

oszillographie auch schnellst veränderliche Vorgänge herausarbeiten kann. Der Einwand, es liessen sich durch eine genaue Fourieranalyse gewöhnlicher Oszillogramme mehr Einzelheiten erkennen als aus Oktavsieboszillogrammen, ist ohne weiteres durch den Hinweis zu entkräften, dass es jeder Zeit möglich ist, auch die Oktavsieboszillogramme zusätzlich Oktavbereich für Oktavbereich nach Fourier zu analysieren, wobei man dann alle die Einzelheiten gewinnen kann, die überhaupt durch eine Fourieranalyse herausgearbeitet werden können; ein derartiges mühsames Vorgehen dürfte aber, wie die behandelten Beispiele zeigen, nur bei ganz bestimmten Fragestellungen erforderlich sein.

Für die phonetische Wissenschaft dürften Untersuchungen mit der oktavsieboszillographischen Methode von besonderem Interesse sein. Ist es doch jetzt möglich, — sei es am unmittelbar aufgenommenen Text, sei es vom Tonfilm oder von Schallplatten aus —, rasch und ohne grosse Rechenarbeit sehr weit reichende Feststellungen über die zeitlichen Aenderungen der Klangzusammensetzung zu machen, Aussagen über persönliche Klangfarbe, über dialektische Eigentümlichkeiten oder dergl. zu gewinnen.

DISCUSSION :

Dr. D. WEISS (Antwerp) :

Wenn man die Vokalcharakteristika in *gesungenen* Vokalen sucht, so läuft man Gefahr, sie dort zu suchen, wo sie am allerwenigsten vorhanden sind. Orientierende Versuche im logopädischen Ambulatorium der Wiener Universitätsklinik für Ohren-, Nasen- und Kehlkopfkrankheiten haben ergeben, dass selbst phonetisch vorgeschulten Personen Irrtümer unterlaufen, wenn sie den Vokalcharakter von gesungenen Vokalen, von denen sie aber nur den mittleren Teil hören (also weder den Anfang noch das Ende), beurteilen wollen. — Der Gegensatz HELMHOLTZ-HERMANN in der Frage des physiologischen Zustandekommens der Vokale scheint durch die Koppelungsfrage abgelöst zu werden, d. h. die Koppelungsfrage lässt diese alte Streitfrage als überholt erscheinen. — Die Entscheidung zugunsten der rein harmonischen Obertöne (im Sinne Helmholtz'), die man durch das äusserst geistreiche Suchtonverfahren von GRÜTZMACHEE als herbeigeführt betrachtet hat, kann doch nicht als einwandfrei betrachtet werden, handelt es sich doch, wie HERMANN meint, um unharmonische Obertöne, die immer mit einer Phasenverschiebung, also „aperiodisch“ beginnen und aus diesem Grunde den Suchtoneffekt nicht hervortreten lassen

können, auch wenn sie vorhanden sind. Ausserdem klingen sie ja nach der Hermannschen Auffassung rasch ab. So möchte ich eben meinen, dass die Frage durch das Suchtonverfahren nicht entschieden ist, man müsse andere Methoden zwecks Entscheidung suchen.

19. Prof. A. VAN ITTERBEEK (Louvain) : *Sur l'absorption du son dans les gaz.*

1. Un des problèmes des plus difficiles, mais cependant des plus intéressants en acoustique est celui de l'absorption du son ou la perte d'énergie que subit une onde sonore lorsqu'elle se propage soit dans une atmosphère libre ou bien dans un milieu gazeux limité par une enceinte.

Le problème de l'absorption du son peut avoir son intérêt pour la phonétique, en ce sens que cette absorption dépend fortement de la fréquence. La perte en énergie acoustique n'est pas la même pour toutes les fréquences. Le cas de l'absorption par une masse gazeuse enfermée dans une enceinte serait certainement le plus intéressant pour la phonétique. Or, il faut avouer que les expériences ainsi que la théorie ne sont pas encore suffisamment avancées pour pouvoir être appliquées à ce cas.

Pour le moment on est seulement parvenu à comprendre l'absorption du son dans un gaz non limité par des parois et ceci même date seulement depuis les deux dernières années. Il nous semble cependant que ceci constitue déjà un très grand avancement, sinon la base essentielle de la solution du problème de l'absorption considérée sous sa forme la plus générale. Pour cette raison il nous paraît utile de développer ici le problème de l'absorption sous sa forme particulière — l'absorption dans un gaz non limité par des parois.

Grâce au travail expérimental qui a été fait les deux dernières années dans mon laboratoire (1) nous avons eu une très grande part dans la résolution du problème sous sa forme particulière.

2. *Le problème de l'absorption du son dans les gaz.* L'air qui nous entoure permet au son de se propager autour de nous. Si on faisait le vide autour de nous, on ne nous entendrait plus. Les conditions physiques de l'air (température, pression, présence de gaz étrangers tels que la vapeur d'eau ou l'anhydride carbonique) ont une influence très grande sur la perte en intensité du son le long de son chemin de parcours. Le problème qui

(1) A. VAN ITTERBEEK et P. MARIËNS, *Physica*, 4, 207, 1937; 4, 609, 1937; *Nature*, 140, 856, 1937; *Physica*, 5, 153, 1938.
A. VAN ITTERBEEK and L. THYS, *Physica*, 5, 298, 1938.

était posé par les physiciens était : comment l'absorption du son peut-elle être exprimée en fonction de ces différents facteurs ?

À côté de son intérêt pratique le problème était d'une importance capitale pour la physique elle-même.

Comme on sait un gaz est constitué de particules (molécules) et le son se propage justement dans une atmosphère gazeuse, par suite des chocs entre les différentes molécules. La membrane d'un téléphone ou d'un haut-parleur communique ses vibrations aux molécules environnantes et ces dernières communiquent alors leur mouvement à des molécules situées plus loin et ainsi de suite. L'intensité d'une onde sonore peut être considérée comme proportionnelle au mouvement des molécules et celles-ci perdent beaucoup de leur mouvement par suite des chocs successifs qu'elles exécutent le long du trajet de l'onde sonore.

Le mécanisme du choc entre les molécules touche immédiatement à la structure même des molécules. On sait en physique que toutes les molécules possèdent une structure plus ou moins compliquée. Chaque atome dont les molécules sont constituées doit être considéré comme un système planétaire formé de particules individuelles (électrons, protons). Chaque molécule doit alors être considérée comme une association de systèmes planétaires. Le problème de la propagation et de l'absorption d'une onde sonore est intimement lié au choc entre des pareils systèmes. Il n'est pas nécessaire de fixer l'attention sur la grande importance que ce problème a pour la physique expérimentale et théorique modernes.

Le problème de l'absorption du son a été traité par la théorie en deux étapes. La première étape a donné lieu à ce qu'on appelle l'absorption classique. La théorie de cette absorption qui a été donnée par KIRCHHOFF (1), HELMHOLTZ (2) et STOKES (3) date déjà du siècle précédent. Les dernières années on s'est aperçu qu'à côté de cette absorption classique il fallait encore considérer une autre cause d'absorption et qui donne lieu à ce qu'on peut appeler l'absorption interne. La théorie de ce phénomène date seulement depuis les trois dernières années et a été donnée par KNESER (4).

Au moment où nous avons commencé nos expériences on était encore dans l'incertitude concernant la validité des deux théories précédentes. Une étude systématique sur l'absorption du son dans les gaz n'avait pas encore été faite. Les expériences avaient ici un très grand retard sur la théorie et cela provenait

(1) KIRCHHOFF, *Ann. d. Phys.*, 134, 177, 1868.

(2) HELMHOLTZ, *Verh. d. nat. hist. mediz. Vereins*, Heidelberg, 3, 267, 1863.

(3) STOKES, *Math. et Phys. Papers*, 1, 100, 1880.

(4) H. KNESER, *Ann. d. Phys.*, 16, 337, 1933.

du fait que des mesures sur l'absorption du son, ou indirectement la mesure de l'intensité acoustique en fonction de la distance, présentent des grandes difficultés expérimentales.

Nous avons réussi à mettre à point une méthode qui permet de mesurer l'absorption du son dans un gaz avec grande précision et ainsi grâce à un travail expérimental très étendu nous avons pu mettre à l'épreuve les théories existantes pour l'absorption.

3. *Analyse du phénomène d'absorption du son dans les gaz.* Quand une onde sonore se propage dans une atmosphère gazeuse, cette onde perd de son énergie le long de son parcours. Appelons E l'énergie à la distance x , et E_0 , l'énergie correspondant à un endroit de référence x_0 , on aura la formule exponentielle :

$$E = E_0 \cdot e^{-a(x-x_0)}$$

a s'appelle le coefficient d'absorption. On sait actuellement, d'après les expériences faites, qu'il existe deux causes prédominantes, mais de nature complètement différente, qui produisent cette perte d'énergie. L'une qui peut être expliquée au moyen de la physique classique (*absorption classique*), n'a rien à voir avec le mécanisme interne des molécules, l'autre cause est liée au mécanisme interne des molécules et pour l'expliquer il faut avoir recours à la physique moderne (*absorption de vibration* ou *absorption interne*).

A. *Absorption classique* (a_{cl}). Les calculs ont montré que ce coefficient est essentiellement déterminé par la viscosité et la conductibilité thermique, qui sont deux grandeurs physiques très connues du gaz et qu'on peut trouver dans les tables physiques. Ce sont KIRCHHOFF, HELMHOLTZ et STOKES qui ont fait les calculs pour a_{cl} et ils ont montré ainsi que

$$a_{cl} = \frac{4\pi^2}{\rho \cdot W \cdot \lambda^2} [4/3 \eta + (1/c_v - 1/c_p) K] \quad (Cl)$$

$\pi = 3,1416$, ρ est la densité du gaz = p/RT (p pression du gaz, R une constante universelle et T la température absolue), W la vitesse de propagation du son, λ la longueur d'onde = $1/f$ (f la fréquence) η la viscosité, K la conductibilité de chaleur du gaz, c_v et c_p deux grandeurs physiques qu'on peut aussi trouver dans des tables.

Grâce aux recherches que nous avons entreprises les deux dernières années nous avons pu montrer que cette formule est complètement valable. On peut en tirer les conclusions suivantes :

1° Il est donc possible de calculer a priori l'absorption du son dans un gaz par la formule (Cl) en utilisant les données physiques lues dans les tables.

2° Comme η , K et W varient en fonction de la température, α_{cl} changera par conséquent également en fonction de la température. α_{cl} augmente avec la température.

3° α_{cl} augmente lorsque la pression diminue, dans les altitudes élevées l'absorption sera donc grande.

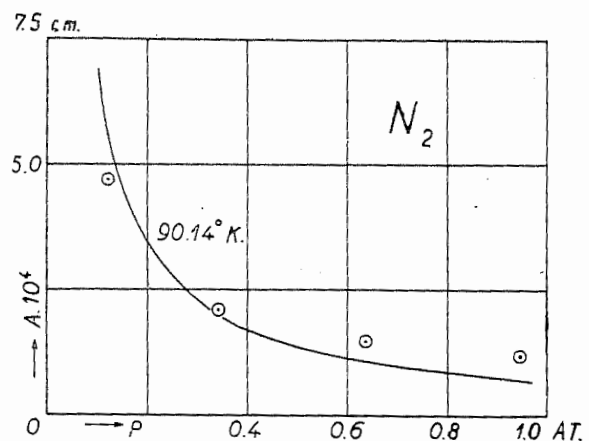
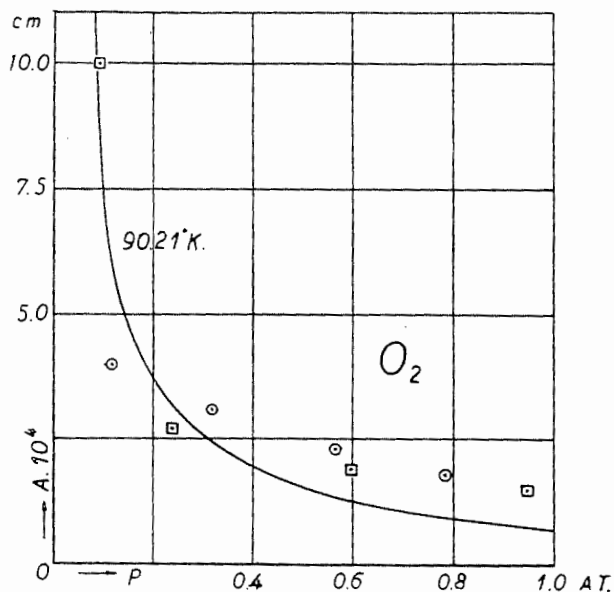


Fig. 1 et Fig. 2

Absorption classique ($A = \alpha_{cl} \lambda^2$) dans l'oxygène et l'azote.

4° α_{cl} varie proportionnellement au carré de la fréquence.

Les figures 1 et 2 résultent des mesures que nous avons faites il y a un an et qui montrent la validité de la formule (Cl). La courbe pleine correspond aux valeurs théoriques calculées d'après la formule théorique (Cl), les points désignent des points expérimentaux.

B. *Absorption due à l'énergie interne des molécules.* Cette absorption est en pratique la plus importante. Il est assez difficile de faire comprendre le mécanisme de cette absorption par des personnes qui ne sont pas familiarisées avec la physique moderne.

Comme nous avons fait remarquer ci-dessus les molécules doivent être considérées comme une association de systèmes planétaires, dont les différentes parties sont assujéties à un mouvement continu. Ce mouvement constitue le mouvement interne de la molécule. Le mouvement de translation de l'ensemble de la molécule est appelé le *mouvement externe*. On peut faire la comparaison avec une automobile à l'intérieur de laquelle se trouve différentes personnes. Ici également il faudra faire une distinction entre le mouvement de déplacement de l'automobile et le mouvement des personnes se trouvant à l'intérieur. Quand deux automobiles entrent en collision il y a un échange entre les mouvements externes et internes. Pour les chocs entre les molécules on a affaire à un échange d'énergie analogue, mais heureusement moins tragique. Quand donc des molécules entrent en collision, ce qui est le cas dans la propagation du son, il y a une perte continue d'énergie externe (énergie acoustique) en énergie moléculaire interne. Même dans certains cas il peut arriver (p. ex. pour l'anhydride carbonique) que toute l'énergie acoustique se transforme en énergie interne et que par conséquent le son ne parvient pas à propager sur une distance plus grande que quelques cm. La grande absorption par l'anhydride carbonique permet ainsi d'expliquer pourquoi pendant les jours d'hiver très froid, le son se propage beaucoup plus facilement que pendant des jours brumeux.

Nous avons fait une étude expérimentale détaillée de l'absorption interne et nous sommes arrivés à la conclusion que la théorie de KNESER, sauf dans certains cas (hydrogène léger et lourd, hélium, néon) s'applique. De cette théorie on peut tirer les conclusions suivantes :

1° l'absorption interne est dans certains cas beaucoup plus grande que l'absorption classique ;

2° elle dépend fortement de la fréquence acoustique ; la courbe absorption interne — fréquence acoustique possède un maximum très prononcé ;

3° cette absorption croît rapidement lorsque la température augmente et dépend aussi de la pression ;

4° l'absorption interne peut augmenter beaucoup lorsqu'il y a dans le gaz certaines impuretés, comme p. ex. la vapeur d'eau qui a une très grande influence. Même la présence de certaines impuretés peut avoir comme effet que le son ne passe plus à travers une masse gazeuse. Ceci a également un intérêt pratique, en effet l'air qui nous entoure n'est seulement un mélange mais contient en outre un grand nombre de gaz étrangers.

Le mécanisme de l'absorption du son dans les mélanges n'est pas encore bien connu jusqu'ici. Nous avons justement entrepris une étude systématique des mélanges.

Comme suite à ces différentes considérations on peut faire remarquer comment le phénomène de la perte d'énergie acoustique dans un gaz est déjà un phénomène très compliqué. On comprend comment le phénomène est encore plus compliqué quand le gaz est limité par certaines parois, contre lesquelles il faut considérer le frottement des ondes sonores.

20. Prof. C. ZWIKKER (Delft) : *Vues nouvelles sur l'acoustique des salles.*

§ 1. — On me permettra sans doute de supposer que c'est un fait bien connu que l'acoustique des salles a pour la première fois été étudiée d'une façon scientifique par l'Américain WALLACE CLEMENT SABINE. Il entama cette étude à une époque séparée de la nôtre d'un demi-siècle environ.

SABINE apprit à ses contemporains que le défaut acoustique de beaucoup d'auditoires consiste en un excès de résonance, et que toute sorte de considérations sur les interférences, les vases résonantes et autres phénomènes plus mystérieux n'étaient guère applicables dans la pratique.

L'excès de résonance est une conséquence du fait que les matériaux de construction dont on se sert ordinairement sont trop durs du point de vue acoustique, et le résultat de la théorie de SABINE a été que nombre de matériaux acoustiquement doux ont été produits qui absorbent le son à un degré considérable. Actuellement il est possible d'appliquer des matériaux de revêtement d'un coefficient d'absorption très élevé et de faire en sorte que la résonance demeure restreinte. Ces derniers temps les efforts des fabricants de ces matériaux tendaient moins à l'augmentation de l'absorption du son qu'à la possibilité de donner à ces matériaux la qualité de satisfaire aux exigences d'architecture, de résistance et d'hygiène.

Et, en effet, au début presque tout affaiblissement de résonance donnait lieu à une amélioration de l'acoustique, puisque, même avec l'application des meilleurs matériaux disponibles, on restait toujours du même côté de la résonance optimale.

Peu à peu cela a changé. Avec le perfectionnement des matériaux acoustiques s'est insensiblement introduit le danger d'un amortissement trop grand, et aujourd'hui l'architecte doit se demander très bien jusqu'où il doit pousser l'assourdissement. A cela s'ajoute que dans des salles fortement amorties toute sorte d'effets vont jouer un rôle qui dans des salles résonantes ne se remarquent pas ou guère.

§ 2. — SABINE déjà a donné une formule simple du moyen de laquelle on peut calculer la durée du résonnement dans un auditoire. Il vérifiait sa formule d'après quelques salles de concert examinées expérimentalement et il trouvait une bonne harmonie entre la théorie et les mesures. Sans aucun doute le hasard et le bonheur lui ont été favorable en cela à un certain degré, car à présent l'acousticien est moins sûr dans ses calculs.

En premier lieu il faut pouvoir disposer des constantes de la matière. Il s'est trouvé que le coefficient d'absorption d'une certaine matière peut dépendre fortement de la façon dont on l'applique. En second lieu il s'est trouvé que le coefficient mesuré dépend de l'étendue de la surface de l'échantillon par suite des effets provenant des bords ; pour cette même raison il faut savoir si la matière forme une surface unie, ou bien est divisée en beaucoup de petits morceaux, et la distribution de ces morceaux sur les parois de l'auditoire elle aussi exerce son influence. Aussi n'y a-t-il rien d'étonnant dans le fait que les résultats de l'essai de laboratoires différents, opérant d'après des méthodes différentes, mais tous avec des échantillons de dimensions relativement petites, diffèrent assez entre eux. Aussi pour l'interprétation de ses calculs l'expert d'acoustique a besoin d'une grande expérience, et il lui faut considérer d'une façon critique dans leurs rapports mutuels les données provenant de laboratoires différents.

Et puis encore les calculs concernant la résonance à l'instar de SABINE ne sont praticables que pour la partie située au milieu du spectre sonore. Dans les registres plus élevés il faut tenir compte, outre de l'absorption du son par les parois, de celle dans l'air elle-même (1) ce qui est un cas d'absorption non de surface, mais de volume. Cette absorption augmente rapidement avec le ton, mais elle dépend en outre de l'humidité de l'air. Dans des salles non pourvues d'une installation d'aération qui garantit une atmosphère constante, l'absorption de l'air ne peut être qu'évaluée, estimée.

Dans les registres plus bas il se produit une absorption par suite de la co-vibration de panneaux (2), de meubles, voire même

(1) V. O. KNUDSEN, *Jl. Ac. Soc. Am.*, 3, 126, 1931 ; 5, 112, 1933.

(2) E. MEYER et L. CREMER, *Z. techn. Phys.*, 14, 500, 1933.