compréhensible ; avec une installation plus soignée, on perçoit les moindres inflexions vocales.

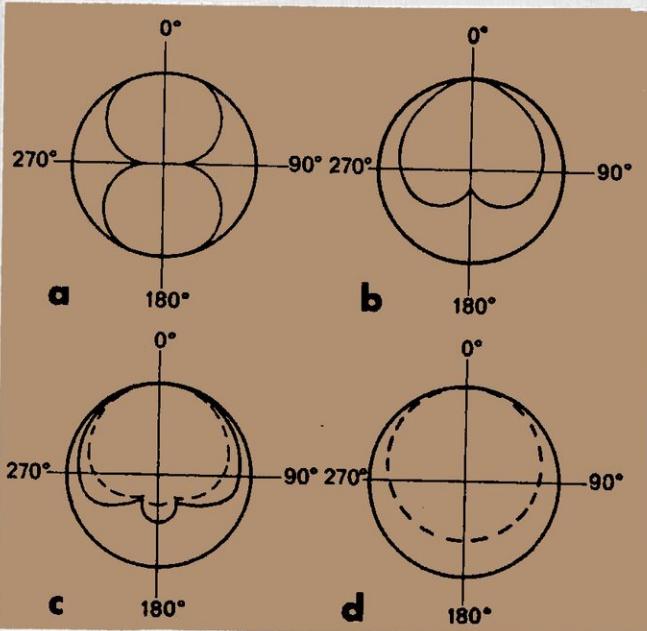
Une autre qualité intéressante du microphone est sa *sensibilité*, définie par le niveau du signal le plus faible qui peut être capté. Malheureusement un microphone fidèle et de haute qualité n'est pas toujours un appareil sensible. Au contraire...

Une autre qualité du microphone est la *profondeur de champ*, c'est-à-dire la distance à laquelle doit être placée la source sonore pour que le signal transmis soit suffisant. Cette caractéristique est surtout importante pour les enregistrements de plein air.

La *fidélité* est mesurée par la correspondance entre les fréquences des vibrations sonores initiales et celles qui sont transmises.

La directivité est essentielle

La *directivité* est la possibilité de capter plus ou moins bien les sons provenant d'une direc-



Les diagrammes polaires des divers micros : a - diagramme bidirectionnel ; b - diagramme unidirectionnel ; c - appareils cardioïde, supercardioïde ; d - appareil omni-directionnel.



L'écoute au casque, indispensable au véritable mélomane.

Toscas

tion privilégiée. Il existe des microphones non directifs ou « omnidirectionnels ».

Le microphone unidirectionnel, au contraire, capte les sons qui parviennent perpendiculairement à la surface de sa membrane vibrante ; sa sensibilité dépend de son orientation par rapport à la source sonore. En plein air, il recueille les sons provenant de sources éloignées et élimine les sources sonores indésirables disposées latéralement.

Les modèles bidirectionnels présentent deux directions privilégiées, généralement vers l'avant et vers l'arrière. En général, l'effet directionnel est plus sensible sur les fréquences élevées.

L'effet directif peut être présenté par une courbe, ou *diagramme polaire*, indiquant des directions privilégiées de capture des sons. Ces courbes ont une forme circulaire, en « huit », en « massue », etc. Le microphone *cardioïde* (ainsi nommé parce que son diagramme a la forme d'un cœur) résout de nombreux problèmes de « chasse aux sons ».

Le microphone « moyen », adopté par beaucoup d'amateurs, est généralement de type directionnel. Utilisé avec quelque soin, il sélectionne les sons provenant d'une direction déterminée, évitant l'influence des bruits ambients ou parasites.

Avec un microphone omnidirectionnel on ne peut assurer la sélection qu'en modifiant la distance des sources sonores.

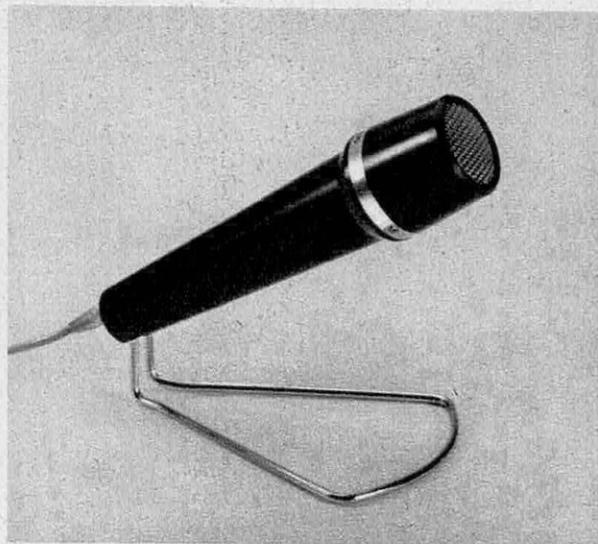
Dans un appartement, ou une ambiance relativement silencieuse, l'utilité de l'effet directif ne dépend que de la nature de l'enregistrement. Dans une salle d'assez grandes dimensions aux parois réfléchissantes, ou dans une ambiance bruyante, le micro directif devient indispensable.

Pour enregistrer les répliques des acteurs dans une pièce de théâtre, ou les interventions des participants à un colloque, des microphones directionnels placés devant celui qui parle donnent de bons résultats ; pour les orchestres, des microphones cardioïdes (et des microphones distincts pour les solistes) sont recommandés.

En matière de microphones, la stéréophonie pose des problèmes délicats ; l'enregistrement peut être effectué au moyen de deux éléments plus ou moins écartés et convenablement orientés, ou d'éléments superposés, captant les sons dans des directions différentes et qui sont dits « croisés ».

Les divers types de microphones

Tout microphone comporte un organe vibrant agissant sur un dispositif qui traduit les vibrations mécaniques en oscillations électriques à fréquence musicale.



Micro Philips électrodynamique ;
150 Hz-10 kHz.

La plupart des microphones comportent une membrane vibrante avec, en arrière, une capsule acoustique, dans laquelle l'air est comprimé ou dilaté suivant les mouvements de la membrane : ce sont les *microphones de pression*.

Dans un deuxième type d'appareils, l'organe vibrant est libre sur ses deux faces et ses dimensions suffisamment réduites pour que l'onde incidente se retrouve sur la face arrière. Le diaphragme, très léger et complètement libre, suit les variations de pression acoustique qui se produisent suivant l'axe du système. Ces appareils sont appelés *microphones de vitesse*, ou, avec plus de rigueur, *microphones de vitesse*.

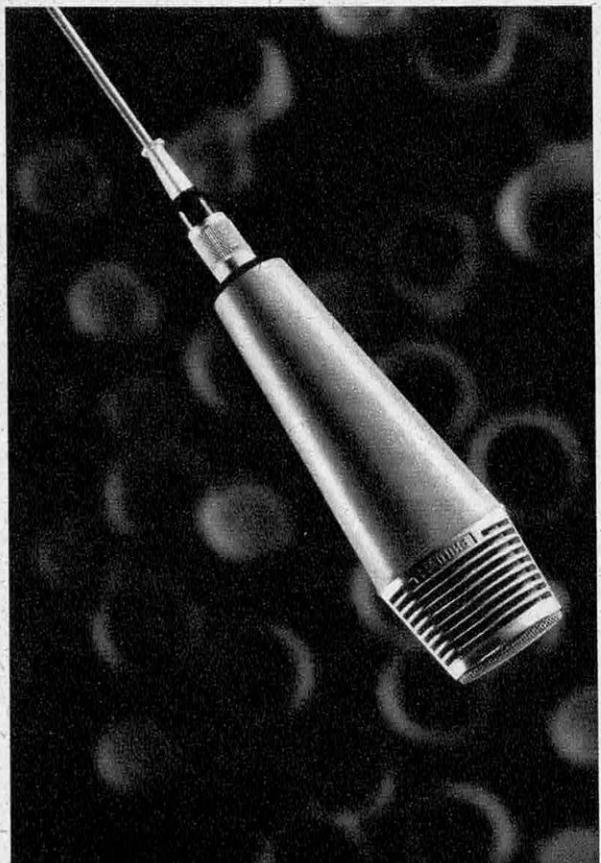
Les microphones de pression sont les plus répandus ; ils sont plus ou moins directionnels. Les microphones de vitesse sont normalement bidirectionnels.

Du point de vue électrique, on peut également distinguer deux catégories de microphones. Les uns constituent des éléments non réversibles : ils ne peuvent jouer le rôle de haut-parleurs ; ce sont surtout les microphones à contact, dont le plus connu est le microphone à charbon, appareil sensible, mais peu fidèle.

Dans la deuxième catégorie, la plus répandue, on classe des modèles réversibles : électromagnétiques, piézoélectriques, électrostatiques, électrodynamiques, etc.

Le microphone à charbon est constitué par une résistance variable sous l'action des vibrations produites par les ondes sonores. Sensible et robuste, bon marché, d'une puissance de sortie relativement élevée, il n'est plus utilisé que pour la parole.

Les microphones ordinaires sont des appareils à cristal (piézoélectrique), des modèles



Micro Philips électrostatique.
Préampli incorporé.



Casque dynamique
Elega (LEM).

électrodynamiques à bobine mobile ou à ruban, et, pour certains enregistrements de haute qualité, des microphones à condensateur (ou électrostatiques).

Le microphone piézoélectrique comporte un élément de cristal qui, déformé sous l'action des vibrations sonores, produit des signaux électriques. Les cristaux de sel de La Rochelle sont aujourd'hui remplacés par des pastilles de céramique, plus robustes et résistant mieux aux agents atmosphériques. Le niveau de sortie est suffisant pour permettre une liaison directe. Les microphones à condensateur sont des appareils coûteux, captant particulièrement bien les sons aigus, mais exigeant une alimentation auxiliaire en courant continu. Ce sont, en fait, des condensateurs dont la capacité varie sous l'effet des ondes sonores. Une tension continue est établie entre deux plaques, l'une fixe, l'autre mobile ; le déplacement de la plaque mobile fait varier la capacité et donne naissance à une tension variable.

De dimensions réduites, offrant une courbe de réponse régulière, les microphones à condensateur ont longtemps présenté quelques inconvénients : faible sensibilité, capacité subissant les effets de l'humidité et des chocs, nécessité d'une alimentation auxiliaire. L'avènement des transistors a résolu les problèmes d'alimentation et d'amplification nécessaires ; les nouveaux modes de construction ont réduit l'influence de l'humidité et des vibrations. Ces microphones sont souvent utilisés par la radiodiffusion, la télévision, l'industrie, et aussi par les amateurs particulièrement exigeants.

Les microphones électrodynamiques sont actuellement les plus répandus, tant chez les amateurs que chez les semi-professionnels. Dans ces appareils, le diaphragme vibrant est solidaire d'un bobinage très léger en fil conducteur qui se déplace dans le champ magnétique d'un aimant permanent. Les variations de position de la bobine déterminent dans l'enroulement des oscillations électriques à fréquence musicale. Sous certaines conditions, les signaux obtenus ont la même forme que les ondes sonores initiales.

Les microphones électrodynamiques peuvent être de forme non directionnelle, directionnelle, cardioïde, ou « hypercardioïde ». Leur fidélité peut être excellente et leur courbe de réponse très étendue. Ils conviennent à l'enregistrement de la parole comme à celui de la musique, et transmettent aussi fidèlement la moindre nuance du timbre d'une voix que le spectre sonore complet d'un orchestre symphonique.

Beaucoup moins répandu parmi les amateurs, le microphone à ruban peut être considéré comme un microphone électrodynamique dont l'enroulement est remplacé par un conducteur



Casque Körting HD 414,
bande 20 Hz-20 kHz;
poids 135 g.

rectiligne se déplaçant dans un entrefer également rectiligne. Le diaphragme est constitué par un ruban métallique ondulé, mince et léger, suspendu dans le champ magnétique et librement accessible aux vibrations de l'air sur ses deux faces ; il constitue ce qu'on peut appeler un microphone de vitesse.

Les microphones à ruban sont des éléments bidirectionnels très fidèles, mais assez peu sensibles, recommandés pour l'enregistrement haute-fidélité en studio. Les sons graves, en particulier, sont remarquablement captés. Mais le microphone à ruban est fragile ; il ne convient pas, en général, pour le travail en extérieur, car il doit être tenu à l'abri du vent et des chocs.

L'écoute au casque

Les premiers radiotéléphones, les appareils de théâtre et même les amplificateurs musicaux étaient équipés de casques téléphoniques.

Puis, pendant de longues années, les écouteurs téléphoniques ne furent plus utilisés que dans les studios professionnels, pour les contrôles et les mesures. Leur actuel regain d'intérêt résulte d'améliorations pratiques. Les écouteurs, généralement électrodynamiques, sont devenus légers et confortables. Munis de garnitures souples, ils se portent sans aucune gêne. Du point de vue musical, ils sont supérieurs aux haut-parleurs.

Appliqué sur le pavillon de l'oreille, le diaphragme mobile met en vibration l'air contenu

dans le conduit auditif ; l'action sur le tympan est directe. Le taux de distorsion peut ainsi être maintenu à un niveau très réduit. Il ne se produit plus ces effets de résonance constatés avec les diffuseurs et dans les enceintes acoustiques des haut-parleurs. L'audition des transitoires est très améliorée. Les casques sont ainsi, en haute fidélité, des éléments beaucoup plus « véridiques » que les haut-parleurs. Ils permettent aux mélomanes de se concentrer sur la musique sans être dérangés par l'environnement.

On s'en sert pour contrôler la qualité des enregistrements, en mono et en stéréophonie. Les haut-parleurs demeurent, cependant, les appareils habituels de diffusion sonore, et il n'est pas question de les remplacer par des écouteurs individuels, ce qui compliquerait d'ailleurs les installations.

Pour la stéréophonie, les avantages sont encore plus remarquables. Un effet de restitution et de distribution sonore de qualité exige une séparation aussi poussée que possible des deux canaux sonores. Cette séparation est imparfaite avec deux haut-parleurs séparés, dont les sons sont plus ou moins mélangés avant de parvenir au deux tympans, sans même tenir compte des réflexions sur les murs de la salle.

Les écouteurs s'adaptent généralement sans difficulté sur nombre d'appareils et, en particulier, sur les magnétophones ; des prises spéciales sont prévues, mais on peut se contenter de les relier à la place des haut-parleurs, en utilisant des atténuateurs du niveau des signaux transmis.

P. HEMARDINQUER

GUIDE SUSSE 1971

32, Boulevard Henri IV
PARIS IV^e

8 500 TERRAINS de CAMPING

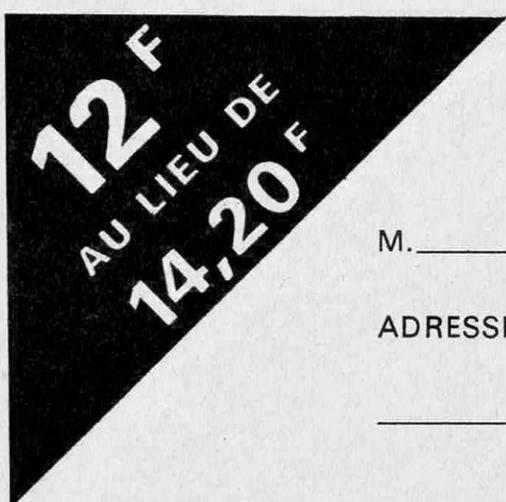
avec leur situation géographique précise,
catégorie, surface,
qualité des aménagements, nature du sol,
distractions, etc.

en France
Europe
Afrique du Nord

Les terrains de week-end et
parcs à caravane du Bassin Parisien.

Les plans d'eau classés par
région, les cours d'eau navigables,
les Écoles de voile,
centres nautiques, etc.

**...et une foule de renseignements
indispensables, pour le campeur,
le caravanier, le plaisancier.**



OFFRE EXCEPTIONNELLE A NOS LECTEURS

EN NOUS ADRESSANT CE BON VOUS RECEVREZ
DIRECTEMENT LE GUIDE SUSSE 1971 AU PRIX TOUT
A FAIT PRÉFÉRENTIEL DE 12 F AU LIEU DE 14,20 F.

M. _____

ADRESSE _____

ATTENTION : Les frais de port sont inclus dans ce prix de 12 Francs

REVOYEZ CETTE CARTE, avec votre paiement (C.C.P. 3 volets, chèque bancaire,
mandat lettre) C.C.P. 18.574.05 au GUIDE SUSSE - 32, Boulevard Henri IV - Paris IV^e

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE

24, Rue Chauchat, Paris 9^e - Tél. 824 72 86

C.C.P. 4192-26 Paris

SON - AMPLIFICATION - MAGNÉTOPHONE

Cette bibliographie, établie d'après le stock d'ouvrages de notre librairie, ne représente qu'une partie des ouvrages figurant dans notre catalogue général (1970). Prix F 7.

ACOUSTIQUE

ACOUSTIQUE. Mercier J. — Tome I: Lois générales de la propagation dans les solides et les fluides. Oscillateurs mécaniques à ondes stationnaires: Généralités sur les ondes élastocinétiques. Ondes planes longitudinales dans les solides élastiques. Phénomènes de réflexion. Ondes stationnaires. Oscillateurs à ondes stationnaires (amortissement nul). Propagation avec amortissement. Ondes transversales dans les solides élastiques. Vibrations transversales des cordes. Vibration des membranes. Ondes liquides superficielles. Ondes de pression dans les fluides. Propagation par ondes sphériques. Caractères généraux des ondes acoustiques. Propagation dans les tuyaux. Discontinuité dans les tuyaux. — 320 p. 13,5 × 18, 150 fig., cartonné, 1962 F 32,00

Tome II: Tuyaux sonores de formes diverses. Résonateurs. Filtres. Sources sonores. DéTECTeurs de sons. Analyse des sons. L'oreille et le sens de l'ouïe. Acoustique physiologique: Oscillateurs à air; tuyaux cylindriques. Cavités sphériques et tuyaux coniques; tuyaux exponentiels. Résonateurs. Propagation de l'énergie dans les milieux continus; filtres. Tuyaux couplés. Production et émission des sons sources sonores; sons de courants gazeux. Sources en mouvement. Célérité du son dans les différents fluides. Analyse des sons. DéTECTeurs et récepteurs de sons; jets et flammes. L'oreille et le sens de l'ouïe; timbres des sons. L'oreille et la hauteur des sons; gammes. L'oreille et l'intensité des sons; bruits. Mécanismes de l'audition. — 302 p. 13,5 × 18, 139 fig., cartonné, 1962 F 30,00

Tome III: Électroacoustique. Microphones. Haut-parleurs. Enregistrement et reproduction des sons. Acoustique architecturale. Instruments de musique: Microphones. Reproduction des sons. Récepteurs téléphoniques et moteurs de haut-parleurs. Haut-parleurs. Dispositifs et appareils d'enregistrement et de reproduction. Acoustique architecturale. Diapasons et instruments de musique à vibrations transversales (verges, plaques, cordes). Tuyaux et instruments à vents. Tuyaux à embouchure de flûte. Tuyaux à anche. Instruments de musique à vent. — 304 p. 13,5 × 18, 168 fig., cartonné, 1962 F 30,00

PHYSIQUE APPLIQUÉE A LA REPRODUCTION DES SONS ET DES IMAGES. — Didier A. — Tome I: Acoustique; généralités. Vibrations sinusoïdales. Étude expérimentale des mouvements vibratoires. Dynamique des vibrations; mouvements d'une masse suspendue élastiquement. Acoustique physiologique. Mesures acoustiques; audiometrie. Généralités sur l'enregistrement et la lecture. Caractéristiques générales de l'appareillage électroacoustique; mesures électro-acoustiques. Traducteurs électroacoustiques; microphones et haut-parleurs. Enregistrement et reproduction des sons. — 272 p. 16,5 × 24,5, 267 fig., relié toile, 1964 F 54,00

DICTIONNAIRE GÉNÉRAL D'ACOUSTIQUE ET D'ÉLECTROACOUSTIQUE. — Piroux H. — 1 000 définitions, classées par ordre alphabétique, concernant non seulement l'électroacoustique, mais aussi l'acoustique proprement dite, toutes succinctes, mais donnant l'essentiel de ce qu'il convient de connaître. Chaque définition donne l'expression anglaise correspondante. Toutes les unités de mesure, quels que soient les systèmes utilisés, sont rapportées au système international (SI). — 332 p. 16 × 25, 182 fig., 15 photos, 19 tabl., cartonné, 1964 F 50,00

L'ACOUSTIQUE ÉLÉMENTAIRE DANS LE BATIMENT. Védeilhié R. — Notions de base, définitions. L'acoustique appliquée: Branches de l'acoustique; contrôle de l'énergie revertébrée. L'isolation phonique. L'isolation

antivibratile. Problèmes du bruit, le bâtiment: Généralités. Chaufferies. Conditionnement d'air et ventilation; bruits des ventilateurs. Installations sanitaires. Usines, ateliers, manufactures. Les bruits dans les habitations. Mesures. Législation. Compléments: graphiques et planches de résultats. Coefficients d'absorption. 172 p. 13,5 × 21, 25 fig. Nbr. tabl. 1967 F 29,00

FRÉQUENCES (H. et B.)

AMPLIFICATION

BASSE FRÉQUENCE ET HAUTE FIDÉLITÉ. — Brault R. — Notions d'acoustique. Notions sur la théorie atomique. Rapport de quelques notions d'électricité. Notions: sur les tubes électroniques, sur les transistors. Réaction et contre-réaction. Étude du circuit à charge cathodique et du circuit ultralinéaire. Systèmes de déphasageurs. Commandes de tonalité. Transformateurs B.F. Les haut-parleurs. Baffles et enceintes acoustiques. Les pick-up. L'alimentation des amplificateurs B.F. Étude d'un amplificateur à haute fidélité. Les préamplificateurs. Mesures à faire sur les amplificateurs. Versions commerciales et amateurs d'ampli-Hi-Fi. Notions sur les magnétophones. Stéréophonie. Écoute A.M. et F.M. en Hi-Fi. Matériel pour haute fidélité: H.P., P.U., transfo de sortie, tubes, disques, etc. — 880 p. 14,5 × 21, 450 schémas, relié toile, 3^e édit., 1964 F 62,00

ÉLECTRONIQUE ET RADIOÉLECTRIQUE. Thalmann G. — Tome I: Basse fréquence. — Symboles utilisés. Les tubes électroniques. Les tubes électroniques spéciaux. Les semi-conducteurs. L'alimentation des tubes électroniques et des transistors. L'électro-acoustique. L'amplification de tension par tube électronique. L'amplification de puissance par tube électronique. Le montage push-pull et l'étage déphasageur. L'amplification par transistor. Les circuits de contrôle et les amplificateurs. La contre-réaction. Code des couleurs. Tableau d'unités. — 416 p. 14 × 22, 452 fig., 4^e édit., 1968 F 52,00

Tome II: Haute fréquence. — Le rayonnement électromagnétique. Les ondes hertziennes et leur propagation. Les circuits à haute fréquence. Les circuits couplés. Les éléments du circuit oscillant. La production d'oscillations. Les procédés de modulation. La détection. Des perturbations et de leur élimination. Les lignes de transmission et les antennes. L'amplification de haute fréquence. La changement de fréquence. — 342 p. 14 × 22, 421 fig., 2^e édit., 1964 F 46,40

THÉORIE ET PRATIQUE DES CIRCUITS DE L'ÉLECTRONIQUE ET DES AMPLIFICATEURS. — Quinet J. et Petitclerc A. — Tome I: Application du calcul des imaginaires à l'étude des circuits. — Théorie et calcul des imaginaires. Application des imaginaires à l'électricité. Théorie et pratique des circuits fondamentaux de la radio et de l'électronique. — 320 p. 16 × 25, 239 fig., 6^e édit., 1968 F 28,00

Tome II: Les amplificateurs HF et BF. Les oscillateurs et la modulation. Filtres et ponts de mesure: Caractéristiques dynamiques et droites de charge. Étude des amplificateurs haute-fréquence et leurs circuits. Les oscillateurs. Modulations des oscillateurs; modulation en amplitude (AM), modulation de fréquence (FM). Générateurs d'impulsions: signaux rectangulaires et en dents de scie. Les filtres. Réception de la méthode des battements. Le changement de fréquence. L'amplification basse fréquence (liaison RC et par transformateur). Le push-pull B.F. La contre-réaction (et quelques autres montagnes). Amplification B.F. de puissance: étude du haut-parleur. Application des imaginaires à des

mesures radio-électriques: les ponts de mesures. — 430 p. 16 × 25, 182 fig., 6^e édit., 1968 F 37,00
Tome III: Propagation du courant HF le long des lignes. Abaque de Smith. Antennes. Équation de Maxwell et application: Ligne sans pertes. Ligne de longueur finie. Constantes d'une ligne. Ligne en court-circuit. Ligne ouverte et adaptation. Taux d'ondes stationnaires et coefficient de réflexion. L'abaque de Smith: construction, propriétés, emploi et applications. Lignes avec pertes. Cas général d'une ligne de longueur finie. Ligne ouverte et en court-circuit. Coefficient de réflexion et taux d'ondes stationnaires. Tensions dans les lignes. Bande passante et coefficient de surtension. Application aux antennes de la théorie des lignes. Rayonnement. Applications des ondes stationnaires aux antennes pour ondes courtes et en U.H.F. Émission et réception dirigées. Rideaux d'antennes et alignements. L'intérieur des corps. — 364 p. 16 × 25, 175 fig., 1 hors-texte, 2^e édit., 1967 F 28,00

AMPLIFICATION B.F. Monophonie. Stéréophonie. Lampes. Transistors. — Théorie et pratique. — Besson R. — Généralités. Les tubes électroniques. Les composants. Les appareils qui fournissent l'énergie modulée à l'amplificateur. Les appareils qui utilisent l'énergie modulée de l'amplificateur. Amplificateur basse fréquence théorique, monophonique et stéréophonique. Pratique de l'amplification basse fréquence monophonique et stéréophonique. Utilisation des amplificateurs. Les semi-conducteurs. Théorie et pratique de l'amplification basse fréquence. — 456 p. 15,5 × 24, 391 fig., nbr. tabl., 3^e édit., 1966 F 36,00

AMPLIFICATEURS BASSE FRÉQUENCE. Schure A. — Traduit de l'anglais par Aberdam H. — Les principes de l'amplification. Considérations fondamentales relatives aux amplificateurs. Amplificateurs basse fréquence de tension. Amplificateurs de puissance à tube de sortie unique. Amplificateurs de puissance « push-pull ». Principes des amplificateurs basse fréquence. — 98 p. 14 × 22, 38 fig., 1962 F 12,00

SCHÉMAS D'AMPLIFICATEURS BASSE FRÉQUENCE A TUBES. Besson R. — 20 schémas d'amplificateurs de 2 à 40 watts avec description détaillée des accessoires et particularités de chaque montage. — 64 p. 27 × 21, 80 fig. et schémas, 4^e édit., 1967 F 13,90

SCHÉMAS D'AMPLIFICATEURS BASSE FRÉQUENCE A TRANSISTORS. Besson R. — Amplification B. F. à transistors. Technologie des composants. Quelques conseils pour la réalisation des amplificateurs. Schémas de préamplificateurs. Amplificateurs fonctionnant sur pile ou accumulateur. Amplificateurs classe A sur secteur. Amplificateurs classe B sur secteur. Alimentations sur secteur. — 144 p. 15,5 × 24, 100 fig., schémas et tabl. 3^e édit., 1968 F 18,00

ANALYSE ET CALCUL DES AMPLIFICATEURS HAUTE-FRÉQUENCE. — Bensasson A. — Circuit anti-résonnant. Circuits couplés. Filtres de bandes à trois circuits couplés. Amplificateur à circuits décalés. Amplificateur RF à très large bande. Filtres réjecteurs. Utilisation des trappes à Q infini. Amplificateurs à transistors. Amplificateur F. I. sensible pour télévision en couleurs. Amplificateur F. I. à trois circuits et deux transistors. Calcul d'un amplificateur F.I. son pour téléviseur. — 448 p. 16 × 24, 372 fig., schémas et tabl., 1967 F 49,40

AMPLIFICATEURS A TRANSISTORS DE 0,5 à 100 watts. — Brault R. et J.-P. — Formation de cristaux P. et N. Jonction PN. Constitution d'un transistor. Tensions de clavage. Fréquence de coupure. Amplification de puissance. Liaisons entre transistors. Circuits destinés à produire des effets spéciaux. Amplificateurs à transistors. Alimentations stabilisées. Alimentation pour chaîne stéréophonique. Convertisseurs de puissance stéréophonique. Convertisseur. Radiateurs pour transistors. Amplificateurs de puissance. Préamplificateurs. Amplificateurs. Conseils pour le réalisation d'amplificateurs à transistors. — 175 p. 14,5 × 21, 93 schémas, 1968 F 24,00

AMPLIFICATION. Mounic M. — Première partie: Méthodes graphiques. Procédés de calcul. Contre réaction. — Amplificateurs: définition, classification. — Méthodes graphiques. — Calculs à partir des équations caractéristiques. — Calculs à partir des schémas équivalents. — Calculs en notation complexe. — Contre réaction tension-tension. — Types fondamentaux de contre réaction. — Exercices. — Caractéristiques. — 300 p. 16 × 22. Tr. nbr. fig., graphiques et tableaux, 1967 F 24,90

SONORISATION - ULTRASONS

PRATIQUE DE LA SONORISATION. Deschepper R. — Notions essentielles: Vibrations et oscillations. Nature physique du son. Physiologie de l'ouïe. Altérations et distorsions. La notion de haute fidélité. Unités de mesures acoustiques. Magnétisme et électromagnétisme. Théorie du condensateur. La piézo-électricité. L'essentiel de l'électronique (tubes et transistors). Matériel: Le haut-parleur. Les microphones, l'enregistrement magnétique, le disque, les procédés optiques. Enceintes acoustiques et pavillons. Les transformateurs B.F. L'amplification B.F. Les microphones, l'enregistrement magnétique, le disque, les procédés optiques. Emploi de la radio. Les applications: L'aménagement acoustique. La distribution du son. Art de la prise de son. Contrôles et mesures. Annexes: — 296 p. 16 × 24, 336 fig., 1964 F 27,80

QUALITÉ DU SON. Conditions auxquelles une installation de reproduction du son de grande qualité doit satisfaire (BB. Technique Philips). — Slot G. Traduit du néerlandais par Paquot P. — Le problème. Spécification technique. Puissance exigée. Distorsion non linéaire. Caractéristiques de fréquences. Modifications de la hauteur totale. Bruits parasites. Stéréophonie. Ambiphonie. Preuve expérimentale. Classification. Installation. — 180 p. 14 × 22, 61 fig., 26 tabl., 1965 F 19,00

TECHNIQUE DES ULTRA-SONS. Applications à basse et haute puissances. — Crawford A. E. — Traduit de l'anglais par Palmé J. — Théorie: Ondes ultrasonores. Cavitation. Emetteurs: Transducteurs piézo-électriques. Magnétostriction. Transducteurs et générateurs. Générateurs à veines fluides. Transducteurs électromagnétiques. Applications: Emetteurs divers. Précipitation et agglomération. Émulsification et dispersion. Applications chimiques. Applications métallurgiques. Revêtement des métaux. Applications biologiques et médicales. Instruments ultrasoniques et appareillage de contrôle. Applications diverses. — 456 p. 14 × 22, tr. nombr. fig., relié toile, sous jaquette, 1959 F 84,00

MANUEL PRATIQUE DU CONTRÔLEUR PAR ULTRASONS. — Pinondel M.-J. — Ce qu'il faut connaître de la théorie des ultrasons. Méthodes d'examen. Possibilités et limites du contrôle par ultrasons. Domaines d'application. Matériel utilisé dans le contrôle industriel. Contrôle en ondes longitudinales. Contrôle en ondes transversales. — 140 p. 16 × 25, 138 fig., 3 tabl., cart., 1967 F 33,70

LES TECHNIQUES ULTRA-SONORES. Générateurs d'ultra-sons. Applications pratiques, techniques et industrielles. — Hémardingeur P. — Les générateurs ultrasonores à magnéto et électrostriction. Les applications des ultra-sons. Le contrôle ultra-sonore des matériaux. Le sondage sous-marin et la détection des obstacles. Décapage, nettoyage et lavage ultra-sonores. La soudure, l'étamage et le façonnage par ultra-sons. Les applications des ultra-sons en métallurgie et en chimie. — 264 p. 13,5 × 21, 130 fig., schémas et photos, 11 tabl., 1964 F 33,00

STÉRÉOPHONIE (BB. Technique Philips). — Franssen N.V. Traduit du néerlandais par Clément E. — La phénoménologie de la perception auditive de la direction. La stéréophonie. L'acoustique des salles. Le mécanisme de la localisation par l'ouïe. La sensation de timbre et la hauteur du son. — 100 p. 16 × 25, 64 fig., relié toile, 1965 F 22,00

GUIDE PRATIQUE POUR CHOISIR UNE CHAÎNE HAUTE FIDÉLITÉ. Cozant G. — Un peu d'initiation; quelques principes. L'amplification. Pourquoi une chaîne? Les critères de la haute fidélité. La table de lecture, le tuner, l'amplificateur, l'ensemble de restitution sonore. Digression sur le magnétophone; l'installation. — 76 p. 12 × 27,5, nbr. fig. et schémas, reliure spirale, 1968 F 12,40

LES TUNERS MODERNES A MODULATION DE FRÉQUENCE HI FI STÉRÉO. Juster F. — Généralités sur la FM. — Principes de la FM. Antennes pour FM. Les récepteurs FM. Blocs VHF et préamplificateurs d'antennes: Blocs VHF (ou HF). Blocs VHF: à circuits intégrés, à transistors séparés, à transistors à effet de champ, à diodes à capacité variable. Préamplificateurs d'antennes. Amplificateurs MF et détecteurs: Amplificateurs MF. Amplificateurs: à circuits intégrés, avec divers détecteurs, à circuits intégrés technique française. Amplificateurs MF et détecteur en quadrature. Circuits MF et détecteur à impulsions. Décodeurs stéréo multiplex: Montage à transistors bipolaires. Décodeurs de technique allemande. Décodeur à circuits intégrés, à un seul circuit intégré. Exemple de tuner FM: à transistor à effet de champ diodes, à capacité variable. Circuits CAG et CAF et circuits intégrés. 240 p. 15 × 21,5. Tr. nb. fig., schémas et tableaux. 1970 F 34,00

INTERPHONES ET TALKIES-WALKIES. Besson R. — Schémas d'une liaison hertzienne. Émetteur. Récepteur. Réglementation française. Réalisation des appareils. Schémas industriels de talkies-walkies (gamme des 27 MHz). Microphones H.F. (gamme 30 à 40 MHz). Principe des interphones. Interphones dirigés à commutation manuelle. Amplificateur pour interphone. Intercommunication totale automatique. Portiers électroniques. Interphones H.F. à liaison par le secteur. Interphones H.F. à boucle inductive. — 192 p. 16 × 24, 42 illustr., 1969 F 27,80

COMMENT CONSTRUIRE BAFFLES ET ENCEINTES ACOUSTIQUES. Brault R. — Généralités. Le haut-parleur électrodynamique. Fonctionnement électrique, fonctionnement mécanique, fonctionnement acoustique du haut-parleur. Baffles et écrans plans. Coffrets clos. Enceintes acoustiques à ouvertures. Enceintes Bass-Reflex. Enceintes à labyrinthe acoustique. Enceintes à pavillon. Enceintes diverses. Réalisations pratiques d'enceintes et baffles. Réglage d'une enceinte acoustique. Conclusion. Haut-parleurs couplés à l'aide d'un filtre. Filtres. — 88 p. 14,5 × 21, nbr. fig., 3^e édit., 1970 F 15,00

MAGNÉTOPHONES

MANUEL TECHNIQUE DU MAGNÉTOPHONE. Masscho R. — Ruban. Têtes. Microphones. Amplificateurs. Précautions à prendre dans la réalisation des amplificateurs. Oscillateurs. Couplage des têtes à l'oscillateur. Haut-parleur et valises. Schémas complets. Mécanismes. Appareils multipistes. Appareils stéréophoniques. Appareils à défilement continu. Machines à dicter. Appareils générateurs de réverbération et d'échos. Maintenance. Mesure des performances. Dépannage. — 320 p. 16 × 24, 237 fig., 1967 F 34,00

LA NOUVELLE PRATIQUE DES MAGNÉTOPHONES. Construction. Mise au point. Entretien. Transformation. Applications. — Hémardinquer P. — Principes des magnétophones. Les supports magnétiques et leur emploi. Les plaques mécaniques. Montage électronique des magnétophones. Montage d'une platine de machine à ruban. Réalisation d'une machine à ruban. Magnétophones types d'amateurs. L'enregistrement à quatre pistes et sa pratique. Les magnétophones pour usages spéciaux. La stéréophonie. La télécommande et le contrôle automatique des magnétophones. Avantages et réalisations des magnétophones à transistors. Les magnétophones à cassettes. Les magnétophones et le cinéma. Les magnétophones d'enseignement. — 346 p. 13,5 × 21, 170 schémas, 16 tabl., 31 photogr. Nouv. édit., 1967 F 22,00

MAINTENANCE ET SERVICE DES MAGNÉTOPHONES. Hémardinquer P. — L'entretien des magnétophones. Contrôle et essais. Mise au point et perfectionnement. Pannes simples et dépannage rapide. Les pannes caractéristiques des magnétophones. La recherche rationnelle des pannes. Dépannages pratiques et réparations des magnétophones. Les pannes des magnétophones de marque. Tableaux des pannes et du dépannage. — 216 p. 13,5 × 21, 47 fig., nbr. tabl., 1968 F 22,80

LE MAGNÉTOPHONE. Un manuel complet de l'enregistrement magnétique et de ses nombreuses possibilités. Nijzen C.G. Traduit du néerlandais par Ciais R.L.L. — Qu'est-ce que le son ? Enregistrement et reproduction du son. Le

magnétophone et ses caractéristiques. Acoustique. Stéréophonie. Le choix d'un magnétophone. Conseils pour réaliser des enregistrements. Applications de A à Z. L'enregistrement dans l'enseignement et l'étude de la musique. Les chasseurs de sons. Machines à dicter. Partout présent dans le monde : l'enregistrement magnétique. — 148 p. 14 × 22, 59 fig., 30 photos, 2^e édit., 1968 F 22,00

MON MAGNÉTOPHONE. — Hémardinquer P. et Aubier M. — Connaissance de l'appareil : Petite histoire du magnétophone. Principes et fonctionnement. Différents types de magnétophones. Comment choisir, essayer et manœuvrer un magnétophone. Usages multiples d'un magnétophone. Le magnétophone et le cinéma d'amateur. Quelques perfectionnements et tours de main. Je deviens chasseur de sons : Montage et classement des bandes. Apprentissage de la prise de son. Vocabulaire alphabétique du magnétophone. — 200 p. 13,5 × 21,5, 90 fig., nouv. édit., 1964 F 10,70

L'ENREGISTREMENT MAGNÉTIQUE DE MESURES. Perreau P. et Soubiès-Camy H. — Rappels sommaires d'électromagnétisme. L'enregistrement magnétique. Enregistrement direct. Enregistrement par modulation de fréquence. Emploi de la commutation en enregistrement magnétique. Enregistrement numérique. Techniques analogiques et numériques. Enregistrement numérique d'informations sur bande magnétique. Utilisation de l'enregistrement magnétique. Installation d'essai d'un avion prototype, exemple du « Concorde ». Analyse des phénomènes vibratoires, utilisation de simulateurs analogiques. Mesures pendant la rentrée dans l'atmosphère des missiles balistiques. Les enregistreurs de sécurité et de contrôle opérationnel. Annexes : spectre d'un signal modulé en fréquence, développements récents des techniques d'enregistrement magnétique. — 136 p. 16 × 25, 54 fig., 1969 F 18,00

GUIDE PRATIQUE POUR CHOISIR ET UTILISER UN MAGNÉTOPHONE. — Gendre C. — Principe du magnétophone. Les pistes et les vitesses. Les appareils à cassettes. Quel magnétophone choisir ? Quelle bande magnétique adopter ? Les microphones. L'enregistrement et la reproduction. Renseignements utiles. — 50 p. 12 × 27,5, nbr. fig. et schémas, reliure spirale, 1969 F 10,50

LE CINÉMA SONORE D'AMATEUR et l'enregistrement magnétique. — Fréchet E. S. et Marchi (S. de). — Les bases techniques : Un peu de technologie. L'enregistrement magnétique. Les moyens : Choix et utilisation des matériaux. L'appareillage. La synchronisation image et son. Les synchroniseurs. Le cinéma parlant. Comment enregistrer : Apprenons à utiliser notre magnétophone. Les insuccès. Aménageons notre studio. Copie de disques et d'émissions radio. L'enregistrement des commentaires. Les enregistrements musicaux. Le phono-montage. Le bruitage. Les différents matériels utilisés pour le cinéma sonore d'amateur : Synchroniseurs pour la projection sonore. Les projecteurs sonores. Matériels pour la réalisation d'un premier et d'un deuxième type de film parlant. La sonorisation des films d'amateurs : Quelques définitions préliminaires. La post-sonorisation. La post-synchronisation. Le procédé play-back amateur. Le véritable cinéma parlant ou l'enregistrement synchrone-son image : Ce qu'est le cinéma parlant d'amateur. La réalisation pratique d'un film parlant. — 168 p. 16 × 21, 163 fig. et schémas, 5^e édit., 1969 F 17,40

COMMANDES PAR CORRESPONDANCE

Les commandes doivent être adressées à la LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, Paris (9^e). Elles doivent être accompagnées de leur montant, soit sous forme de chèque bancaire ou de mandat-poste (mandat-carte ou mandat-lettre), soit sous forme de virement ou de versement au Compte Chèque Postal de la Librairie : Paris 4192 - 26. Au montant de la commande doivent être ajoutés les frais d'expédition, soit 10% (avec un minimum de F 1,70). Taxe urgent : F 1,50 (pour la France métropolitaine). Envoi recommandé : France : F 1,50, étranger : F 3,00. Il n'est fait aucun envoi contre remboursement.

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, PARIS (9^e)

La Librairie est ouverte de 8 h 30 à 12 h 30 et de 14 h à 18 h 30. Fermeture du samedi 12 h au lundi 14 heures.

VOTRE FUTURE CARRIERE EST

Quels que soient votre âge, votre formation, le temps dont vous disposez, nous vous offrons la possibilité de réussir en vous créant, avec le maximum de chances, une situation conforme à vos goûts et à vos aptitudes.

Demandez l'envoi gratuit de la brochure qui vous intéresse :

E.C. 228 : COMPTABILITE : C.A.P. (Aide-Cpt.), B.E.P., B.P., B.S.E.C., B.T.S., D.E.C.S. - Expertise : C.S. révision comptable, C.S. juridique et fiscal, C.S. organisation et gestion - Caissier, Chef Magasinier, Conseiller fiscal - Cpté élément., Compte Commerciale, Gestion financière, etc.

C.C. 228 : COMMERCE : C.A.P. (Employé de bureau, de Banque, Sténodactylo, Mécanographe), B.E.P., B.P., B.S.E.C. - H.E.C., H.E.C.J.F. - Administrateur, Représentant, Vendeur - **MARKETING**, Gestion des entreprises, Publicité, Assurances, Hôtellerie - **Hôtesse**.

C.S. 228 : SECRETARIATS : C.A.P., B.E.P., B.P., B.S.E.C., B.T.S. - Secrétariat de Direction, Bilingue, Médical, de Dentiste, d'Avocat, Secrétaire techniques - Correspondance - **JOURNALISME** - Graphologie.

I.N. 228 : INDUSTRIE (Electricité, Electron., Mécan., froid, Chimie, **DESSIN INDUSTRIEL**) : C.A.P., B.E.P., B.P., B.Tn, B.T.S. - Ingénieur (Dipl. d'Etat) - Admission F.P.A., etc.

T.B. 228 : BATIMENT, DESSIN DE BATIMENT, TRAVAUX PUBLICS (C.A.P., B.P., B.T.S.) - **METRE** : Aide-métreur, Métreur, Métreur-vérificateur (C.A.P., B.P.) - Admission F.P.A., etc.

A.G. 228 : AGRICULTURE : Classes des Lyc. Techn. agric. : B.T.A., Ecoles Nationales sup., Ecoles vétérinaires - Eaux et forêts, Génie rural, Indust. agric., Gestion, Elevage, Radiesthésie, Topographie.

P.R. 228 : INFORMATIQUE : Initiation - Programmation - COBOL - FORTRAN - B.Tn en Informatique.

R.P. 228 : RELATIONS PUBLIQUES et Attachés de Presse.

C.F. 228 : CARRIERES SOCIALES ET PARAMEDICALES : Ecoles : Assistantes Sociales, Infirmières, Jardinières d'enfants, Sages-Femmes, Auxiliaires de Puériculture - Aide-soignante, Visiteur médicale, etc.

S.T. 228 : C.A.P. D'ESTHETICIENNE (Stages pratiques gratuits).

C.B. 228 : COIFFURE (C.A.P. dame) - **SOINS DE BEAUTE** - Esthét. visage buste, Manucure - Parfumerie - Diét.-Esthétique - Ecoles de Kinésithérapie et de Pédicurie.

C.O. 228 : COUTURE, MODE : C.A.P., B.P., Coupe, Couture (floc et Tailleur, Industries de l'habillement) - Enseignement ménager - Professorats.

R.T. 228 : RADIO - TELEVISION (N. et Coul.) : Monteur, Dépannage - **ELECTRONIQUE** : C.A.P., B.P., B.T.S., etc.

C.I. 228 : CINEMA : Technique générale, Scénario, Prises de vues de son, Réalisation, Projection, Lycée technique d'Etat Cinéma 8, 9.5 et 16 mm - **PHOTOGRAPHIE** (C.A.P.).

C.A. 228 : AVIATION CIVILE : Pilotes, Ingénieurs et Techniciens Hôtesses de l'air - Brevet de Pilote privé.

MM. 228 : MARINE MARCHANDE : Ecoles, Navigation de plaisance

C.M. 228 : CARRIERES MILITAIRES : Terre, Air, Mer.

T.C. 228 : TOUTES LES CLASSES, TOUS LES EXAMENS : du cours préparatoire aux cl. terminales - C.E.P., B.E., E.N., C.A.P. - B.E.P.C., Adm. en seconde, Baccalauréat - Cl. prép. aux Gdes Ecoles - Cl. des Lycées Techniques : Brevet et Bacc. de Techn. - Admiss. C.R.E.P.S., Dipl. Maître E.P.S.

E.D. 228 : ETUDES DE DROIT : Admission en Faculté des non-bacheliers, Capacité, Licence, Carrières juridiques.

E.S. 228 : ETUDES SUPERIEURES DE SCIENCES : Admission en Faculté des non-bacheliers, D.U.E.S. 1^{re} et 2^e année, Licence, I.P.E.S., C.A.P.E.S., Agrégation, MEDECINE : P.C.E.M. - **PHARMACIE - ETUDES DENTAIRES**.

E.L. 228 : ETUDES SUPERIEURES DE LETTRES : Admission en Faculté des non-bacheliers, D.U.E.L. 1^{re} et 2^e année, I.P.E.S., C.A.P.E.S., Agrégation.

E.P. 228 : LYCEES TECHNIQUES D'ETAT et autres établissements d'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE.

E.I. 228 : ECOLES D'INGENIEURS (ttes branches de l'industrie).

O.R. 228 : COURS PRATIQUES : ORTHOGRAPHE, REDACTION, Latin, Calcul, Conversation.

L.V. 228 : LANGUES ETRANGERES : Anglais, Allemand, Espagnol, Italien, Russe, Chinois, Arabe, Espéranto - Chambres de Commerce étrangères - Tourisme - Interprétariat.

P.C. 228 : CULTURA : Perfectionnement culturel, **UNIVERSA** : Initiation aux études supérieures.

D.P. 228 : DESSIN, PEINTURE ET BEAUX-ARTS : Illustration - Caricature, Mode, Publicité, Décoration - Professorats - Gdes Ecoles (Arts décoratifs) - Antiquaire.

E.M. 228 : ETUDES MUSICALES : Solfège, Guitare class., électriques instruments (contrôle sonore). Professorats.

ECOLE UNIVERSELLE PAR CORRESPONDANCE DE PARIS 58 BOULEVARD EXELMANS . PARIS XVI

14, chemin de Fabron. 06 NICE.

.43, rue Waldeck-Rousseau. 69 LYON 6^e

envoi gratuit
N° 228

Nom, Prénom:.....

Adresse:.....

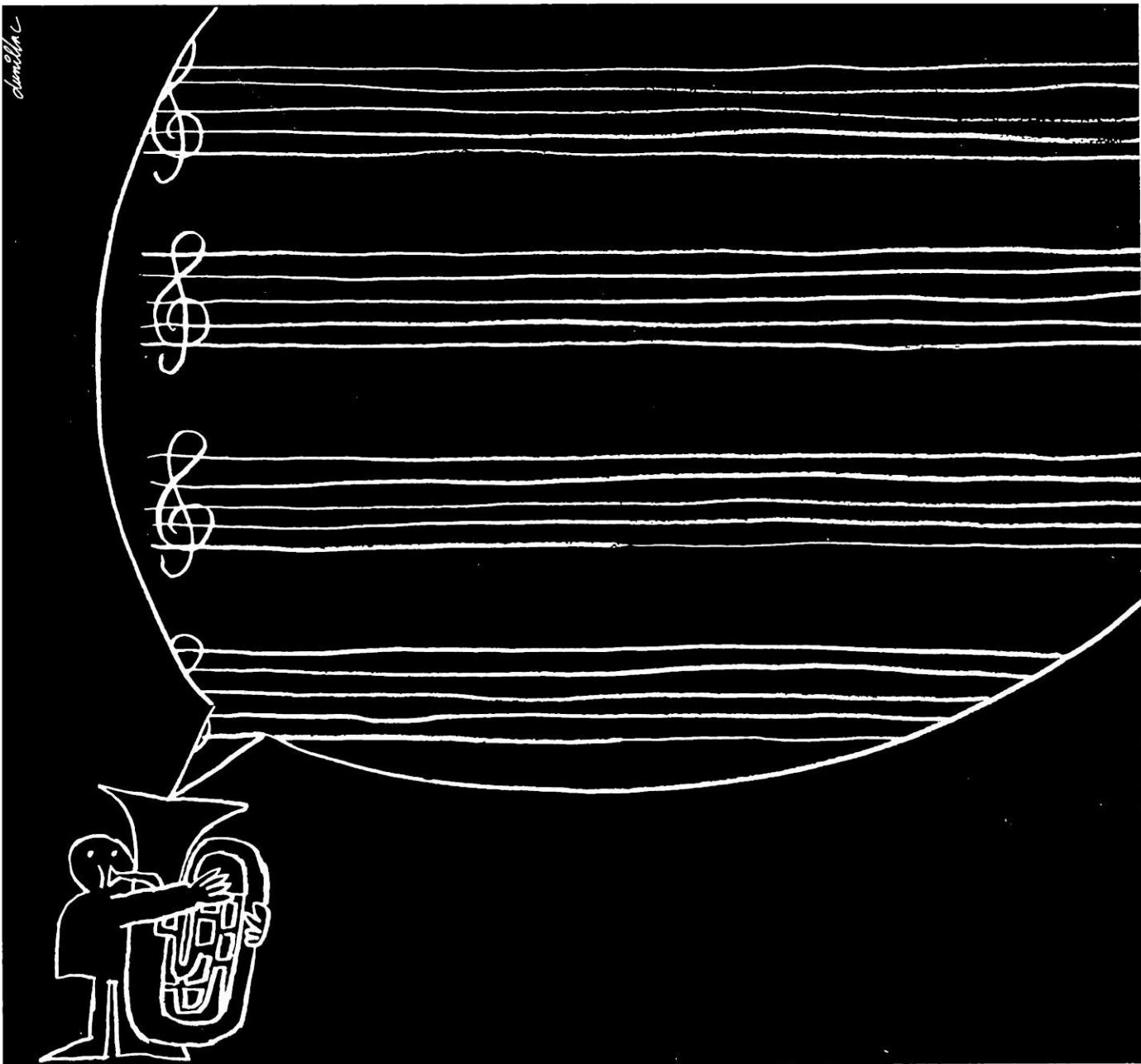
Niveau d'études:.....

Diplômes:..... âge.

Initiales et numéro
de la brochure

Profession
choisie

La liste ci-dessus ne comprend qu'une partie de nos enseignements. N'hésitez pas à nous écrire.



quel est ce "je ne sais quoi" qui manque à vos projections?

Une corrida sans paso-doble, une fête foraine sans "flon-flon", un mariage sans marche nuptiale... ce n'est pas tout à fait ça.

Accompagnez vos projections Photo-ciné d'une "ambiance sonore" enregistrée sur bande magnétique ; elles seront encore plus vivantes, encore plus réussies.

Réalisez montage sonorisé, bruitage, commentaire, accompagnement musical pré-enregistré avec les *Bandes Magnétiques Kodak*. Selon votre problème, vous utiliserez des bandes Longue, Double, Triple ou même Quadruple Durée. Et pour enregistrer sur le vif, choisissez les *Compact Cassettes Kodak* pour magnétophone à cassette. Elles sont disponibles en 3 durées d'enregistrement : 60, 90 et 120 minutes.

Kodak

L'ambiance de vos projections, c'est l'affaire de Kodak.



Bandes Magnétiques et Cassettes Kodak