# L'oreille et l'ouïe, une des bases de la technique des télécommunications

Autor(en): **Furrer, W.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung = Bulletin technique / Administration des télégraphes et des téléphones suisses = Bollettino tecnico / Amministrazione dei telegrafi e dei telefoni svizzeri**

Band (Jahr): **22 (1944)**

Heft 2

PDF erstellt am: **20.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-873100

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

BERN, den 1. IV. 1944 № 2 JAHRGANG - ANNÉE - ANNO XXII

# TECHNISCHE MITTEILUNGEN

HERAUSGEGEBEN VON DER SCHWEIZ. TELEGRAPHEN- UND TELEPHON-VERWALTUNG

# BULLETIN TECHNIQUE

PUBLIÉ PAR L'ADMINISTRATION DES TÉLÉGRAPHES ET DES TÉLÉPHONES SUISSES

# BOLLETTINO TECNICO

PUBBLICATO DALL'AMMINISTRAZIONE DEI TELEGRAFI E DEI TELEFONI SVIZZERI

PTT

**Inhalt — Sommaire — Sommario:** L'oreille et l'ouïe, une des bases de la technique des télécommunications. — Schaltungen für Konferenzgespräche. Les dispositifs des communications collectives. — Neuerungen auf dem Gebiete der Nachrichtentechnik in der Schweiz für das Jahr 1938. — Equipement téléphonique utilisé par les studios pour les transmissions radiophoniques extérieures. — Strafrechtlicher Schutz des Telegraphen- und Telephonbetriebes. La protection légale des installations télégraphiques et téléphoniques. — Steuerdomizil von Telephonistinnen, die zum Armeestab detachiert sind. — Aus den Anfängen der Telegraphie in der Schweiz. — Der Slogan. — Verschiedenes. Divers: Technik und Wirtschaft. — Neues Telephon-Kabelnetz im Fricktal. — „La" normal. — Bulletin des avalanches. — Relazioni telefoniche con l'America del Sud. — Fernsprechsteuer in Kroatien. — Radio und Geisteskranke. — Radiostörsender. — Relais. — A propos de l'invention de la sonnerie électrique. — Von Frage und Antwort bei dienstlichen Beanstandungen. — Kurse für Menschenführung. — Der klare Befehl. — Le „la" par téléphone. — Fachliteratur. Littérature professionnelle: Das Buch vom Telephon. — Rundgang durch das Schweizerische Postmuseum in Bern. — Ein Röhrengerät zur Messung von Leistung, Spannung und Strom. — Totentafel. Nécrologie: Walter Stutz, alt Telephonchef. — Personalnachrichten. Personnel. Personale.

## L'oreille et l'ouïe, une des bases de la technique des télécommunications.

(Traduction)

W. Furrer, Berne. 612.85:621.39

### Introduction.

De nombreuses branches de la technique s'intéressent à la physiologie des organes des sens, mais ce n'est nulle part le cas d'une façon aussi marquée que pour la technique des télécommunications. Les deux principaux moyens de transmission, le téléphone et la radio, transmettent uniquement des impressions destinées à notre oreille, de sorte que les propriétés de l'oreille humaine déterminent les principes techniques des systèmes de transmission téléphoniques et radiophoniques. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce qu'une bonne partie des progrès réalisés dans le domaine de l'acoustique physiologique soit due aux travaux des ingénieurs des télécommunications, en particulier à H. Fletcher et à G. v. Békésy pour ne citer que ces deux noms. En développant les méthodes de mesures électro-acoustiques, la technique a également apporté une contribution importante aux recherches physiologiques.

Entre la radio et le téléphone, il existe une différence fondamentale que nous ne pouvons pas ignorer ici. Alors qu'un système de transmission radiophonique doit fonctionner de manière que notre oreille ne puisse percevoir qu'une différence aussi faible que possible entre l'original et la transmission, le téléphone doit avant tout avoir un rendement économique. Dans ce dernier cas, on ne peut donc pas s'en tenir aux limites imposées par l'oreille, mais l'émission doit être concentrée et comprimée sous la seule réserve d'une intelligibilité encore suffisante de la parole transmise. En conséquence, aux considérations d'ordre physiologique s'ajoutent encore des considérations psychologiques qui permettent de juger et de calculer l'intelligibilité. Toutefois, nous ne nous occuperons pas ici de ce sujet.

### I. STRUCTURE DE L'OREILLE.

L'appareil auditif se divise anatomiquement en trois parties: l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. Cette division s'impose aussi du fait des fonctions physico-physiologiques bien distinctes de ces trois parties.

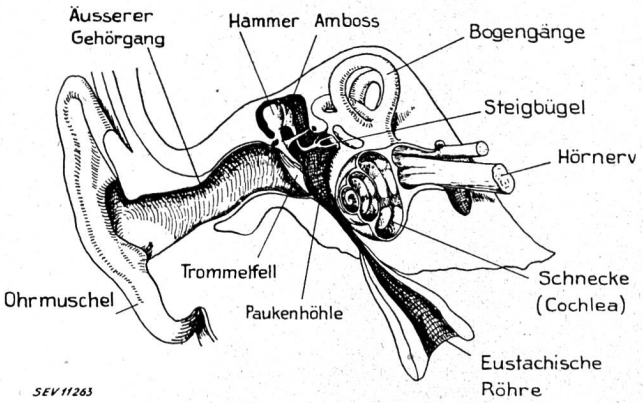


Fig. 1. Représentation schématique de l'appareil auditif (d'après Körner).
Aeusserer Gehörgang = Conduit auditif externe. Hammer = Marteau. Amboss = Enclume. Bogengänge = Canaux semi-circulaires. Steigbügel = Etrier. Hörnerv = Nerf auditif. Schnecke = Limaçon. Eustachische Röhre = Trompe d'Eustache. Paukenhöhle = Caisse du tympan. Trommelfell = Membrane tympanique. Ohrmuschel. = Pavillon.

*L'oreille externe* comprend le pavillon ainsi que le conduit auditif formé par une partie externe cartilagineuse et une partie interne osseuse; il est fermé par la membrane du tympan (fig. 1). Au point de vue acoustique, le pavillon n'a absolument aucune importance; sa présence pourrait peut-être s'expliquer par l'histoire de l'évolution. Le conduit auditif a une longueur moyenne de 3,5 cm et une section d'environ 0,8 cm².

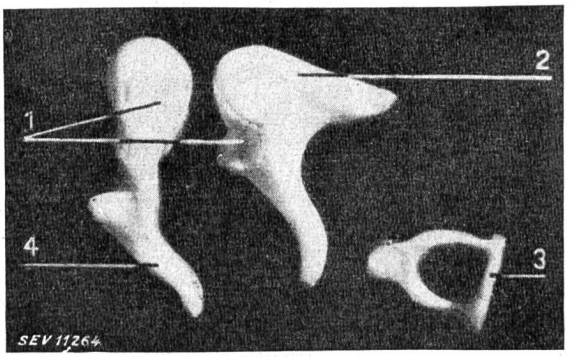


Fig. 2. Les trois osselets de l'oreille moyenne: le marteau, l'enclume et l'étrier.
1. Surface de contact du marteau et de l'enclume.
2. Enclume.
3. Base de l'étrier.
4. Manche du marteau soudé à la membrane tympanique (d'après Békésy).

Ces données sont importantes pour la construction des récepteurs téléphoniques, car le conduit auditif représente la charge mécano-acoustique de la membrane téléphonique. La fermeture hermétique du conduit auditif est assurée par la membrane tympanique qui a une très grande analogie avec la membrane conique d'un haut-parleur. Elle a une forme conique, rigide, tendue légèrement à la périphérie par un repli. La tension est provoquée par un petit muscle spécial.

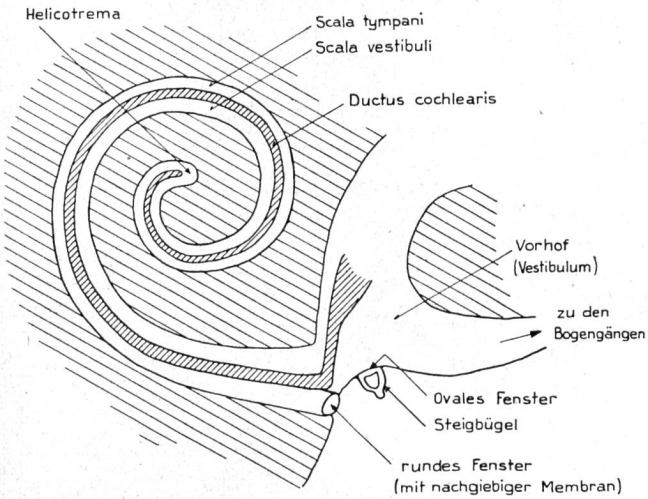


Fig. 3. Schéma de l'oreille interne (d'après Toldt).
Helicotrema = hélicotrème.
Scala tympani } mit Perilymphe =
Scala vestibuli }
Rampe tympanique } remplies de périlymphe.
Rampe vestibulaire }
Ductus cochlearis mit Endolymphe = Canal cochléaire rempli d'endolymphe. Vorhof = Vestibule. Zu den Bogengängen = vers le labyrinthe. Ovales Fenster = Fenêtre ovale. Steigbügel = Etrier. Rundes Fenster (mit nachgiebiger Membran) = Fenêtre ronde (avec membrane élastique).

Derrière la membrane tympanique se trouve *l'oreille moyenne* avec la caisse du tympan qui renferme trois osselets, le marteau, l'enclume et l'étrier (fig. 2). Le marteau est intimement fixé à la membrane du tympan par son manche; la base de l'étrier s'appuie sur l'oreille interne. Les trois osselets sont reliés et maintenus ensemble par un système compliqué de muscles et de ligaments. Par un canal appelé trompe d'Eustache, la caisse du tympan communique avec le pharynx. Normalement, ce canal reste fermé; il ne s'ouvre que lorsqu'on avale, ce qui a pour effet d'égaliser les différences de pression statiques des deux côtés de la membrane du tympan.

*L'oreille interne* est logée dans le rocher du temporal qui la protège admirablement contre toute action mécanique. En avant de la caisse du tympan se trouve le vestibule qui communique avec le labyrinthe et le

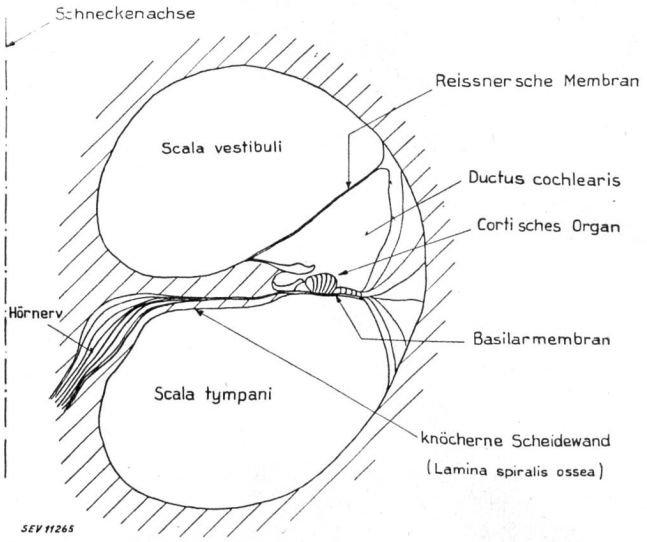


Fig. 4. Coupe schématique du limaçon (d'après Toldt). Schneckenachse = Axe du limaçon. Reissnersche Membran = Membrane de Reissner. Ductus cochlearis = Canal cochléaire. Cortisches Organ = Organe de Corti. Basilarmembran = Membrane basilaire. Knöcherne Scheidewand = Lame spirale osseuse. Scala vestibuli = Rampe vestibulaire. Scala tympani = Rampe tympanique. Hörnerv = Nerf auditif.

limaçon ou cochlée. Le labyrinthe dont les parties essentielles sont les trois canaux semi-circulaires qui sont perpendiculaires les uns aux autres est le siège du sens de la position et de l'équilibre; il réagit aux accélérations et en commande les réflexes. Il fonctionne donc sous de grossières excitations mécaniques, tandis que le limaçon perçoit les ondes sonores d'un ordre de grandeur énergétique beaucoup plus faible. Le limaçon, chez l'homme, s'enroule de 2¾ tours; sa cavité est divisée par une cloison sur toute sa longueur en deux parties: la rampe tympanique et la rampe vestibulaire (fig. 3) qui sont toutes deux remplies de périlymphe et communiquent entre elles par l'orifice du sommet de l'axe du limaçon, l'hélicotrème.

La cloison du limaçon est en partie osseuse (la lame spirale), en partie membraneuse (la membrane basilaire). Cette dernière, avec la membrane de Reissner, limite le canal cochléaire (fig. 4) qui est rempli d'endolymphe dont la viscosité approche de 2,9. Sur la membrane basilaire, à l'intérieur du canal cochléaire,

se trouve l'organe de Corti qui constitue en fait l'organe transformateur qui change l'irritation physique en excitation nerveuse. C'est là que s'épanouissent les terminaisons du nerf auditif. La construction de l'organe de Corti avec ses cellules variées, piliers, arcades, cils vibratiles, etc., est très compliquée et l'étude de son mécanisme n'est nullement épuisée. La physique et la physiologie de cet organe forment un vaste domaine que nous ne pouvons pas traiter ici. A l'extérieur du limaçon, le nerf auditif, par son rameau vestibulaire, s'unit au huitième nerf cranien.

L'oreille moyenne communique avec l'oreille interne par la fenêtre ovale qui est fermée par la base de l'étrier. La fenêtre ovale conduit au vestibule, puis à la rampe vestibulaire. La sortie de la rampe tympanique vers la caisse du tympan est formée par la fenêtre ronde, qui est fermée par une membrane très tendre et élastique (fig. 3).

## II. MÉCANISME DE L'AUDITION.

*Oreille externe.* Les ondes sonores qui pénètrent dans le conduit auditif font vibrer la membrane tympanique qui le ferme. La trompe d'Eustache étant fermée, aucune énergie sonore ne parvient de l'autre côté de la membrane tympanique de sorte que celle-ci est actionnée par la pression acoustique, et l'oreille travaille comme un microphone fonctionnant sous l'action de la pression acoustique.

Le rendement de ce dispositif dépend en tout premier lieu de l'impédance de la membrane tympanique. L'impédance acoustique est définie par le rapport existant entre la pression acoustique et la vitesse alternative du son; pour une onde plane, elle est de 42 ohms acoustiques dans l'air (unités C.G.S). Pour les fréquences de 600 à 5000 périodes environ, la mesure de l'impédance de la membrane tympanique donne des valeurs qui ne sont que très peu au-dessus de ces 42 ohms acoustiques de sorte que, dans cette bande de fréquences, la membrane du tympan travaille comme un récepteur idéal (fig. 5). L'énergie sonore qui pénètre dans le conduit auditif est ainsi absorbée presque sans aucune perte par la membrane tympanique; une très faible partie seulement est réfléchie.

On peut aussi exprimer le rendement de la membrane tympanique par son coefficient d'absorption qui, dans la bande de fréquences considérée, tend vers 1. La fréquence propre de la membrane tympanique peut être mesurée directement; elle est d'environ 1000 périodes.

*Oreille moyenne.* Le limaçon dans lequel l'énergie acoustique doit être finalement transmise est rempli

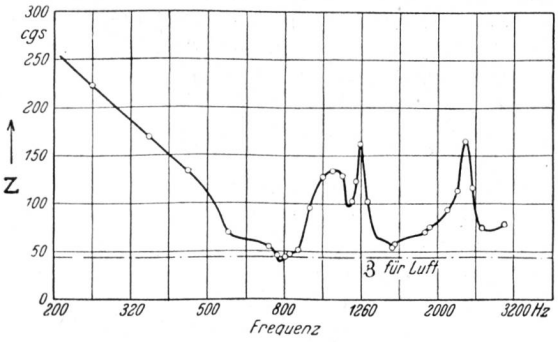


Fig. 5. Impédance de la membrane tympanique (d'après Tröger).

de liquide lymphatique. Or, un liquide est beaucoup plus résistant au son que l'air, c'est-à-dire qu'il a une impédance acoustique beaucoup plus élevée. Ainsi, l'eau a une impédance de 144 000 ohms acoustiques. Donc, pour que le plus possible d'énergie sonore soit transmise dans l'oreille interne, il faut que la faible impédance de la membrane tympanique soit transformée jusqu'à atteindre le niveau élevé de l'impédance de l'oreille interne. C'est la tâche des osselets de l'oreille moyenne.

La base de l'étrier a une surface d'à peu près 3 mm² soit environ 20 fois inférieure à la surface vibrante de la membrane tympanique (équivalent de la membrane conique); en outre, par un effet de levier, les osselets réduisent du facteur 1,3 environ l'amplitude des oscillations transmises, de sorte que la transformation de pression totale atteint la valeur de 25—30. La racine du rapport d'impédance air/eau est 58, d'où il ressort que l'adaptation de l'impédance est bien proche de l'état idéal. Il est vrai qu'on ne sait pas avec certitude si le liquide de l'oreille interne propage véritablement les ondes sonores, autrement dit si le liquide est comprimé, ou bien si la colonne de liquide se déplace simplement en un seul bloc.

Mais la tâche de l'oreille moyenne n'est pas encore terminée. L'adaptation d'impédance que nous avons expliquée pourrait être obtenue par un mécanisme beaucoup plus simple que celui que représente l'oreille moyenne. Békésy a démontré que lorsque l'amplitude d'oscillation de la membrane tympanique augmente, l'amplitude de l'étrier augmente d'abord aussi proportionnellement, mais qu'une fois une certaine pression acoustique atteinte, son oscillation change subitement de forme dans ce sens que la pression sur le liquide de l'oreille interne cesse d'augmenter. Ce changement est dû au fait que les osselets se trouvent dans une espèce d'équilibre instable pouvant provoquer, dans le cas de très grosses amplitudes, un changement subit de la forme d'oscillation.

*Oreille interne.* Le mouvement de la base de l'étrier dans la fenêtre ovale transmet l'énergie sonore au liquide du limaçon ou plutôt de la rampe vestibulaire. Le flux de liquide qui en résulte se propage par l'hélicotrème à travers la rampe tympanique jusqu'à la fenêtre ronde. Des variations de pression se produisent le long du canal cochléaire, la membrane basilaire, sur laquelle se trouve l'organe de Corti, entre en action et excite les terminaisons du nerf auditif. Celles-ci transmettent l'excitation reçue au centre auditif du cerveau, où elle se transforme en impressions sonores.

Ce processus pose un grand nombre de questions difficiles à résoudre. La question essentielle est évidemment celle de la forme d'oscillation de la membrane basilaire. La théorie qu'on appelle *théorie du téléphone* suppose que la membrane basilaire vibre par phases égales le long de toute sa surface d'une manière analogue à la membrane d'un microphone ou d'un téléphone; de la même manière que dans un microphone, il se produirait alors dans l'organe de Corti des courants nerveux dont la fréquence et l'intensité seraient proportionnelles à la pression acoustique. Toute la mise en valeur de l'excitation acoustique serait alors centralisée dans le cerveau.

La *théorie de l'image acoustique* part de l'idée qu'il se crée sur la membrane basilaire des images vibratrices stationnaires ayant pour chaque fréquence une autre forme qui détermine dans le cerveau la hauteur du son. La *théorie du résonateur différencié*, qui est due à Helmholtz, prétend que chaque fréquence n'excite qu'un point étroitement limité de la membrane basilaire et qu'ainsi une analyse mécanique du son a lieu dans le limaçon. Ces deux théories admettent donc une mise en valeur périphérique de l'excitation acoustique.

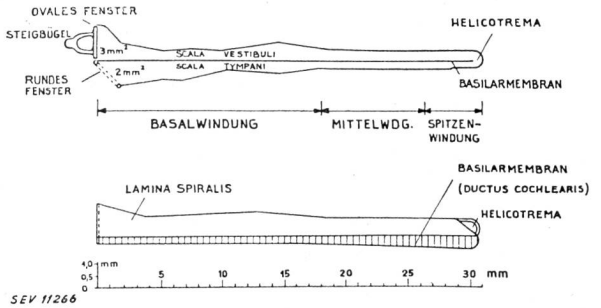


Fig. 6. Schéma du limaçon déroulé (d'après Fletcher).
Ovales Fenster = Fenêtre ovale. Steigbügel = Etrier. Rundes Fenster = Fenêtre ronde. Scala vestibuli = Rampe vestibulaire. Scala tympani = Rampe tympanique. Helicotrema = Hélicotrème. Basilarmembran = Membrane basilaire. Basalwindung = Enroulement de base. Mittelwindung = Enroulement moyen. Spitzenwindung = Enroulement de pointe. Lamina spiralis = Lame spirale. Ductus cochlearis = Canal cochléaire.

On sait aujourd'hui avec certitude que la théorie du résonateur différencié est celle qui se rapproche le plus des conditions réelles. On en a pour preuves, entre autres, les constatations suivantes:

Lorsqu'un effet sonore est composé de plusieurs sons, la position des phases de chaque composante ne joue aucun rôle pour l'impression sonore. Chaque son excite le point correspondant de la membrane basilaire; l'effet d'ensemble de ces excitations donne une certaine impression sonore sur laquelle la position des phases ne peut avoir aucune influence.

Quand l'ouïe est fatiguée par un son permanent d'une certaine fréquence, cette fatigue, qui se manifeste par une diminution de la sensibilité de l'oreille n'apparaît que pour cette fréquence. Elle est inexistante pour un autre son qui excite une autre partie de la membrane basilaire.

En outre, ce qui frappe, c'est que chez les nouveaux-nés déjà le limaçon a sa grandeur définitive, ce qui semble confirmer que ses dimensions mécaniques sont déterminantes pour l'audition.

Il est donc certain que les vibrations de la membrane tympanique sont analysées dans le limaçon, autrement dit, selon Fourier, chaque vibration est décomposée en vibrations sinusoïdales simples. Pour comprendre comment le limaçon peut remplir cette fonction, il convient de considérer de plus près sa construction et ses dimensions (fig. 6). Nous ne parlerons plus ici que de la membrane basilaire sans tenir compte du fait que la partie membraneuse de la cloison est formée du canal cochléaire; en effet, des observations ont prouvé que la très fine membrane de Reissner a toujours des vibrations de même phase que celles de la membrane basilaire de sorte qu'au point de vue physique, il semble qu'on puisse faire un premier rapprochement en ne considérant que la membrane basilaire. La membrane basilaire est formée de fibres entre-croisées et est beaucoup plus solide dans le sens transversal que dans le sens longitudinal. En outre, depuis la fenêtre ovale jusqu'à l'hélicotrème, sa largeur passe de moins de 0,1 mm à environ 0,5 mm, augmentant ainsi de plus de 1:5. C'est cette forme typique qui engagea Helmholtz à considérer, dans sa théorie de la résonance, les fibres de la membrane basilaire comme des résonateurs. On peut très bien admettre en théorie que ces fibres peuvent donner des résonances pour toute la zone d'audibilité. La variation dans le sens de la largeur ne suffit certainement pas pour cela et l'on doit admettre qu'il se produit encore des différences sensibles dans les tensions des fibres. Mais, étant donnés la petitesse de cet organe et le fait qu'il est inaccessible, on n'a pas encore pu, jusqu'à présent, mesurer avec certitude ces différences.

Si cette théorie est exacte, les sons aigus doivent exciter la membrane basilaire à l'endroit où elle est étroite, c'est-à-dire près de la fenêtre ovale et les sons graves à proximité de l'hélicotrème. Or, on peut prouver sans aucun doute possible que c'est bien le cas. (Expériences faites sur des animaux; examen, après leur mort, de personnes faibles d'ouïe; fatigue et effet de masque; etc.)

En principe, on peut donc admettre aujourd'hui avec certitude la théorie de la résonance ou du résonateur différencié établie par Helmholtz. Toutefois, on est encore bien loin d'être au clair sur les phénomènes physiques plus précis qui se déroulent dans le limaçon. Ce qui est certain, c'est qu'on ne peut pas comparer la membrane basilaire à un indicateur de fréquence à lame vibrante; les fibres de la membrane basilaire ne vibrent pas de la manière admise par Helmholtz.

Une nouvelle conception, défendue tout d'abord par Fletcher, tient également compte des propriétés mécaniques du liquide contenu dans l'oreille interne. Le système vibratoire est formé par la masse de la colonne de liquide en vibration et par l'élasticité de volume du canal cochléaire. Ce dernier ne vibre, pour un son pur, qu'à une place étroitement limitée. Cette théorie permet d'expliquer d'une manière particulièrement frappante les effets de masque.

Des recherches spécialement poussées sur des modèles et aussi sur des préparations ont été faites par Békésy. D'après ce savant, des trains d'ondes progressives amorties sont engendrés sur la membrane basilaire provoquant des deux côtés dans le périlymphe un petit tourbillon qui se déplace le long de la membrane suivant les modifications de la fréquence. La place de ce tourbillon est ainsi déterminée par la hauteur du son et c'est le tourbillon qui excite les nerfs auditifs. Cette théorie repose donc sur les propriétés hydro-dynamiques de l'oreille interne; des calculs à ce sujet ont été faits par Ranke (Théorie du redresseur de résonance) (fig. 7).

On n'est pas encore non plus au clair sur la valeur du décrément logarithmique du système vibratoire de l'oreille interne. De nombreuses expériences permettent de supposer qu'elle doit s'approcher de la valeur critique. Il paraît probable qu'un son grave fait vibrer

une plus large zone de la membrane basilaire qu'un son aigu. A ce point de vue, la théorie du redresseur de résonance hydro-dynamique est particulièrement intéressante du fait qu'elle explique l'analyse sans résonance et introduit dans la technique un principe de la décomposition des sons inconnu jusqu'ici.

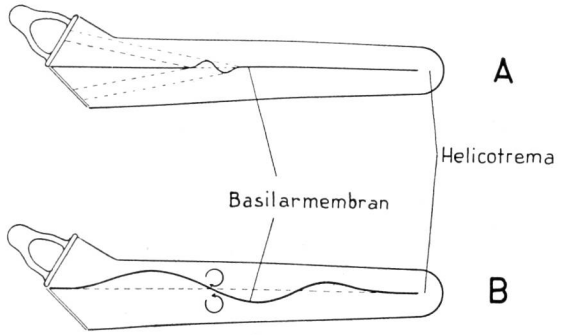


Fig. 7. Physique du limaçon.
A: d'après Fletcher. B: d'après Békésy.
Helicotrema = Hélicotrème. Basilarmembran = Membrane basilaire.

Il n'est pas absolument indispensable, pour comprendre d'une manière générale le mécanisme de l'audition et des propriétés auditives, de connaître exactement les phénomènes physiques qui se déroulent dans l'oreille interne. Il suffit de savoir que l'énergie sonore transmise par la base de l'étrier au périlymphe de la rampe vestibulaire fait vibrer la membrane basilaire de telle manière que pour chaque hauteur de son, seule une certaine zone des organes de Corti est excitée.

Une autre question importante est de savoir comment les nerfs auditifs transmettent au cerveau l'excitation reçue. Les phénomènes qui se déroulent dans les nerfs pour former et transmettre les excitations sont encore en grande partie inconnus. Cette constatation ne s'applique pas seulement aux nerfs auditifs mais à tous les nerfs en général. Quand un nerf est excité à un endroit quelconque, cette excitation se propage à la façon d'une onde progressive mais à une vitesse maximum de 60—80 m/s. Cette vitesse de propagation relativement faible permet déjà de reconnaître qu'il ne peut pas s'agir de phénomènes purement électriques. On doit plutôt se représenter la transmission de l'excitation dans les nerfs comme un phénomène chimique qui se propage le long des branches nerveuses; parallèlement se produisent aussi, provoqués par des modifications de concentrations de ions ou autres actions analogues, des phénomènes électriques qui peuvent être mesurés; ce sont ce qu'on appelle les *courants d'action* qu'il ne faut toutefois considérer que comme un phénomène secondaire et non comme un phénomène primaire.

Ce qui est typique dans la transmission par les nerfs, c'est que, après chaque transmission d'excitation, le nerf est incapable pendant un certain temps de transmettre une nouvelle excitation. Ce temps, qui s'appelle *temps réfractaire*, est de l'ordre de 1 ms. Pendant ce temps, le procédé chimique qui a provoqué la première excitation est en régression et ce n'est qu'une fois ce temps écoulé que le nerf est prêt à recevoir une nouvelle excitation. Les physiologistes parlent ici d'un système de „mèche". Une mèche utilisée ne peut pas servir une deuxième fois sans que la poudre brûlée ait été remplacée.

Le nerf présente encore une autre analogie avec une mèche: Pour qu'une mèche prenne feu, il est absolument indifférent qu'on l'allume avec un charbon ardent ou avec un arc électrique très chaud; l'„excitation" doit simplement dépasser un certain niveau pour que la poudre commence à brûler. Le nerf se comporte de la même manière: la nature de l'excitation est chose accessoire; elle peut être mécanique, électrique, thermique, chimique, etc., dès qu'elle dépasse un certain niveau, elle est enregistrée et transmise plus loin, toujours avec la même intensité, quelle que soit sa force. Le nerf travaille ainsi selon le principe „tout ou rien". Malgré la faible vitesse de propagation, on ne doit pas considérer ces phénomènes comme quasi-stationnaires mais se représenter une onde excitatrice derrière laquelle arrive une onde réfractaire.

Les nerfs ne peuvent donc pas fonctionner d'une manière continue, car ils ne peuvent transmettre qu'un nombre maximum d'ondes excitatrices par seconde. Ce nombre est déterminé par le temps réfractaire.

Comme nous avons déjà fait allusion à la possibilité d'exciter les nerfs électriquement, il nous paraît indiqué de dire encore l'essentiel à ce sujet, afin de pouvoir introduire dans notre schéma les effets connus des tensions électriques sur le corps humain.

Un courant continu n'engendre une excitation qu'au moment où l'on ferme le circuit; quand on l'ouvre, l'excitation est plus petite et elle est même nulle avec le courant permanent. En outre, la durée de l'effet du courant croissant joue aussi un rôle en ce sens que l'excitation est à peu près proportionnelle au produit $I\sqrt{t}$ ($I$ = augmentation de courant, $t$ = durée). On en peut faire les déductions suivantes:

Quand on touche une source de courant continu, il en résulte une seule excitation nerveuse qui a pour effet une unique contraction musculaire. Le courant continu, qui est stationnaire, ne provoque aucune autre excitation nerveuse mais seulement des détériorations de tissus par électrolyse ou par suite de la chaleur. Par contre, un courant alternatif à 50 périodes provoque avant tout une contraction musculaire permanente due à l'excitation nerveuse constante. Quand on a affaire à des courants alternatifs de haute fréquence, le facteur $t$ devient si petit que, même pour les très forts courants, le produit $I\sqrt{t}$ reste inférieur au seuil de sensation, de sorte qu'il n'en résulte plus aucune excitation nerveuse. Seule la chaleur se fait encore sentir, si bien qu'on peut employer les courants à haute fréquence pour la diathermie et pour l'électro-chirurgie (destruction méthodique localisée de tissus). Les mêmes lois s'appliquent aussi en principe aux nerfs auditifs. Dans ce cas, le temps réfractaire qui empêche la transmission de fréquences supérieures à environ 1000 périodes a une importance particulière. Le fait que nous pouvons entendre des sons allant jusqu'à près de 20 000 périodes est dû à l'analyse qui se déroule dans l'oreille interne.

En 1930, les américains Wever et Bray réussirent pour la première fois à mesurer des tensions électri-

ques dans les nerfs auditifs. Ils constatèrent que les fréquences de ces tensions correspondaient exactement aux fréquences acoustiques, cela jusqu'aux sons les plus aigus. Lors d'une expérience devenue célèbre, ils réussirent même à amplifier les tensions constatées sur les nerfs auditifs mis à nu d'un chat et à les conduire à un haut-parleur, de sorte que l'animal de laboratoire fonctionnait comme microphone vivant transmettant à la perfection la parole et la musique. Ce résultat semblait primitivement parler clairement en faveur d'une théorie d'audition centrale dans le sens de la théorie du téléphone. Mais d'autres expériences démontrèrent bientôt qu'on avait affaire à deux phénomènes électriques entièrement différents. Tout d'abord, on constata que les différences de tension dont nous avons parlé se produisaient entre le limaçon et une partie indifférente quelconque du corps; pour cette expérience, on applique généralement l'une des électrodes à la fenêtre ronde, l'autre au cou, au bras, etc. (effet cochléaire). Mais on constate aussi l'existence des courants d'action nerveux proprement dits qui obéissent aux règles physiologiques et n'ont aucune analogie avec la caractéristique, en fonction du temps, de la pression acoustique. Aux environs du limaçon, ces deux effets se superposent. On constate aussi que la petite artère qui passe au centre du nerf auditif et qui apporte le sang à certaines parties du limaçon est responsable de la transmission des tensions cochléaires, de sorte qu'on peut encore constater ces tensions à proximité du cerveau. Lorsqu'on coupe cette artère, il devient difficile de prouver l'effet cochléaire sur le limaçon même, ce qui permet de conclure à la nature purement physique des tensions cochléaires.

L'effet cochléaire oppose aussi une très forte résistance aux anesthésiques, à l'apport défectueux de sang et même à la mort de l'individu. Par contre, les courants d'action nerveux cessent à l'instant de la mort. On arrive cependant, en anesthésiant l'organe de Corti, à supprimer l'effet cochléaire.

Les différences de tension qu'on constate dans le limaçon sont donc engendrées dans l'organe de Corti par un procédé physique qui n'est pas encore exactement connu. Ces différences de tension contribuent probablement à exciter les nerfs acoustiques, c'est-à-dire à déclencher les courants d'action nerveux. Il est vrai qu'on n'en a pas encore la preuve; toutefois, on doit admettre que l'effet cochléaire a une fonction physiologique quelconque à remplir et qu'il n'est pas seulement un produit du hasard. On peut aussi montrer que si les sons qui frappent l'oreille sont graves, les tensions sont plus élevées à proximité de l'hélicotrème, et que s'ils sont aigus, elles sont plus élevées près de la fenêtre ronde, de sorte que l'effet cochléaire qui semblait tout d'abord être en contradiction avec la théorie du résonateur différencié la renforce au contraire puissamment.

L'étude approfondie des courants d'action dans le nerf auditif, à laquelle s'est particulièrement attaché H. Davis, a prouvé qu'une onde excitatrice n'est engendrée que lorsque la membrane basilaire se meut de la rampe tympanique vers la rampe vestibulaire, c'est-à-dire quand la membrane tympanique vibre de l'intérieur vers l'extérieur. L'autre phase de l'oscillation n'engendre aucun courant d'action. On rencontre donc les mêmes conditions que pour l'excitation d'un nerf au moyen de courant continu qui ne provoque une onde excitatrice qu'au moment où on l'enclenche, c'est-à-dire quand le courant augmente, mais non quand on le coupe. Plus est grande l'amplitude de l'oscillation, plus un grand nombre de fibres nerveuses doivent être excitées, car chaque fibre ne peut transmettre qu'une quantité d'excitation bien définie, selon le principe de tout ou rien. En outre, le temps réfractaire est soumis de fibre à fibre à des variations, de même que le seuil d'excitation qui peut aussi être influencé encore par les symptômes de fatigue.

Pour les sons graves, c'est-à-dire inférieurs à 1000 périodes, il est évident que les ondes excitatrices présentent, en fonction du temps, la même marche que les ondes sonores. Mais la question de savoir si le cerveau utilise aussi, d'une manière quelconque, cette caractéristique de temps n'a pas encore été résolue. Pour les hautes fréquences, cela ne

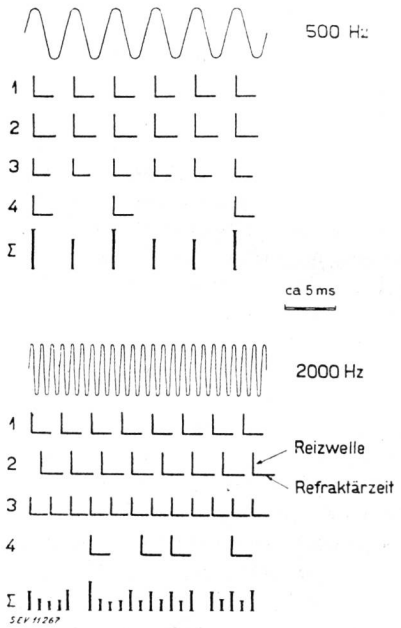


Fig. 8. Excitation de quatre fibres nerveuses par des sons purs de 500 périodes et 2000 périodes (schématique) (d'après Davis). Reizwelle = Onde excitatrice. Refraktärzeit = Temps réfractaire.

peut probablement plus être le cas, car, par suite du temps réfractaire relativement long, la marche des ondes excitatrices en fonction du temps est considérablement brouillée et influencée par d'autres facteurs comme, par exemple, la force du son (fig. 8). Physiologiquement, la chose serait possible pour les sons graves. On constate en particulier que les fréquences de 20 périodes jusqu'à un peu plus de 100 périodes excitent à peu près le même point de la membrane basilaire à proximité de l'hélicotrème (fig. 9).

Toutefois, dans cette zone, nous pouvons encore distinguer parfaitement les hauteurs de sons. Ceci permet de supposer que, suivant les circonstances, la caractéristique de temps des impulsions nerveuses peut aussi avoir une importance, hypothèse d'autant plus vraisemblable que deux autres effets qui seront étudiés plus loin, l'audition dirigée et le résidu, ne

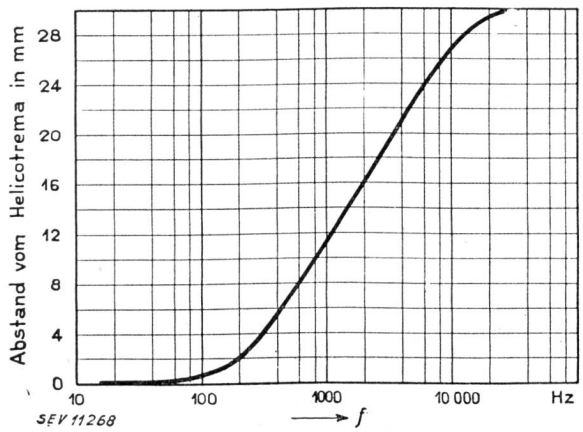


Fig. 9. Excitation maximum de la membrane basilaire en fonction de la fréquence (d'après Fletcher).
Abstand vom Helicotrema in mm = Distance de l'hélicotrème en mm.

peuvent pas, pour le moment, s'expliquer d'une autre manière. Ce qui signifierait que la théorie du résonateur différencié ne s'applique pas sans restriction.

L'effet cochléaire est reversible, c'est-à-dire qu'en appliquant des tensions électriques, on arrive à communiquer des impressions audibles. A cet effet, on introduit l'une des électrodes dans le conduit auditif rempli d'eau salée et l'on applique l'autre à un bras par exemple. On constate alors que l'on n'obtient des impressions audibles sans distorsion que si la tension à fréquence audible se superpose à une tension de courant continu. On doit donc en conclure que l'oreille a une caractéristique quadratique analogue à celle d'un microphone à condensateur et que cet effet quadratique doit prendre naissance dans l'oreille moyenne, puisque des personnes chez lesquelles l'oreille moyenne manque peuvent entendre directement des tensions de fréquence audible, c'est-à-dire sans qu'elles soient superposées à une tension de courant continu. On se représente simplement la chose en ce sens que la membrane tympanique et la paroi de l'oreille moyenne qui lui fait face constituent les deux électrodes d'un condensateur, de sorte que lorsqu'on applique des tensions électriques, la membrane tympanique est mise en mouvement par des forces électrostatiques qui produisent une impression audible. Si l'oreille moyenne fait défaut, l'impression audible doit naître dans l'oreille interne, probablement par excitation directe des nerfs auditifs, l'effet quadratique étant naturellement supprimé. Les impressions audibles ainsi produites sont généralement très imparfaites.

En résumé, nous pouvons donc décrire ainsi le fonctionnement de l'oreille:

La pression acoustique force la membrane tympanique à vibrer et les vibrations sont transmises par les osselets de l'oreille moyenne au liquide que contient le limaçon. Le canal cochléaire se met à vibrer à son tour de telle manière que chaque hauteur de son excite une zone déterminée de l'organe de Corti. Un son grave excite une zone relativement large dans le voisinage de l'hélicotrème, un son aigu une zone étroite dans le voisinage de la fenêtre ovale. L'excitation mécanique des cellules de l'organe de Corti engendre des tensions de fréquence audible qui provoquent probablement l'excitation des nerfs auditifs. Ces excitations nerveuses sont soumises aux lois physiologiques, de sorte que seuls les sons graves peuvent être transmis en synchronisme avec la pression acoustique, une impulsion nerveuse correspondant à chaque vibration complète. Le nombre d'impulsions nerveuses par seconde n'a donc en général aucune importance pour reconnaître la hauteur d'un son. Celle-ci est plutôt déterminée par la position de la zone du canal cochléaire mis en mouvement. L'intensité sonore perçue dépend uniquement du nombre des fibres nerveuses excitées et non du nombre d'impulsions envoyées par seconde dans ces fibres nerveuses, contrairement à la physiologie des autres organes des sens dans lesquels l'intensité de l'excitation détermine le nombre des impulsions nerveuses.

## III. LES PROPRIÉTÉS DE L'OREILLE.

Avant de discuter des propriétés de l'oreille, il convient d'établir une distinction entre les phénomènes acoustiques stationnaires et les phénomènes non stationnaires, car, dans la grande majorité des cas, un système de transmission n'est caractérisé que par son comportement à l'égard des sons stationnaires du fait que les mesures se font très facilement en état stationnaire. Cependant, il ne faut jamais oublier que, théoriquement, un état stationnaire ne se produit qu'après un temps infiniment long; c'est-à-dire que ce cas ne se rencontre jamais. Heureusement, la majorité des phénomènes acoustiques auxquels on a affaire dans la pratique sont de telle nature qu'on peut leur appliquer, avec une très grande approximation, les propriétés du système de transmission à l'état stationnaire. Mais pour la transmission du son d'un instrument à percussion ou seulement de la note d'entrée exacte de certains instruments de musique, etc., les phénomènes transitoires sont tout aussi importants que la caractéristique stationnaire, ce que les propriétés de l'oreille font très bien ressortir.

Pour les phénomènes acoustiques stationnaires, il faut en outre faire une distinction entre les sons purs isolés et les mélanges de sons. Un mélange de sons harmonieux s'appelle son musical.

### A. Sons stationnaires.

#### *1. Sons isolés.*

Les premières expériences sur les propriétés de l'oreille se limitèrent à l'étude de sa sensibilité aux sons stationnaires purs de différentes fréquences. Le mécanisme de la conduction nerveuse fait supposer sans autre que l'oreille, comme n'importe quel autre organe des sens, doit présenter un seuil d'excitation déterminé où l'impression sensitive commence brusquement, c'est-à-dire quand l'excitation atteint un niveau suffisant pour influencer les premières fibres nerveuses. Ce seuil d'excitation dépend très fortement de la fréquence; il est surtout sensiblement plus élevé pour les sons graves que pour les sons moyens ou aigus. On a fait à ce sujet des expériences très poussées basées sur des statistiques de sorte qu'une entente internationale est intervenue pour reconnaître un „seuil d'excitation normal".

Si l'on augmente l'intensité d'un son, on atteint une limite supérieure où l'impression sonore pure se mue en sensation douloureuse, ce qui se produit au

moment où l'étrier passe à l'autre forme de vibration. On parle alors d'un seuil d'excitation douloureuse. Les deux courbes enserrent ce qu'on appelle la „zone d'audibilité" (fig. 10). L'ordonnée des courbes représente la pression acoustique d'une onde progressive plane venant par devant telle qu'elle serait s'il n'y avait pas la tête. Les effets de diffraction ont donc aussi été mesurés.

Mais ce qui intéresse avant tout, c'est de savoir comment se comporte vis-à-vis des énergies sonores qui nous entourent l'énergie sonore minimum qui est encore tout juste perçue par notre oreille. Dans un milieu à température normale, chaque molécule gazeuse est constamment en intense mouvement, effet qu'on nomme mouvement brownien. Les petites mais permanentes variations de pression qui en résultent et qui sont aussi des pressions acoustiques peuvent être facilement calculées, ce qui permet de constater que le seuil de sensation de l'oreille se trouve dans le même ordre de grandeur. Donc, si l'oreille était plus

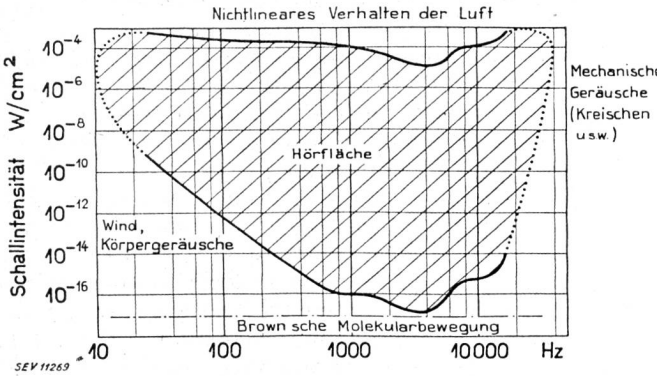


Fig. 10. La zone d'audibilité et ses limites naturelles.
Hörfläche = Zone d'audibilité. Schallintensität = Intensité sonore. Nichtlineares Verhalten der Luft = Comportement non linéaire de l'air. Mechanische Geräusche (Kreischen usw.) = Bruits mécaniques (cris aigus, etc). Brownsche Molekularbewegung = Mouvement brownien. Wind, Körpergeräusche = Bruits du vent, du corps.

sensible, nous entendrions sans interruption un bruit fort désagréable.

On peut se rendre compte de l'importance physiologique de la diminution de la sensibilité aux sons graves en pensant que sans cela, nous entendrions constamment le bruit du vent ainsi que les bruits provoqués dans notre corps par la circulation du sang, la digestion, etc. La limite contre les fréquences supérieures est utile pour nous protéger contre l'effet exagéré des bruits d'origine mécanique qui contiennent avant tout des hautes fréquences. Le seuil de sensation douloureuse se trouve approximativement au niveau où cesse le mouvement ondulatoire purement élastique de l'air.

L'importance de l'amplitude d'oscillation de la membrane tympanique au seuil d'excitation donne une idée de l'extrême sensibilité de l'oreille (fig. 11).

On ne sait pas encore clairement comment se produit la diminution de sensibilité pour les basses fréquences. L'augmentation de l'impédance de la membrane tympanique y contribue certainement. Pratiquement, l'oreille moyenne travaille indépendamment de la fréquence, de sorte qu'on doit chercher une autre cause dans l'oreille interne. Les dernières

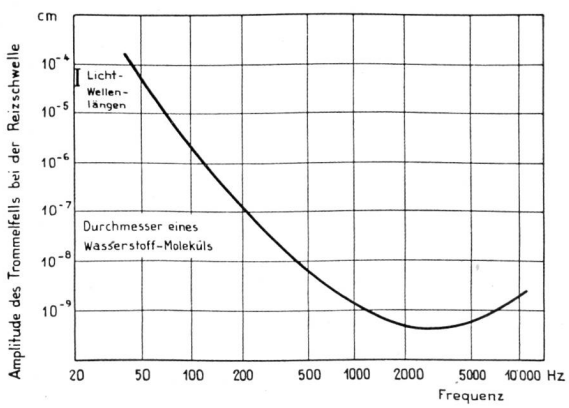


Fig. 11. Amplitude d'oscillation de la membrane tympanique au seuil d'excitation (d'après Wilska).
Amplitude des Trommelfells bei der Reizschwelle = Amplitude de la membrane tympanique au seuil d'excitation. Lichtwellenlängen = Longueurs de l'onde lumineuse. Durchmesser eines Wasserstoff-Moleküls = Diamètre d'une molécule d'hydrogène. Frequenz = Fréquence.

expériences de Békésy prouvent que cet effet ne prend naissance que dans l'organe de transformation. Les propriétés physiologiques des nerfs font comprendre en outre que les impressions sonores doivent atteindre un certain niveau d'excitation fini pour qu'on perçoive une augmentation de l'intensité sonore, de même qu'il faut une certaine modification de fréquence pour qu'on distingue une modification de la hauteur du son.

La figure 12 représente les modifications d'intensités en fonction de la fréquence que l'oreille peut encore juste percevoir avec, comme paramètre, différentes intensités (se rapportant à $10^{-16}$ W/cm²). Aux environs de 1000 périodes, la plus petite modification encore perceptible est d'à peu près 0,5 db pour les intensités supérieures à 40 db, tandis que pour la très faible intensité de 5 db la plus petite modification perceptible est déjà de 3 db. Avec 50 périodes, ces valeurs sont encore beaucoup plus élevées, soit 1, 5 ou 7,5 db. On en peut conclure que la caractéristique de fréquence d'un système de transmission n'est pas très critique, puisque les distorsions linéaires de l'ordre de grandeur de 1 db ne sont pas encore audibles.

La figure 13 montre les modifications de fréquences encore juste perceptibles, de nouveau en fonction de

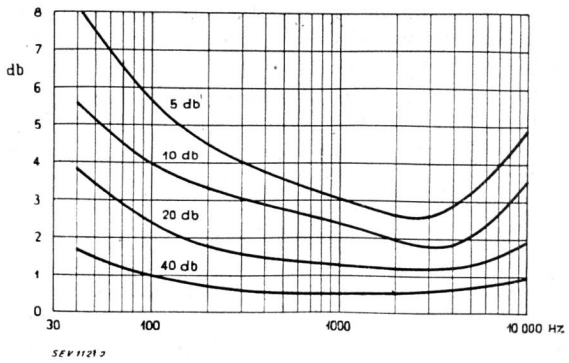


Fig. 12. Modifications d'intensités encore audibles en fonction de la fréquence, pour différentes intensités (0 db = $10^{-16}$ W/cm²) (d'après Fletcher).

la fréquence et avec l'intensité comme paramètre. On constate qu'au-dessus de 500 périodes et avec de fortes intensités les modifications de fréquences de 0,2 % à 0,3 % sont déjà perceptibles, tandis que pour les basses fréquences, la sensibilité aux modifications de fréquences diminue fortement. A titre de comparaison, rappelons que l'intervalle entre deux sons musicaux pleins est d'environ 12 %.

Sur la base de ces deux groupes de courbes, Fletcher a calculé combien de sons différents l'oreille peut distinguer. Et il a trouvé le nombre étonnant d'environ 540 000.

Le rapport entre l'intensité de l'excitation et l'intensité de la sensation s'établit d'après la loi physiologique à laquelle obéissent plus ou moins tous les organes des sens et suivant laquelle la modification tout juste perceptible de l'intensité de sensation est en rapport constant avec l'excitation du moment. C'est la loi de Weber-Fechner qu'on formule comme suit:

$$dE = \text{const} \cdot \frac{dR}{R} \qquad \begin{array}{l} E = \text{sensation} \\ R = \text{excitation} \end{array}$$

ou en intégrale

$$E = \text{const} \cdot \log R$$

Le fait que la sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation a aussi conduit à une échelle logarithmique. L'excitation est donnée par le champ acoustique; elle est donc mesurée en unités acoustiques, soit en $\mu$b comme pression acoustique, soit en W/cm² comme intensité sonore. La sensation, c'est-à-dire l'impression sonore est désignée sous le nom de *force du son* et mesurée par une mesure logarithmique dont l'unité internationale, depuis 1937, est le *phone*.

L'unité de la force du son est définie de la manière suivante:

1. La force d'un son est établie par *comparaison* avec un son normal. On ne peut donc pas la déterminer par une mesure directe et il faut avoir recours à l'oreille pour établir si deux sensations sont équivalentes.

2. Le *son normal* est le son produit par une onde plane progressive d'une fréquence de 1000 périodes frappant la tête de l'observateur par devant. L'intensité sonore du son normal est variable.

3. Pour déterminer la force du son, on écoute alternativement le son normal et le son à mesurer. On détermine de cette façon à quelle intensité on doit porter le son normal pour que, jugé par un grand nombre d'observateurs à l'ouïe normale, sa force paraisse être équivalente à celle du son à mesurer.

4. L'intensité sonore du son normal considérée comme étant de force équivalente est comparée à une *intensité de référence* de $10^{-16}$ W/cm². (La pression correspondante est d'environ $2.10^{-4}$ $\mu$b.)

5. Pour établir l'échelle des forces des sons, on fait usage des logarithmes ordinaires de Briggs. Si I est l'intensité sonore du son normal de force équivalente et $I_0$ l'intensité de référence, la force $L$ du son à mesurer sera:

$$L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \text{ phones.}$$

La force du son est donc de 0 phone quand l'intensité du son normal de force équivalente $= I_0$

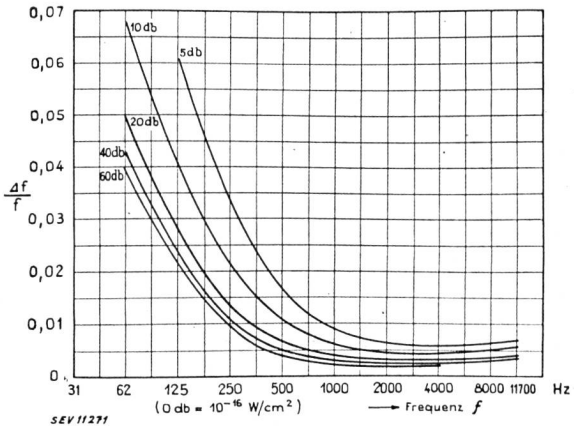


Fig. 13. Modifications de fréquences encore audibles en fonction de la fréquence, pour différentes intensités (0 db = $10^{-16}$ W/cm²) (d'après Shower et Biddulph).

$= 10^{-16}$ W/cm². Cette valeur correspond approximativement au seuil d'audibilité moyen. De cette manière, on mesure la force des sons de différentes intensités à différentes fréquences et l'on relie par des courbes les points de même force situés à l'intérieur de la zone d'audibilité (fig. 14). Cette série de courbes permet donc de lire en phones l'impression produite par chaque excitation physique caractérisée par son intensité et sa fréquence.

Une autre représentation, tout aussi pratique, utilise comme paramètre non la force du son mais la fréquence (fig. 15). On reconnaît ici d'une façon particulièrement claire les dérogations à la loi de Weber-Fechner qu'on rencontre dans la réalité. L'échelle en phones permet d'englober tous les sons, depuis le plus léger bruit tout juste encore perceptible jusqu'à l'audition douloureuse dans la zone de 0 à 130 phones. On peut ainsi toujours opérer avec des chiffres entiers, la plus petite différence d'intensité perceptible étant d'environ 1 db.

Pour mieux illustrer l'application de cette échelle, nous indiquons ci-après les forces mesurées en phones de quelques bruits connus:

| | |
|---|---|
| Silence complet . . . . . | 0 phone |
| Tic-tac d'une montre à l'oreille, faible murmure . . . . . | 10—20 phones |
| Région habitée tranquille, le jour | 30— 40 „ |
| Conversation, auto de tourisme tranquille . . . . . | 50— 60 „ |

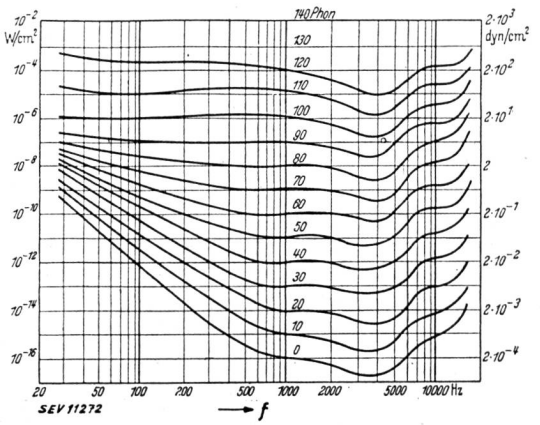


Fig. 14. Courbes de sons de même force (d'après Fletcher et Munson).

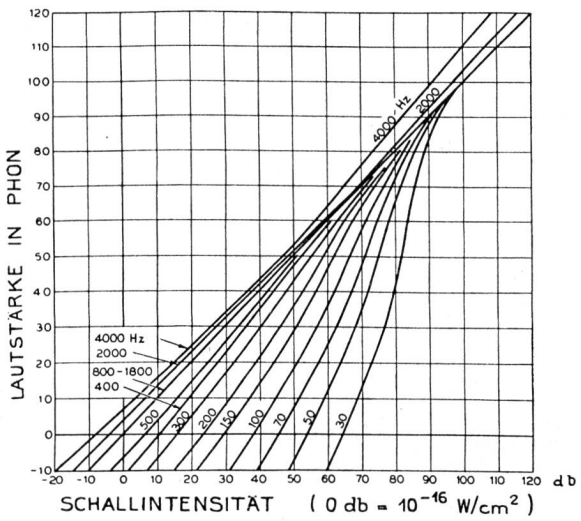


Fig. 15. Force du son en fonction de l'intensité, avec la fréquence comme paramètre (d'après Fletcher et Munson).
Lautstärke in Phon = Force du son en phones. Schallintensität = Intensité sonore.

| | |
|---|---|
| En wagon, petite machine-outil . | 70— 80 phones |
| Atelier de filature mécanique, passage d'un train . . . . . | 90—100 „ |
| Moteur d'avion, marteau pneumatique . . . . . | 110—130 „ |

On constate immédiatement que cette échelle en phones ne peut pas servir pour tous les buts. Tout d'abord, l'adoption d'une échelle logarithmique ne se justifierait que si la loi de Weber-Fechner pouvait s'appliquer vraiment à toutes les forces de son, ce qui n'est pas le cas; d'autre part, son application présenterait des difficultés pour les gens qui n'ont aucune pratique en la matière. En outre, elle ne convient pas non plus pour un simple calcul de forces de son.

C'est pourquoi Fletcher a proposé encore une autre grandeur, que par opposition à la force du son on nomme intensité auditive, et qui s'est rapidement imposée. Contrairement à l'échelle en phones, l'échelle de l'intensité auditive est une échelle „vraie", car elle est construite de manière qu'à une augmentation de l'impression sonore qui double subjectivement l'impression ressentie correspond une intensité auditive double. Cette intensité est mesurée en unités d'intensité auditive, l'intensité 1 étant attribuée à la force de 0 phone du seuil d'excitation, ce qui donne pour le seuil de sensation douloureuse $10^6$ unités d'intensité auditive; le rapport est valable pour toutes les fréquences (fig. 16). Ces gros chiffres sont peut-être quelque peu incommodes du fait que l'oreille ne peut distinguer qu'un nombre beaucoup plus petit de différentes intensités auditives.

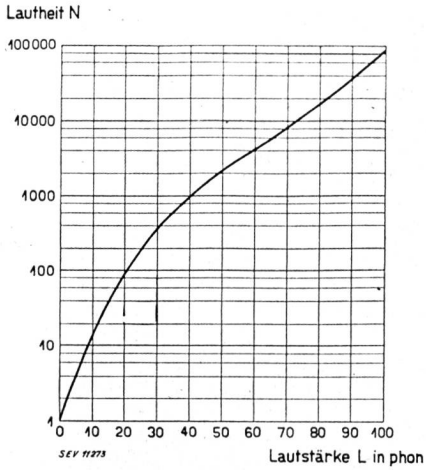


Fig. 16. Intensité auditive en fonction de la force du son (d'après Fletcher).
Lautheit = Intensité auditive. Lautstärke = Force de son.

L'échelle de l'intensité auditive étant une échelle „vraie", on peut l'appliquer directement au mécanisme de l'audition du fait que le nombre des unités d'intensité auditive doit être évidemment proportionnel au nombre des fibres nerveuses excitées. La notion d'intensité auditive est particulièrement utile pour calculer l'impression résultant d'une excitation composée, ce que nous étudierons plus loin.

On peut aussi établir un rapport direct entre l'excitation et l'intensité auditive (fig. 17). A cet effet, on prend naturellement la fréquence comme paramètre. On constate particulièrement combien le seuil d'excitation monte pour les basses fréquences. Ainsi,

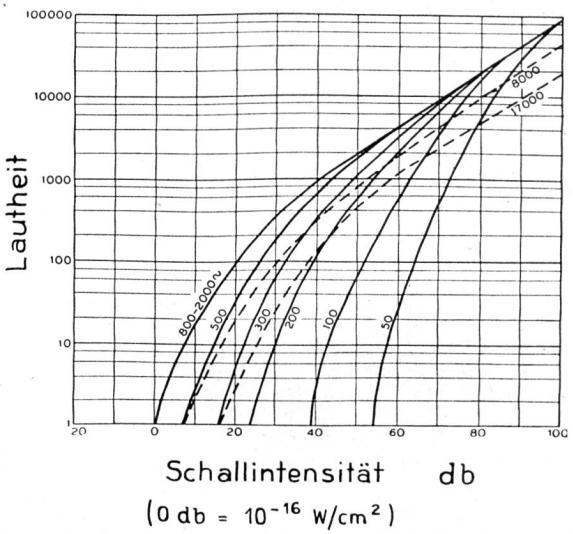


Fig. 17. Intensité auditive en fonction de l'intensité sonore (d'après Fletcher).
Lautheit = Intensité auditive. Schallintensität = Intensité sonore.

pour atteindre le seuil d'excitation, il faut, pour 50 périodes, une excitation de 53 db plus élevée que pour 1000 périodes, ce qui, pour l'énergie sonore, correspond à une augmentation de 200 000 fois. En outre, on remarque avec quelle rapidité la courbe des 50 périodes monte pour atteindre la courbe des 1000 périodes vers les 100 000 unités d'intensité auditive. Cela signifie donc que les sons graves, en cas d'excitations dont la puissance n'est relativement que peu au-dessus du seuil d'audibilité, stimulent déjà une grande partie de la membrane basilaire, contrairement aux hautes fréquences qui, en cas d'excitations de faible puissance, n'en stimulent qu'une zone très étroite.

Cette forte mise à contribution de la membrane basilaire par les sons graves s'explique par la formation d'*harmoniques* dans l'oreille même. On constate en particulier que lorsque l'oreille est excitée par un son pur sinusoïdal, on entend des harmoniques à

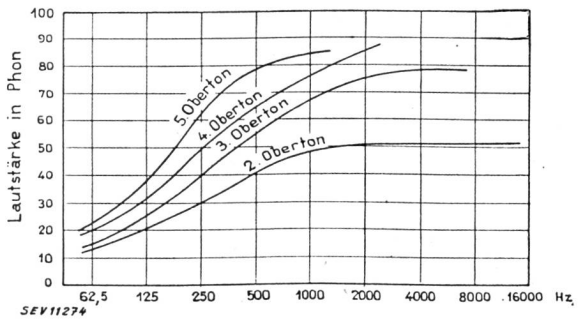


Fig. 18. Intensité de seuil pour les harmoniques subjectifs (d'après Fletcher).
Lautstärke in Phon = Force du son en phones. 2., 3., ... Oberton = 2e, 3e, ... harmonique.

partir d'une certaine force de son. La force de ces harmoniques peut être déterminée approximativement à l'aide d'un son explorateur qui engendre des oscillations en même temps que les divers harmoniques quand sa fréquence correspond à peu près à celle des divers harmoniques. On entend le mieux ces oscillations quand la force du son explorateur et celle de l'harmonique ont la même valeur, de sorte que la fréquence et la force du son explorateur sont égales à celles de l'harmonique et forment ainsi une base de mesure pour ce dernier. On a déterminé de cette manière les forces de sons pour lesquels se produisent ces harmoniques subjectifs (fig. 18). On connaît de même les forces d'excitations relatives (fig. 19).

On a tout d'abord cherché la provenance de ces harmoniques subjectifs dans l'oreille moyenne car on supposait que les osselets travaillaient d'une façon non linéaire. De récentes expériences ont toutefois démontré, avec passablement de certitude, que

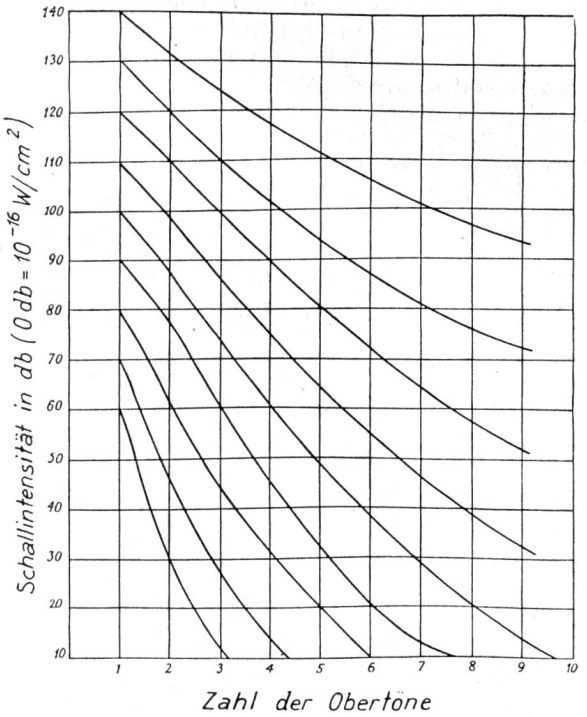


Fig. 19. Harmoniques subjectifs en fonction de l'intensité (d'après Fletcher).
Schallintensität in db = Intensité sonore en db. Zahl der Obertöne = Nombre des harmoniques.

l'oreille moyenne travaille encore d'une façon absolument linéaire et que, par conséquent, ces harmoniques devaient prendre naissance dans l'oreille interne. L'effet cochléaire est le moyen indiqué pour faire ces expériences, car ces tensions provoquent exactement le même effet que celui qu'on connaît subjectivement depuis longtemps.

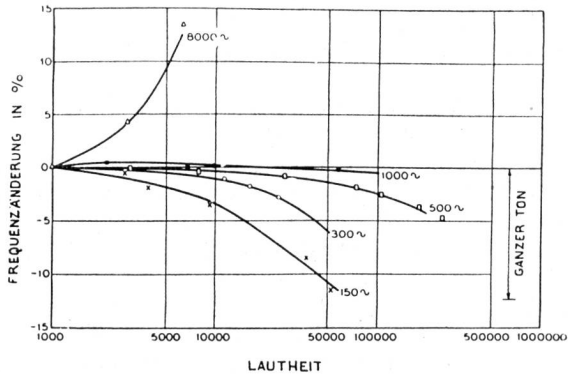


Fig. 20. Décalage de fréquence subjectif en fonction de l'intensité auditive (d'après Fletcher).
Frequenzänderung in % = Modification de fréquence en %. Ganzer Ton = Ton entier. Lautheit = Intensité auditive.

Un autre effet particulier qu'on constate en écoutant de grandes intensités auditives est le *décalage de fréquence*. Les sons moyens et graves se déplacent avec une intensité auditive croissante vers le bas, les sons aigus vers le haut (fig. 20 et 21). Pour les basses fréquences, le décalage peut atteindre un ton entier. On constate de tels décalages dans tous les systèmes oscillants s'ils vibrent à des amplitudes si grandes que la force de rappel n'est plus proportionnelle au décalage. Dans un diapason, la force de rappel augmente moins que proportionnellement, de sorte que

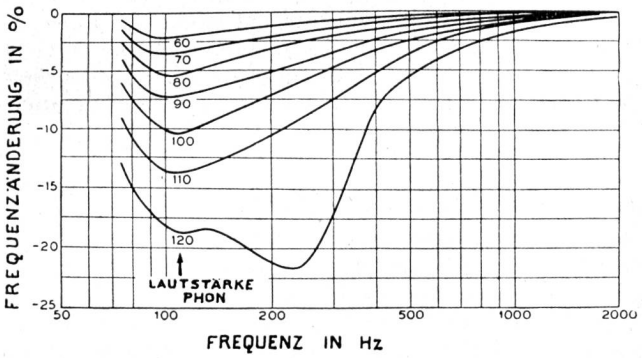


Fig. 21. Décalage de fréquence subjectif en fonction de la force du son (d'après Show).
Frequenzänderung in % = Modification de fréquence en %. Lautstärke in Phon = Force du son en phones. Frequenz in Hz = Fréquence en périodes.

la fréquence propre s'accroît, tandis qu'il se produit le contraire dans une corde qui vibre. Les résonateurs pour basses fréquences montrent ainsi la manière de se comporter des cordes ; ceux pour hautes fréquences peuvent être comparés à des diapasons. Ces décalages de fréquences se font sentir, par exemple, quand un concert doit être transmis à travers un système de transmission et reproduit avec une force sensiblement plus petite.

### 2. *Sons complexes.*

Les sons purs, c'est-à-dire de forme sinusoïdale, se rencontrent excessivement rarement dans le langage et dans la musique. En pratique, on a affaire presque exclusivement à des *sons musicaux*, c'est-à-dire à des sons complexes qui, en plus de la fréquence fondamentale, présentent encore toute une série de sons harmoniques superposés dont la force détermine le *timbre*. En plus de la fréquence fondamentale $f_1$, on a les harmoniques $f_2 = 2\,f_1$, $f_3 = 3\,f_1$, $f_4 = 4\,f_1$, etc.

La façon dont l'oreille réagit à ces sons musicaux complexes fut d'abord étudiée par Ohm (1843) qui trouva la fameuse loi d'Ohm de l'acoustique que Helmholtz formula plus tard de la manière suivante: „L'oreille humaine ne perçoit comme son simple qu'une oscillation pendulaire de l'air; elle divise chaque autre mouvement périodique de l'air en une série d'oscillations pendulaires et perçoit la série de sons correspondante". Ohm avait donc déjà reconnu que l'oreille travaille comme un analyseur de Fourier.

Comme nous l'avons vu, la loi d'Ohm ne s'applique qu'aux faibles forces de sons. Pour les sons plus forts, l'oreille ne perçoit plus une oscillation pendulaire de l'air comme un son pur par suite des harmoniques qui prennent naissance dans l'oreille interne.

Quand un complexe de sons frappe l'oreille, les propriétés non linéaires de l'oreille ont pour conséquence la formation subjective de ce qu'on appelle des sons de combinaison dans lesquels on peut discerner les sons de différence et les sons de sommation. La fréquence des sons de combinaison est déterminée par la formule: $f_k = m \cdot f_1 \pm n \cdot f_2$ (m, n, nombres entiers) dans laquelle $f_1$ et $f_2$ représentent la fréquence des sons primaires. Le son le plus prononcé est généralement le premier son de différence $f_1 - f_2$ et le son un peu moins fort le premier son de sommation $f_1 + f_2$. Dans un son musical, composé donc exclusivement de sons partiels harmoniques, les sons de combinaison correspondent toujours aux sons partiels primaires et sont par conséquent sans importance.

### *Effet de masque.*

L'intensité auditive résultant de plusieurs sons s'obtient en additionnant simplement les intensités auditives de ces sons (pas leurs forces). Cela provient du fait que le nombre des unités d'intensité auditive est proportionnel à celui des impulsions nerveuses engendrées, à condition que les sons soient assez espacés les uns des autres (plus de 500 périodes). Si les sons sont trop rapprochés, il se produit ce qu'on appelle *l'effet de masque*. Cet effet, qui joue un rôle très important, s'explique par les propriétés du limaçon et, en particulier, des nerfs. Quand un son excite la membrane basilaire sur une certaine étendue qui dépend de la force du son, un deuxième son plus faible, dont la fréquence se trouve à proximité de celle du premier son, ne pourra pas être entendu du fait que les fibres nerveuses intéressées sont déjà mises à contribution pour le premier son plus fort. Le deuxième son est ainsi masqué par le premier. Etant donné que, comme nous l'avons vu, un son grave occupe plus de place sur la membrane basilaire qu'un son aigu de même force, il faut s'attendre

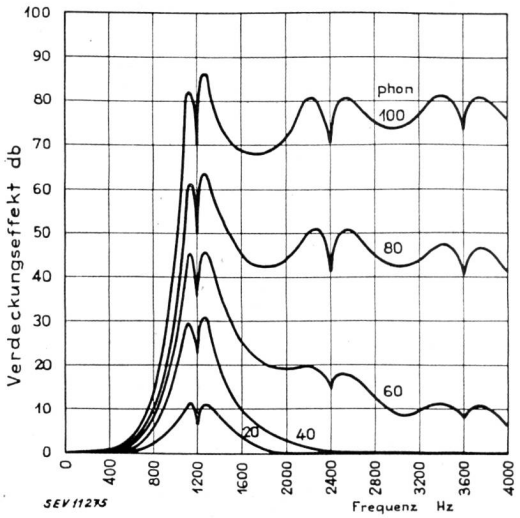


Fig. 22. Effet de masque; son masquant 1200 périodes, force du son 20—100 phones (d'après Fletcher)
Verdeckungseffekt db = Effet de masque en db.

à ce que les sons graves surtout masquent les sons aigus, mais à ce que les sons hauts masquent moins les sons graves. C'est en effet le cas. L'échelle de mesure pour l'effet de masque est le degré de masque qui s'exprime en décibels et indique de combien de db il faut augmenter l'intensité du son masqué pour qu'on puisse tout juste l'entendre. Le degré de masque correspond donc à l'élévation du seuil d'audibilité provoquée par le son masquant.

Les figures 22 et 23 montrent que l'effet de masque diminue quand les fréquences des deux sons sont très près l'une de l'autre. Cela provient des *battements* dus au fait que l'oreille possède une acuité analytique limitée. La science des ondes en général nous montre que la fréquence d'une oscillation peut être déterminée avec d'autant plus de précision qu'on a plus de temps à disposition pour le faire ou inversement que plus l'analyseur travaille avec précipitation,

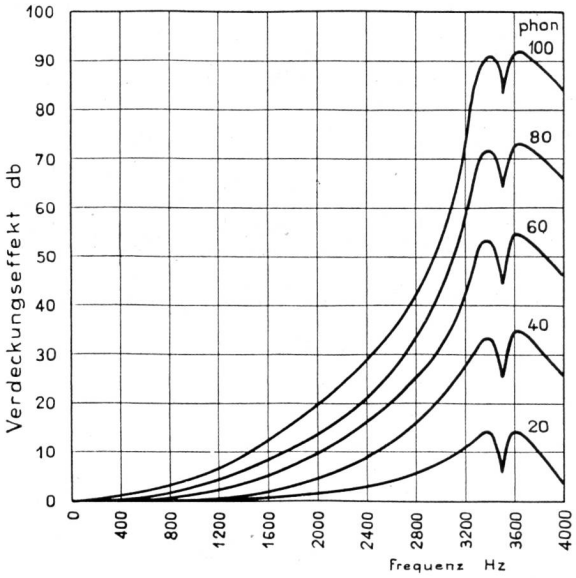


Fig. 23. Effet de masque; son masquant 3500 périodes, force du son 20—100 phones (d'après Fletcher).
Verdeckungseffekt db = Effet de masque en db.

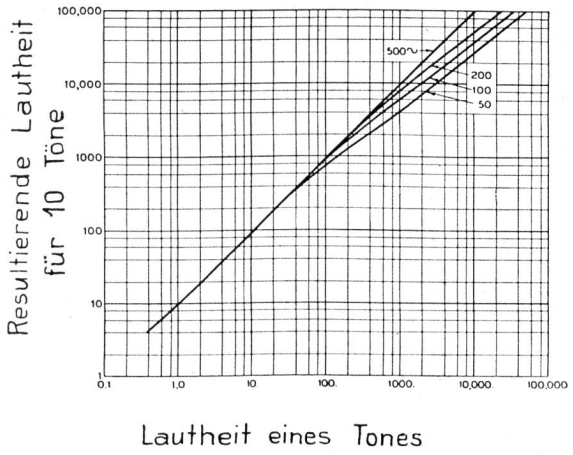


Fig. 24. Intensité auditive résultant de 10 sons de même force à des intervalles de fréquences différents (50, 100, 200, 500 périodes), en fonction de l'intensité auditive d'un son (d'après Fletcher). Resultierende Lautheit für 10 Töne = Intensité auditive résultante pour 10 sons. Lautheit eines Tones = Intensité auditive d'un son.

moins l'analyse est précise. L'oreille pouvant aussi analyser les sons très brefs, comme nous le verrons plus loin, elle doit avoir une acuité analytique limitée qui a pour effet que les sons très rapprochés les uns des autres ne peuvent plus être séparés et qu'on les entend comme des battements.

L'effet de masque permet aussi d'équilibrer sans peine, à l'oreille, les ponts de mesure des fréquences audibles. Dans la plupart des cas, on a, en plus du son fondamental d'après lequel le pont doit être équilibré, une série d'harmoniques avec lesquels le pont n'est pas équilibré. Mais comme ils sont plus élevés que le son fondamental, ils ne le masquent pas et ne dérangent pas non plus, bien qu'ils puissent être beaucoup plus fort que le son fondamental.

Quand on doit calculer l'intensité auditive résultant de sons musicaux ou de bruits composés de plusieurs sons, on doit tenir compte des effets de masque qui se produisent. Lorsque les intervalles de fréquences entre les diverses composantes ne sont nulle part inférieurs à 500 périodes, il ne se produit aucun effet de masque de sorte que les diverses intensités auditives, comme nous l'avons déjà vu, peuvent sans autre s'additionner. Pour les petits intervalles de fréquences, on peut cependant tenir compte de l'effet de masque dans les calculs. La figure 24 montre, comme exemple, l'intensité auditive résultant de 10 sons de même force à des intervalles de fréquences différents.

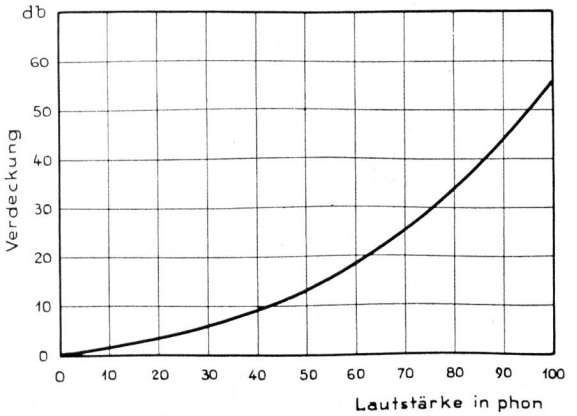


Fig. 25. Effet de masque d'un bruit dont l'énergie est également répartie (bruissement) (d'après Fletcher).
Verdeckung = Effet de masque. Lautstärke in Phon = Force du son en phones.

On peut également calculer l'effet de masque de bruits qui ne se composent pas de fréquences isolées mais présentent un spectre continu. La figure 25 qui représente l'effet de masque pour un bruit dont l'énergie est également répartie en montre un exemple. Ces valeurs sont utilisées pour évaluer l'influence qu'exerce un voisinage bruyant lorsqu'on téléphone.

*Le résidu.*

Une oreille exercée est capable de décomposer en sons partiels un son musical composé de plusieurs sons. En général, on ne perçoit cependant qu'une seule hauteur de son, celle du son fondamental. Il vaut la peine de remarquer que la perception de la hauteur du son ne varie pas quand la force du son fondamental est inférieure à celle des harmoniques et même quand le son fondamental fait complétement défaut. On le remarque clairement en particulier aussi sur les communications téléphoniques ordinaires sur lesquelles les fréquences inférieures à 300 périodes ne sont souvent plus transmises sans que la hauteur de la voix de la personne qui parle en soit modifiée sensiblement. Or, tous les sons fondamentaux de la voix masculine se trouvent dans la gamme de fréquences inférieures à 300 périodes qui n'est pas transmise. Cet effet peut s'expliquer par l'existence des sons harmoniques subjectifs, le son fondamental étant égal au premier son de différence du deuxième et du troisième harmonique, etc. On peut montrer cependant que cette explication n'est pas entièrement suffisante, car on peut, par exemple, en plus du son fondamental, supprimer encore plusieurs harmoniques inférieurs sans que la hauteur du son perçue en soit modifiée. En effet, Schouten a prouvé que pour les harmoniques supérieurs, où les courbes de résonance de la membrane basilaire se recouvrent fortement, la fréquence du son fondamental doit de nouveau apparaître (fig. 26). Il appelle cette composante, qui se forme dans l'oreille, *le résidu.*

L'hypothèse de Schouten implique que le centre auditif du cerveau doit pouvoir utiliser, c'est-à-dire entendre la caractéristique temporaire transmise de cette manière. Le résidu se forme dans une zone de la membrane basilaire qui normalement ne sert qu'à la réception des harmoniques supérieurs, de sorte qu'une impression du son fondamental grave ne peut s'y produire que lorsque le cerveau peut enregistrer non seulement le nombre des excitations nerveuses, qui sont une mesure pour l'intensité auditive des harmoniques, mais aussi le moment de leur arrivée. L'hypothèse de Fletcher, dont nous avons parlé, suivant laquelle la caractéristique temporaire doit aussi être valable pour les sons inférieurs à 100 périodes, reçoit ainsi une confirmation. Du point de vue de la physiologie nerveuse, la chose paraît possible, comme nous l'avons déjà vu.

### B. Sons non stationnaires.

Aussi bien au moment de l'enclenchement d'une source sonore qu'au moment du déclenchement, l'oreille fait preuve d'une certaine inertie. A l'en-

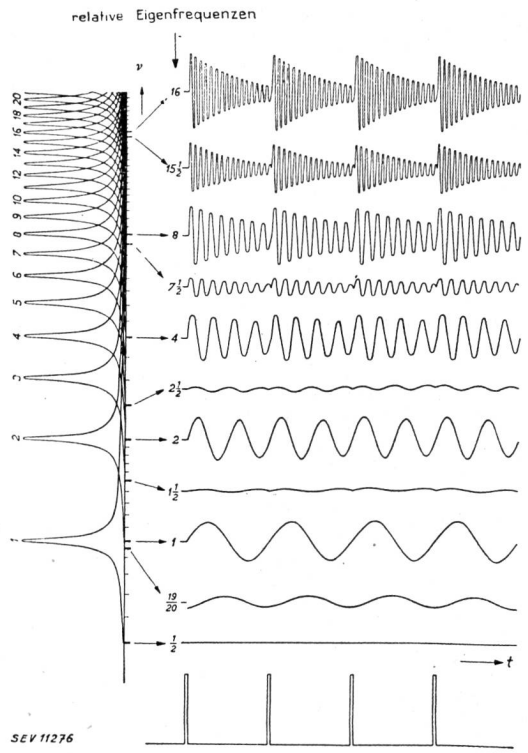


Fig. 26. Effet d'impulsions périodiques (spectre riche en harmoniques) sur les courbes de résonance de l'oreille interne. Du fait que les courbes des harmoniques supérieurs se recouvrent, le son fondamental apparaît de nouveau. Cet effet est le *résidu* (d'après Schouten).
Relative Eigenfrequenz = Fréquence propre relative.

clenchement, il s'écoule environ 0,2 sec. jusqu'à ce qu'elle perçoive le son dans toute sa force (fig. 27). Immédiatement après, la fatigue se fait sentir, ce qui se manifeste par une diminution progressive de la force du son. Au déclenchement, la sensation ne cesse pas subitement mais diminue lentement à zéro en 0,3 à 0,5 sec. (fig. 28). Cette durée de résonance dépend encore de la durée et de la force de l'excitation qui l'a précédée. L'appréciation de ce phénomène initial donne pour l'oreille une constante de temps de 50 ms, valeur qui est d'une grande utilité pour la construction de sonomètres servant à la mesure objective des bruits (phonomètres).

Il est particulièrement intéressant d'observer comment l'oreille se comporte quand on a affaire à des sons très courts tels que les clics et les claquements. Steudel a trouvé que la durée qui fait règle pour la

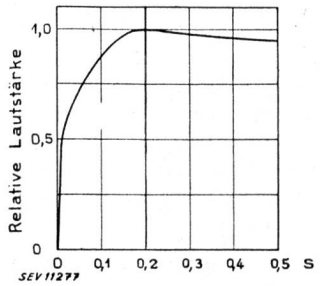


Fig. 27. Augmentation de la force du son après l'enclenchement (d'après Békésy).
Relative Lautstärke = Force relative du son.

force du son perçue pour un clic unique est de 0,3 ms, durée pendant laquelle se produit en moyenne la plus grande modification de pression. Généralement, elle se produit précisément pendant les premiers 0,3 ms du clic ou du claquement, de sorte que tout le reste du temps n'a absolument aucune in-

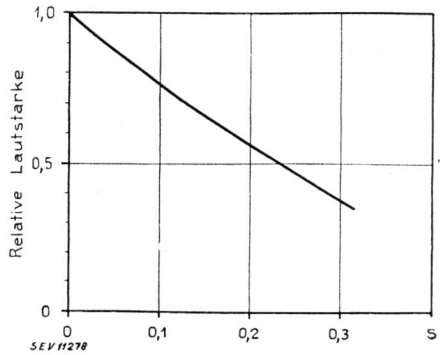


Fig. 28. Diminution de la force du son après le déclenchement (d'après Stendel).
Relative Lautstärke = Force relative du son.

fluence sur la force du son perçue (fig. 29). Cette constatation permet de calculer la force du son pour un clic ou un claquement dont la durée est connue. Quand les claquements se répètent, la force du son augmente d'environ 10 phones pour 50 claquements par seconde et reste ensuite constante.

Bürk, Kotowski et Lichte ont trouvé plus tard que la force du son d'un claquement peut aussi être calculée analytiquement à l'aide de l'intégrale de Fourier. Ils ont en outre déterminé la durée mini-

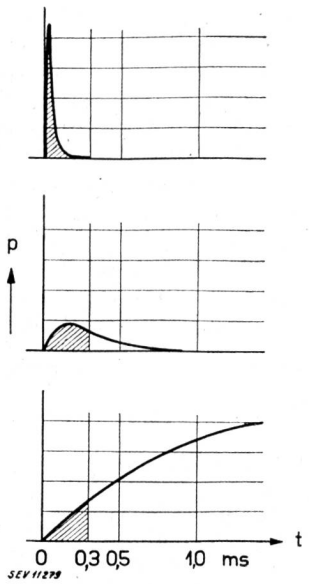


Fig. 29. Pression acoustique exercée par trois clics isolés de même force, 65 phones. Seuls les premiers 0,3 ms (surface hachurée) font règle pour la force du son perçue; le reste du temps n'a aucune influence (d'après Stendel).

mum qu'un son doit avoir pour qu'on puisse encore juste en reconnaître la hauteur (fig. 30). Ils ont pu prouver qu'il devait durer jusqu'à ce que soit concentrée à proximité du son ($\pm$ 20%) une partie de l'énergie totale suffisante ($^1/_3$ à $^1/_{10}$) pour reconnaître

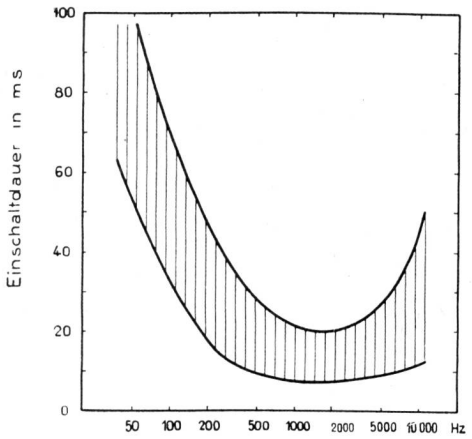


Fig. 30. Durée d'enclenchement nécessaire pour reconnaître la hauteur d'un son (d'après Bürk, Kotowski, Lichte). Einschaltdauer in ms = Durée d'enclenchement en ms.

le son. Les durées minimums pour reconnaître un son ne sont en fin de compte pas données par les propriétés de l'oreille, mais par les lois générales de la science des oscillations. Une impulsion infiniment courte d'un son est d'une fréquence indéterminée du fait que le spectre de cette impulsion contient toutes les fréquences avec la même intensité. A mesure que l'impulsion s'allonge, son spectre se rétrécit toujours plus et une partie toujours plus grande de l'énergie totale se concentre à proximité de la fréquence du son en question. Si le son devient d'une longueur infinie, son spectre ne contient plus qu'une seule fréquence. Strictement considéré, il n'est donc possible physiquement d'indiquer exactement la fréquence d'un son que si ce son est d'une longueur infinie.

La manière la plus simple de se représenter analytiquement une *détonation* est de supposer une boule (rayon r) soumise à une certaine surpression et qui abandonnée subitement à elle-même éclate, comme un ballon d'enfant. L'égalisation de pression qui se produit alors peut être calculée. Le spectre sonore de ce phénomène est représenté à la figure 31; il en ressort que le spectre se déplace vers les basses fré-

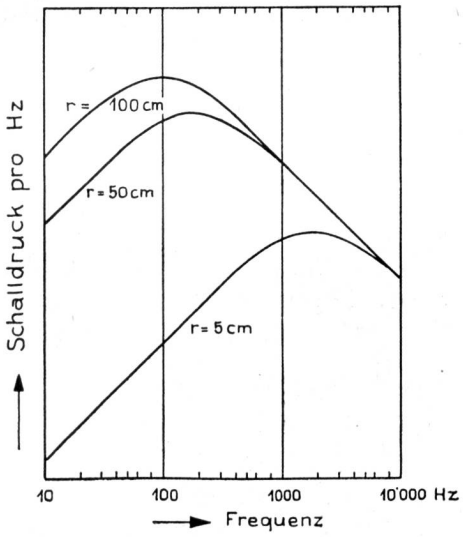


Fig. 31. Spectre sonore du claquement idéal (d'après Weber). Schalldruck pro Hz = Pression acoustique par période.

quences à mesure que le rayon de la boule augmente. Le maximum se trouve à la fréquence correspondant à une longueur d'onde égale à 3,5 fois le rayon de la boule.

Lorsqu'il s'agit d'une véritable explosion (éclatement d'une bombe, coup de canon, etc.), les gaz de l'explosion se répandent autour du foyer tout d'abord à une très grande vitesse (de l'ordre de $10^4$ m/s) provoquant des pressions et des températures extraordinairement élevées qui entraînent des destructions. A mesure qu'augmente la distance, la pression diminue rapidement jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur encore admissible pour l'application des lois de l'acoustique (comportement linéaire de l'air); Weber a évalué cette pression à environ 150 000 $\mu b$ (environ 0,15 at.). La distance du foyer de l'explosion à laquelle la pression atteint cette valeur correspond au rayon r de la boule hypothétique, de sorte que celui-ci est déterminé par l'énergie de l'explosion. L'explosion d'une lourde bombe d'avion provoque encore une pression de 3 at. à 50 m de distance, d'où il résulte que le rayon r de la boule est alors de 1000 m et la fréquence à laquelle se manifeste le maximum d'énergie d'environ 0,1 période. Au contraire, pour un coup de pistolet, le rayon r a environ 10 cm, de sorte que le maximum d'énergie se trouve à 1000 périodes. Ces rapports ont une très grande importance pour l'étude des lésions de l'ouïe produites par des détonations. Une détonation énergique (par exemple l'explosion d'une bombe d'avion) nuira surtout à l'oreille moyenne du fait que la membrane tympanique peut être déchirée et la chaîne des osselets détériorée par les grandes amplitudes. Une détonation moins énergique (par exemple un coup de feu, l'onde de tête produite par un projectile passant à une vitesse supérieure à celle du son ou aussi un claquement de fouet provoqué par la vitesse de l'extrémité du fouet supérieure à celle du son) accuse le maximum d'énergie aux hautes fréquences que l'oreille moyenne peut encore bien supporter; les tourbillons de liquide qui se produisent dans l'oreille interne et que Békésy a observés nuisent cependant à l'organe de Corti et peuvent même conduire à la destruction de tout le canal cochléaire. Les lésions de cette nature sont les lésions typiques des canonniers desservant les canons anti-chars ou de la défense aérienne, qui se distinguent par leur grande vitesse initiale et la violence correspondante du coup.

### *Influence de la position des phases.*

La manière de fonctionner de l'oreille interne comme analyseur a pour conséquence que dans les sons ou les bruits formés de composantes stationnaires, la position réciproque des phases de ces composantes ne joue aucun rôle. On peut très facilement prouver expérimentalement que les phases des harmoniques d'un son musical peuvent être déplacées à volonté sans que l'oreille entende quelque chose. L'oreille ne fonctionne donc pas d'après l'oscillogramme d'un phénomène acoustique, mais d'après le spectre des sons partiels qui ne fournit aucune indication relative aux phases des sons partiels (fig. 32).

Ce n'est que pour les sons très forts qu'on remarque une légère influence des phases. Cette indépendance à l'égard de la position des phases a

conduit à ne vouer également aucune attention à la caractéristique de phase des systèmes de transmission électriques, ce qui est admissible aussi longtemps qu'on ne considère que des phénomènes stationnaires. Mais pour un grand nombre de phénomènes acoustiques, c'est précisément la partie non stationnaire (établissement et évanouissement des oscillations) qui est déterminante pour l'impression sonore. Ceci s'applique en particulier à la retransmission des sons produits par des instruments à percussion (timbale, tambour, grosse caisse, etc.) et en général à la retransmission des bruits analogues à des impulsions (coups de feu, etc.). Suivant Steudel, la force du son de ces phénomènes est déterminée, comme nous l'avons déjà vu, par la modification de pression qui se produit au cours des premières 0,3 ms, de sorte qu'il s'agit, pendant ce très court laps de temps, de transmettre tout le spectre qui contient le phénomène transitoire. Ceci est particulièrement difficile pour les basses fréquences où le moindre décalage de phase du système de transmission entraîne déjà des grandes différences de temps.

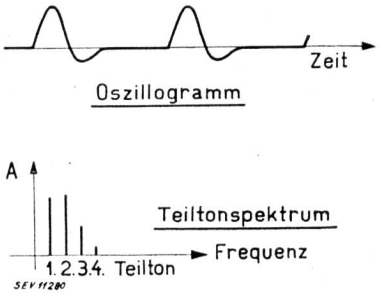


Fig. 32. Diverses façons de représenter une oscillation ou un phénomène acoustique: l'oscillogramme et le spectre des sons partiels; ce dernier ne fournit aucune indication relative aux phases des sons partiels.
Zeit = Durée. Oszillogramm = Oscillogramme. Teiltonspektrum = Spectre des sons partiels. Frequenz = Fréquence. Teilton = Son partiel.

Si nous considérons l'ensemble d'un système de transmission, nous constatons que les distorsions linéaires et non linéaires sont provoquées généralement par les transformateurs électroacoustiques, le microphone et le haut-parleur ou le téléphone, tandis qu'il est relativement facile de construire les amplificateurs et les lignes ainsi que, éventuellement, les radio-émetteurs et récepteurs de manière qu'ils ne produisent pas de distorsion. Pour la caractéristique de phase, les conditions sont exactement inverses; le microphone (en particulier le microphone à condensateur) et le haut-parleur accusent généralement de très faibles distorsions de phases, contrairement aux lignes et aux amplificateurs qui présentent une très forte caractéristique de phase, en particulier pour les basses fréquences. C'est ce qui explique le fait que les bruits ayant le caractère d'impulsions sont souvent si mal transmis.

### C. L'audition binauriculaire.

L'action combinée des deux oreilles nous permet de déterminer la direction d'origine d'une onde sonore. Seules des sources sonores placées sur le plan symétrique de la tête provoquent dans les deux oreilles exactement la même excitation. Si la source sonore est déplacée sur le côté, l'onde sonore ne frappe plus les deux oreilles avec la même intensité ni en même temps. Ces différences d'intensité et de temps permettent, par l'audition binauriculaire, de localiser des sources sonores.

La différence de temps est donnée immédiatement par la différence de chemin à parcourir jusqu'aux deux oreilles; elle est d'environ 0,1 ms pour une déviation de 10° du plan symétrique et d'environ 0,8 ms pour une déviation de 90°. Par suite de la faible longueur du nerf auditif, qui ne mesure que quelques centimètres, une onde excitatrice atteint le cerveau en un temps inférieur à 1 ms malgré la faible vitesse de propagation par les nerfs. Il est donc tout à fait possible que des différences de temps de l'ordre de 0,1 ms puissent être enregistrées par le cerveau.

La différence d'intensité qu'on constate entre les deux oreilles lorsque la source sonore est placée sur le côté est due aux phénomènes de diffraction provoqués par la tête et dépend par conséquent de la caractéristique de fréquence. Au-dessous de 300 périodes elle est très petite; pour les principales fréquences de la parole, dans les bandes moyennes et supérieures, elle est en moyenne de 7 db environ quand la source sonore a un écart de 60 à 90°. Il en résulte que les sons graves ne peuvent être localisés que par les différences de temps. Cependant, pour un son stationnaire, on ne peut plus parler de différences de temps, mais seulement de différences de phases, de sorte que pour localiser un son grave stationnaire, il est indispensable que les deux oreilles enregistrent une différence de phases. Mais ceci n'est possible que si le cerveau réagit aussi à la caractéristique de temps des impulsions nerveuses comme Fletcher et Schouten le supposent. En fait, il est réellement difficile de localiser un son stationnaire ou un son musical de basse fréquence, contrairement à un bruit non stationnaire. L'audition d'une sirène d'alarme en est un exemple; tant qu'elle marche régulièrement (fin d'alarme), il est difficile de déterminer la direction d'où vient le son, mais dès qu'elle est déclenchée et ne marche plus que par inertie le sens de la direction devient très aigu. Dans le premier cas on a surtout à disposition, pour localiser le son, des différences de phases, tandis que dans le second cas on a des différences de temps. Les cloches des églises peuvent toujours être bien localisées parce que leur son n'est pas stationnaire.

On s'explique ainsi très bien comment on arrive à distinguer de quel côté vient le son sur un plan horizontal, mais on s'explique moins bien comment on détermine la direction vers le haut ou vers le bas et en avant ou en arrière. Il est très probable que nous pouvons distinguer ces directions en tenant la tête un peu obliquement ou en lui faisant faire involontairement de légers mouvements de va-et-vient de manière à rétablir les conditions essentielles des directions horizontales.

### D. La conduction osseuse.

En provoquant directement sur les os du crâne des oscillations à fréquences audibles, on engendre également des impressions sonores; cet effet est désigné sous le nom de conduction osseuse du fait que, dans

ce cas, la conduction aérienne ordinaire par la membrane tympanique et l'oreille moyenne est supprimée. Pour les gens dont l'oreille moyenne a été détruite ou endommagée par la maladie ou par un accident, la possibilité d'entendre sans le concours de cet organe a une très grande importance. Des mesures de la zone d'audibilité ainsi que des mesures de l'intelligibilité (Watson) ont prouvé que la conduction osseuse engendre des sensations sonores absolument normales.

Bien entendu, la sensibilité absolue est passablement moins élevée avec la conduction osseuse qu'avec la conduction aérienne. Pour un récepteur à conduction osseuse dont le vibrateur de 0,665 $cm^2$ est appuyé sur le front avec une pression de 370 grammes, l'amplitude effective tout juste audible (seuil d'excitation) est de $10^{-8}$ cm avec 1000 périodes et de $10^{-5}$ avec 100 périodes (Watson). Békésy a mesuré les forces correspondantes et a trouvé qu'elles étaient de 1 dyne avec 1000 périodes et de $10^3$ dynes avec 100 périodes.

La manière dont la membrane basilaire est excitée par conduction osseuse est analogue à celle de la conduction aérienne. Pour le prouver, on transmet à l'oreille le même son simultanément par conduction osseuse et par conduction aérienne; on règle ensuite l'amplitude et la phase de manière à obtenir une compensation intégrale et l'on constate alors que malgré les vibrations de l'air et les vibrations des os, l'oreille n'entend rien (Békésy).

Il n'est pas très facile de comprendre comment il se fait que l'étrier et la conduction osseuse provoquent sur la membrane basilaire une excitation de même nature. Ce phénomène est probablement dû à la construction asymétrique des deux moitiés du limaçon, la rampe vestibulaire étant chargée de l'oreille moyenne et raccordée en plus à tout l'appareil vestibulaire avec sa quantité de liquide relativement considérable. De cette façon, une compression de tout le rocher du temporal doit produire dans le limaçon des courants de liquide lymphatique analogues à ceux provoqués par la base de l'étrier. C'est ce qui explique aussi pourquoi, lorsque l'oreille moyenne est enflammée, le son transmis par conduction osseuse devient plus fort; l'inflammation gêne la mobilité de la chaîne des osselets, ce qui augmente encore l'asymétrie. Cet effet se produit aussi lorsqu'on obture artificiellement le conduit auditif. Il est très précieux pour le diagnostic des maladies de l'oreille, car il permet de déterminer facilement s'il s'agit d'une surdité due à une affection de l'oreille moyenne ou de l'oreille interne.

Dans la guerre actuelle, les lésions de l'oreille dues à l'introduction de nouvelles armes à grande vitesse initiale et à l'emploi intensif de matériel de tout genre sont beaucoup plus nombreuses que dans aucune autre guerre. Or, l'ouïe est le sens le plus important pour notre vie émotive et la réintégration dans la vie sociale des nombreuses victimes de ces lésions de l'oreille posera à l'humanité un des plus tristes problèmes de l'après-guerre. En créant de bons appareils acoustiques à conduction osseuse, l'industrie électro-acoustique contribuera puissamment à aider ces malheureux.

**Bibliographie.**

*H. v. Helmholtz:* „Die Lehre von den Tonempfindungen", Braunschweig 1877.
*H. Fletcher:* „Speech and Hearing", New York 1929. Journ. Acoust. Soc. America 1930, 1937, 1938.
*G. v. Békésy:* Phys. Zeitschrift 1928, 1929, 1930.
— Akust. Zeitschr. 1936—1943.
— El. Nachr. Techn. 1935.
*H. Davis:* Journ. Acoust. Soc. America 1935.
*O. Ranke:* Ergeb. Physiol. 1935.
*J. F. Schouten:* Philips Techn. R. 1940.
*U. Steudel:* Hochfreq.techn. u. El. Ak. 1933.
*N. A. Watson:* Journ. Acoust. Soc. America 1937, 1938.
*Bürk, Kotowski, Lichte:* El. Nachr. Techn. 1935.

## Schaltungen für Konferenzgespräche.

Von *A. Kasper*, Ing. GD PTT, Bern.

621.395.348.4

*Allgemeines.* Auf vielen Gebieten des heute so verknüpften wirtschaftlichen, politischen und kulturellen Lebens ist die mündliche Aussprache mit Rede und Gegenrede mit der Möglichkeit schneller Beschlussfassung auch bei räumlich getrennten Kräften unerlässlich geworden. Mehr und mehr macht sich im Telephonverkehr die Forderung geltend, mehr als zwei Teilnehmer im Fern- und Ortsverkehr zu einem gemeinsamen Gespräch zu verbinden, wozu bestimmte Einrichtungen zur Abhaltung von sogenannten Konferenzgesprächen notwendig sind. Im PTT-Betrieb hat man sich anfänglich dadurch geholfen, daß bei Verbindungen mehrerer Teilnehmer diese einfach mit Multiple-Klinken parallelgeschaltet wurden. Fernleitungen, die mit Verstärkern ausgerüstet sind, lassen sich jedoch nicht auf diese Art zusammenschalten, da sonst die Stabilität der Verstärker gestört wird. Konferenzgespräche über unverstärkte Leitungen weisen aber meistens ungenü-

## Les dispositifs des communications collectives.

Par *A. Kasper*, ing. D. G. des PTT, Berne.

621.395.348.4

*Généralités.* Dans beaucoup de domaines de la vie si compliquée d'aujourd'hui, économique, politique et culturelle, il est indispensable qu'on puisse discuter les choses de vive voix et prendre rapidement des décisions, même si l'on est séparé par de grandes distances. C'est pourquoi on exige de plus en plus du téléphone qu'il fournisse la possibilité de mettre en relation plus de deux abonnés pour une communication commune interurbaine ou locale, ce qui nécessite l'emploi de dispositifs spéciaux permettant d'établir ce qu'on appelle une communication collective. Dans l'exploitation, on se tira d'affaire au début en reliant simplement les abonnés en parallèle par l'intermédiaire de jacks multiples. Cependant, on ne peut pas, sans autre, relier de cette manière les lignes interurbaines équipées de répéteurs, car la stabilité de ces derniers en souffre. D'autre part, les communications collectives établies sur des lignes non amplifiées accusent généralement une audition