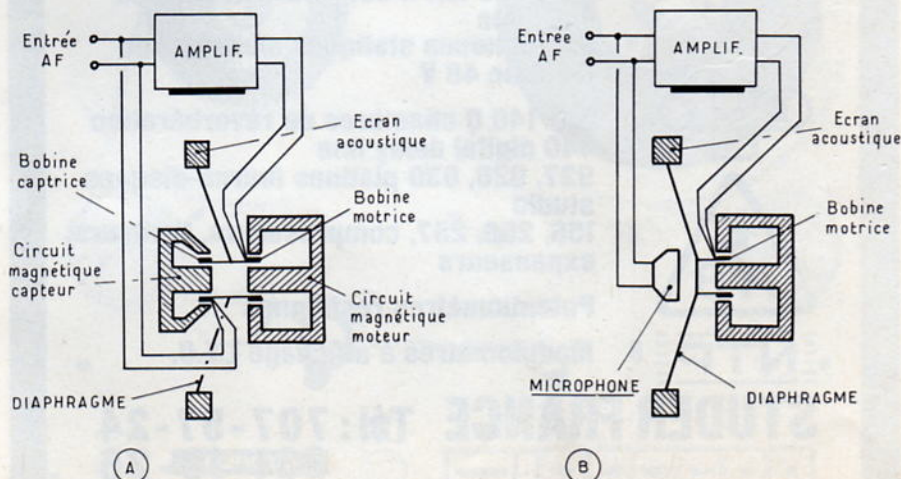


haut-parleurs et précisions historiques

Au récent « Festival International du Son de Paris, furent présentées plusieurs enceintes acoustiques, dont les haut-parleurs destinés à la restitution des sons les plus graves étaient électriquement asservis au signal audio-fréquence, afin que sa traduction acoustique fut aussi correcte et fidèle que possible.

Sans doute, la technologie des haut-parleurs électrodynamiques et des amplificateurs transistorisés est-elle actuellement plus favorable qu'elle ne l'avait jamais encore été à la production industrielle d'appareils exploitant des procédés, qui hantèrent si souvent les rêves des électroniciens-acousticiens au cours des récentes décennies, qu'il est difficile d'imaginer combien peut être ancienne l'idée d'appliquer une rétroaction correctrice aux mouvements du diaphragme d'un haut-parleur, afin de mieux en assurer la conformité des déplacements au signal à restituer.

On ne remonte guère en général au-delà de la première édition, en 1940, du magistral traité « Acoustical Engineering » de Harry F. Olson, qui fait état (fig. 1) de deux méthodes d'asservissement applicables aux haut-parleurs, avec suffisamment de détails critiques, pour laisser augurer d'essais notablement antérieurs. Aussi, sommes-nous infiniment reconnaissant à M. H. D. Harwood, appartenant aux « Services de Recherches de la B.B.C. », pour les précieux renseignements historiques qu'il apporte dans un récent article, publié par notre confrère britannique « Wireless World », dans son numéro de mars 1974. Un article, qui donne aussi une haute idée de l'ingéniosité humaine; car s'il est classique d'attribuer à Nyquist (1932) et Black (1934) les premiers travaux théoriques consacrés à la rétro-action et à la stabilité des systèmes asservis, il est non moins certain que rétro-action



rétroaction cinétique : et évolution

et asservissement furent utilisés bien avant, avec une claire conception de ce que l'on pouvait en attendre, y compris la correction de réponse des haut-parleurs (problème délicat, entre tous).

Selon M. Harwood, dont les documents se limitent à la Grande-Bretagne, le premier brevet, traitant de rétro-action cinétique fut accordé le 29 janvier 1924, sous le n° 231972, à cet extraordinaire pionnier des techniques audio-fréquences que fut P.G.A. Voigt (ancien ingénieur de la firme « Edison Bell », il avait fabriqué, entre 1922 et 1924, un prototype de haut-parleur électrodynamique — sans doute inspiré du mécanisme transducteur, breveté par Sir Oliver Lodge en 1898 — assez voisin de celui qui devait illustrer, en 1925, les noms de Rice et Kellog; à cela près qu'une face de son diaphragme était chargée par un pavillon). Voigt utilise un pont

alternatif, inspiré de celui de Maxwell (fig. 2), pour isoler une tension indicatrice des mouvements de la bobine mobile de son transducteur sonore, qu'il exploite ensuite en rétro-action. Il obtient ainsi, ce qui se nommerait aujourd'hui asservissement de vitesse : la résonance fondamentale du haut-parleur s'en trouve considérablement amortie; mais on perd 6 dB/octave quand diminue la résistance de rayonnement du diaphragme (fig. 1). Voigt avait nettement conscience de la réduction des distorsions du haut-parleur par son procédé, dont l'application est toutefois assez délicate; car, s'il faut corriger dans une branche du pont les variations de résistance de la bobine mobile s'échauffant sous l'effet du courant modulé, il est également difficile de compenser exactement la part inductive de son impédance (en raison de l'armature magnétique en fer doux).

Après Voigt, toujours en Grande-Bretagne, nous trouvons A.F. Sykes, titulaire du brevet n° 272622, accordé le 20 mars 1926. La tension de rétro-action est obtenue (fig. 1) par un capteur auxiliaire (deuxième bobine mobile ou même microphone) étroitement solidaire de la bobine mobile motrice. En pratique, Sykes se limite à une seconde bobine mobile (avec son propre circuit magnétique) où s'engendre une force électro-motrice proportionnelle à la vitesse instantanée de la bobine principale et use d'un enroulement compensateur (comme cela se fait avec les microphones) pour annuler les tensions parasites, directement induites dans la bobine caprice. Tout comme Voigt, Sykes obtient un asservissement de vitesse; mais son procédé — souvent repris par la suite — implique, à l'époque, un dispositif capteur coûteux et encombrant, car il importe que la

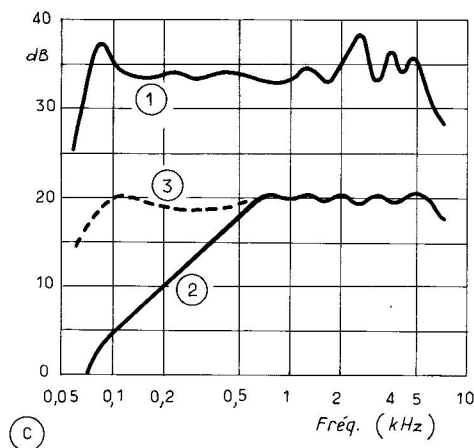
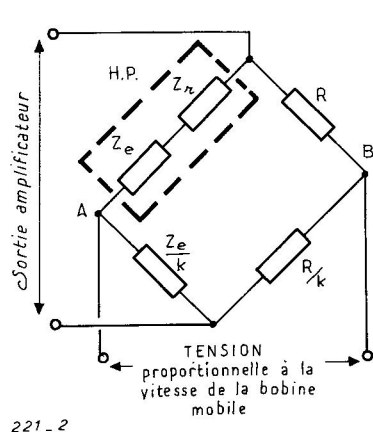
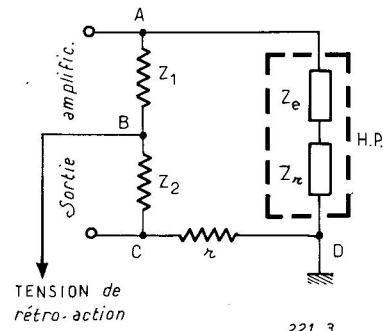


Fig. 1. — *Reproduction de la figure, accompagnant dès 1940, le chapitre consacré dans « Acoustical Engineering », de H. F. Olson, à la correction par rétro-réaction de la réponse acoustique d'un haut-parleur électrodynamique (ce chapitre n'a pas été sensiblement modifié pour les éditions de 1947 et 1957). Olson ne paraît avoir connu que les travaux de A. F. Sykes; la solution B avec microphone capteur est sans intérêt, mais la solution A donne des résultats intéressants, concrétisés par les courbes de réponse obtenues en C. Le tracé (1) correspond à la réponse du haut-parleur sans rétro-action cinétique; alors que (2) montre l'effet d'une simple rétro-action cinétique de vitesse, entraînant une atténuation de 6 dB/octave au-dessous de la fréquence où la résistance de rayonnement du diaphragme commence à diminuer. En (3), réponse obtenue après correction électrique de l'atténuation précédente.*



221-2

Fig. 2. — Schéma théorique du pont d'impédance, proposé en 1924 par P. A. G. Voigt pour obtenir une tension proportionnelle à la vitesse instantanée de la bobine mobile d'un haut-parleur électrodynamique. Le haut-parleur intervient dans le pont par son impédance purement électrique Z_e , en série avec une composante Z_r , due à la réaction de l'air ambiant sur les mouvements du diaphragme. Z_e/k est une image homothétique de Z_e , avec k compris entre 4 et 10 pour ne pas y dissiper inutilement trop de puissance. Si le pont est équilibré, comme indiqué, on obtient entre A et B une tension proportionnelle à la vitesse instantanée de la bobine mobile (cette solution est à la base des travaux de MM. Brette et Perrin ainsi que des actuelles réalisations de la Société « 3 A »).



221-3

Fig. 3. — Idée schématique d'une rétro-action cherchant à compenser électriquement la partie purement électrique Z_e de l'impédance du haut-parleur. Les bornes de sortie de l'amplificateur étant supposées flottantes, la tension de rétro-action apparaissant en B, soit $(V_B - V_D)$ est la somme d'une rétro-action négative de tension, due au pont diviseur Z_1 et Z_2 et d'une rétro-action positive d'intensité, engendrée dans r (résistance aussi faible que possible, pour ne pas y dissiper inutilement trop de puissance). Un choix judicieux de Z_1 et Z_2 permet de synthétiser une impédance de sortie $-Z_e$, afin que l'amplificateur contrôle directement Z_r . Si le gain de l'amplificateur est suffisamment élevé, cette synthèse idéale conduit à la condition $r \cdot Z_1 = Z_e \cdot Z_2$, analogue à celle de la figure 2 et fournit une rétro-action de vitesse. Si une borne de l'amplificateur est à la masse, comme dans la majorité des circuits transistorisés, on obtient $V_B - V_D$ par un étage différentiel. La figure 3 met en lumière qu'une rétro-action cinétique introduit électriquement une rétro-action positive, exigeant des précautions particulières, pour assurer la stabilité du montage.

bobine auxiliaire se déplace dans un champ parfaitement constant.

En troisième lieu, M. Harwood, cite le brevet n° 320 713, accordé le 10 août 1928 à M. Trouton, lequel propose un capteur électrostatique push-pull (donc transducteur d'amplitude), malheureusement peu sensible, en raison du grand écartement des armatures, imposé par les elongations maximales de la bobine mobile. En fait, le principal intérêt du travail de M. Trouton se situe ailleurs; car il fut le premier à avoir compris que la méthode permettant d'isoler la tension de rétro-action cinétique importait peu; à condition de l'utiliser après transformation convenable, entraînant l'asservissement de la grandeur désirée. M. Trouton accorde sa préférence à l'accélération plutôt qu'à la vitesse de la bobine mobile, pour que le rayonnement acoustique du diaphragme soit pratiquement indépendant de la fréquence; à condition de limiter l'asservissement aux fréquences où ce diaphragme travaille en piston, puisque ne sont véritablement contrôlés que les seuls mouvements de la bobine mobile motrice, en même temps que la résistance de rayonnement varie sensiblement de 12 dB/octave.

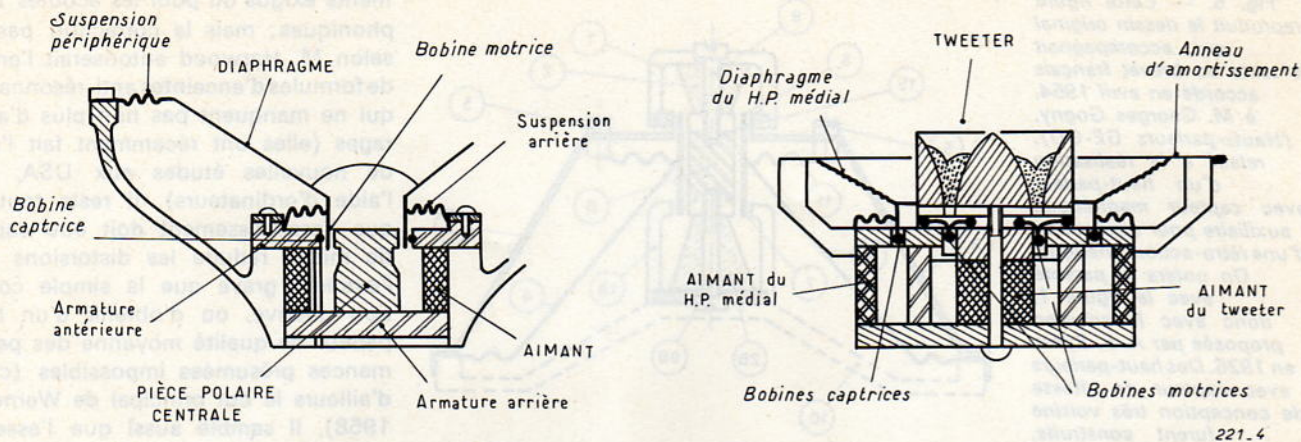
Aucun brevet antérieur à 1930 ne propose de capteur accéléromètre, comme le fait Philips pour sa récente enceinte acoustique « MFB 22RH532 » (voir *Revue du Son*, n° 244-245); mais il est curieux de constater combien furent

ingénieurs les premiers électro-acousticiens, car il n'a guère été innové depuis, en dehors des perfectionnements technologiques facilitant l'exploitation de circuits, qui durent poser bien des problèmes (Voigt ne devait disposer en 1924 que de tubes électroniques triodes à chauffage direct). Toutefois, comme il est équitable de penser que les Britanniques ne concentrent pas la totalité des facultés inventives du genre humain, il paraît fort probable que l'on puisse découvrir à la même époque des brevets, ou des publications techniques, consacrés à l'asservissement des haut-parleurs, aussi bien en Europe, qu'en Amérique ou en Russie (toute communication à ce sujet serait d'ailleurs bienvenue). Sur le plan pratique, il semble que de brillants expérimentateurs parvinrent souvent à obtenir des résultats étonnants de leurs prototypes, dont il fut toujours difficile d'assurer la reproductibilité industrielle; ce qui justifie le peu de crédit qu'ils obtinrent et la méfiance qu'ils suscitèrent jusqu'à une date relativement récente.

Bien que la Seconde Guerre Mondiale ait dû s'accompagner de notables perfectionnements aux systèmes d'asservissement électronique en tous genres, la seconde édition du traité d'Olson, en 1947 n'apporte rien de nouveau par rapport à celle de 1940 (pas davantage que la dernière, datée de 1957; ce qui laisse penser que les « Laboratoires d'Acoustique de la RCA » que dirigeait H. F. Olson, s'intéressaient peu

à la question); mais il y a toujours des perfectionnistes pour reprendre le flambeau. C'est ainsi que les Hollandais De Boer et Schenkel, publient en 1948 une étude générale dans « The Journal of Acoustical Society of America » intitulée « Electromechanical Feedback », surtout consacrée à l'asservissement des mécanismes de haut-parleurs (M. De Boer qui collabora d'assez près avec les Laboratoires Philips d'Eindhoven publia, par ailleurs, de nombreux travaux à ce sujet). Quoi qu'il en fut des résultats pratiques, on demeura dans une ligne de pensée orientée par l'asservissement rétro-actif; alors qu'au début des années 50, allait se révéler une nouvelle école, d'abord assez empirique, travaillant à partir de considérations électroniques, liées à l'impédance de la bobine mobile du haut-parleur.

Sans entrer trop avant dans la théorie, rappelons seulement que du point de vue électrique (telle qu'elle apparaît à la sortie d'un amplificateur) l'impédance de la bobine mobile d'un haut-parleur électrodynamique se compose d'une résistance ohmique associée à une composante inductive (impédance propre du haut-parleur bloqué), à laquelle s'ajoute l'impédance traduisant électriquement les effets du rayonnement acoustique, ainsi que de l'inertie et de l'élasticité des pièces en mouvement. Vers 1951-52, divers chercheurs, parmi lesquels Tanner, W. Clements, U. J. Childs aux USA, pensèrent que l'impédance pure-



221.4

Fig. 4. — A titre de document historique on trouvera ici les coupes des haut-parleurs spécialement conçus en 1957, pour l'ensemble « Integrand ». Il s'agit en fait de 3 haut-parleurs : un élément grave, de diamètre 38 cm, complété d'une structure coaxiale groupant l'élément médial à diaphragme conique (avec bobine mobile de diamètre 11,5 cm) et un tweeter à diaphragme annulaire chargé par un pavillon, avec déflecteur central. Chaque bobine mobile motrice est directement associée à sa bobine caprice (donc nécessité d'une compensation des tensions directement induites de la bobine motrice vers la bobine caprice). Il y avait 3 amplificateurs (36 W par canal en régime continu), précédés d'un filtre de répartition électronique coupant à 350 et 2 500 Hz.

ment électrique de la bobine mobile cachait à l'amplificateur la seule partie importante d'origine mécanique, laquelle devait recevoir, sans altération, le signal à restituer. Pour y parvenir, il convenait de synthétiser électroniquement, comme éléments de l'impédance de sortie de l'amplificateur, une résistance et une inductance négatives, respectivement opposées, à la résistance et à l'inductance de la bobine mobile bloquée, en combinant les effets de deux rétroactions : l'une négative de tension, l'autre positive d'intensité (fig. 3). En dehors de considérations de stabilité, il fut curieux de constater (et plusieurs auteurs le constatèrent alors, avec surprise) que la compensation parfaite de l'impédance de la bobine mobile bloquée produisait exactement un asservissement de vitesse, avec un pont engendrant la tension globale de rétro-action très proche de celui de Voigt. Childs et Clements ne semblent pas avoir obtenu grand succès pratique en 1952; mais leurs idées furent reprises en 1958 par R. E. Werner (des Laboratoires RCA, spécialiste des fusées) dans un article des « I.R.E. Transactions on Audio » : « Loudspeakers and Negative Impedance » (haut-parleurs et impédance négative), qui aurait inspiré, dit-on, les créateurs de l'actuel système « Servo-Sound ».

Il conviendrait sans doute de saluer au passage l'assez génial novateur (M. Crowhurst, ingénieur-conseil, ex-

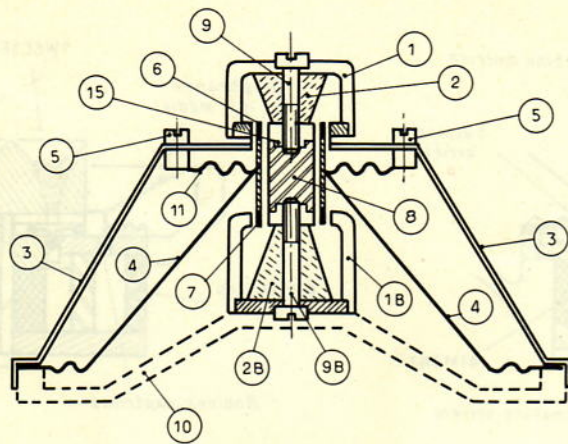
ingénieur en chef de la firme anglaise « Tannoy ») qui osa commercialiser en 1957 (sous la dénomination « Integrand » avec la firme « Brand Products ») un ensemble à trois haut-parleurs se répartissant le spectre audible, spécialement conçus pour être individuellement asservis avec leur propre amplificateur transistorisé (le circuit utilisé de Sinclair et Lin à symétrie quasi-complémentaire, datait tout juste de 1956). Les haut-parleurs du système « Integrand » avaient deux bobines mobiles superposées (formule Sykes), l'une motrice l'autre caprice, avec enroulement compensateur (fig. 4). L'ensemble était présenté comme un « Servo Speaker Amplifier System », capable d'une nouvelle qualité sonore, dite « Servo Fidelity », avec des performances étonnantes (35-16 000 Hz \pm 3 dB et taux de distortion acoustique par harmoniques inférieur à 1 %). En dépit de jugements extrêmement élogieux de la presse technique américaine, l'ensemble « Integrand », trop en avance sur son temps, également trop coûteux et sans doute peu fiable ne parvint pas à s'imposer et disparut de la scène commerciale en quelques mois.

Plus près de nous, MM. Brette et Perrin, en France, publiaient, en 1961, de très intéressantes études dans « Toute la Radio », orientées vers un asservissement avec pont de vitesse, comme Voigt, qui malheureusement ne purent se concrétiser, car la chaîne « à pression

acoustique asservie » que devait construire les Établissements « Promelec » ne fut jamais commercialisée, croyons-nous. Dans un ordre d'idée différent, G. Gogny avait breveté, en 1954, un haut-parleur à capteur de vitesse auxiliaire (voir *Revue du Son*, n° 137 et 138), donc selon Sykes (fig. 5), qui servit d'élément de base à quelques intéressantes réalisations (en particulier, associé à deux cellules « Orthophase » au cours de l'année 1964), dont la fabrication n'a pas été continuée. Signalons aussi, en 1963, deux remarquables études de H. W. Holdaway, publiées dans « I.E.E. Transactions on Audio », (pratiquement périmées en même temps qu'imprimées, car basées sur des circuits amplificateurs à tubes et transformateurs de sortie), passionnantes par leurs traitements parallèles d'un même problème, selon les optiques asservissement ou compensation d'impédance et montrant l'importance d'accepter au départ un certain déséquilibre du pont, donnant la tension de vitesse; car Holdaway demeure fidèle à Voigt. De nombreux chercheurs auraient leur place au palmarès de l'asservissement des haut-parleurs, dont la réussite demeure, en dépit de tout, une œuvre de longue et minutieuse patience. Le constructeur d'une enceinte acoustique asservie très réussie, qui eut beaucoup de succès au récent « Festival » aurait commencé ses travaux il y a huit ans; La première publication relative aux

Fig. 5. — Cette figure reproduit le dessin original qui accompagnait le texte du brevet français accordé en avril 1954, à M. Georges Gogny, (Haut-parleurs GE-GO), relatif à la réalisation d'un haut-parleur avec capteur magnétique auxiliaire pour application d'une rétro-action cinétique.

On notera la parenté avec la figure 1, donc avec la solution proposée par A. F. Sykes en 1926. Des haut-parleurs avec capteur de vitesse de conception très voisine furent construits, notamment au Japon et, au récent « Festival du Son », l'idée fut reprise avec succès par « Esart ».



recherches de MM. J. A. Klaassen et H. de Koning, ayant abouti à l'enceinte « MFB » de Philips date de 1968.

Revenant à l'étude, publiée par Wireless World, M. Harwood soulève une question qui méritera d'être étudiée avec grande attention, car il ne paraît pas absolument convaincu des mérites

de l'asservissement, en comparaison de la correction passive des défauts de la réponse du haut-parleur, qu'il assure plus aisée et moins onéreuse; mais exigeant la même puissance maximale de l'amplificateur. Le grand intérêt de l'asservissement est de s'accommoder de coffrets clos de très faible volume, nettement avantageux dans les appartements

exigus ou pour les écoutes téraphoniques; mais la correction passive, selon M. Harwood autoriserait l'emploi de formules d'enceintes anti-résonnantes, qui ne manquent pas non plus d'avantages (elles ont récemment fait l'objet de nouvelles études aux USA, avec l'aide d'ordinateurs). Il reste toutefois que l'asservissement doit être capable de mieux réduire les distorsions dans l'extrême grave que la simple correction passive, ou d'obtenir d'un haut-parleur de qualité moyenne des performances présumées impossibles (c'était d'ailleurs le but principal de Werner en 1958), il semble aussi que l'asservissement puisse considérablement réduire le traînage; ce qui n'est pas mince avantage. Toujours selon M. Harwood, il semble probable que devraient se multiplier les enceintes acoustiques avec amplificateurs incorporés, certaines asservies, d'autres usant de moyens de correction passifs: sans que l'on puisse prévoir quelle solution l'emportera; à moins que ce ne soit une combinaison des deux.

Référence bibliographique : Motional Feedback in Loudspeakers par H. D. Harwood (Wireless World, mars 1974).

R. L.

à propos d'une légende vocale

Le grand ténor italien Caruso était capable, dit-on, de briser un gobelet de cristal, en l'ébranlant à sa fréquence de résonance par la seule puissance de sa voix. Personne n'ayant été capable de répéter cette expérience, beaucoup en vinrent même à douter de la vérité de cette performance légendaire. La question vient d'être très sérieusement reconsidérée par Peter W. Tappan (appartenant au très réputé bureau d'études acoustiques, fondé, aux USA, par MM. Bolt, Beranek et Newman), qui en fit l'objet d'une communication au dernier Congrès de l'« Audio Engineering Society » (le 11 septembre 1973 à New York, en l'hôtel Waldorf-Astoria).

L'étude ayant été entreprise à la demande des services publicitaires d'une grande chaîne de télévision américaine, deux chanteurs prouvèrent aux téléspectateurs que leurs voix (amplifiées, il est vrai) étaient capables de briser un gobelet de cristal, comme le fit

autrefois Caruso, sans aide électroacoustique.

A cet effet, il fut utilisé un haut-parleur alimenté par un amplificateur capable de lui fournir 100 W modulés en régime permanent. Ce haut-parleur était monté dans un coffret clos de type classique, à cela près que l'ouverture frontale, à l'avant du diaphragme, n'avait que 5 cm de diamètre, afin de concentrer l'énergie des ondes sonores à l'intérieur d'un étroit faisceau. La cavité du gobelet était dirigée vers l'orifice émetteur, à 5 cm de distance environ. La plus grande difficulté, selon M. Tappan, fut d'obtenir des chanteurs des notes aussi pures que possible, sans le moindre trémolo, susceptible de réduire l'énergie rayonnée à la fréquence de résonance des gobelets utilisés.

Il fut ainsi expérimentalement prouvé qu'il était possible de briser de nombreux gobelets de cristal par des niveaux sonores compris entre 142 et 148 dB,

et il fut noté que deux chanteurs atteignaient 140 dB par leurs seuls moyens vocaux.

Considérant la voix exceptionnelle de Caruso, dont la puissance d'émission devait certainement surclasser celle des chanteurs contemporains, il paraît hautement probable que la performance légendaire du gobelet brisé soit véridique (aidée peut-être du choix heureux d'un gobelet à la fréquence de résonance bien placée) *.

R. L.

* Caruso usait aussi, dit-on, de l'artifice consistant à rayer l'extérieur du gobelet, avec le chaton en diamant de sa bague. (Ndlr.)